

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

**FABIO DAL ZOTTO**

**ANÁLISE DA QUALIDADE SUPERFICIAL NO PROCESSO DE FRESAMENTO EM  
PAINÉIS DE MDF**

**CAXIAS DO SUL**

**2023**

**FABIO DAL ZOTTO**

**ANÁLISE DA QUALIDADE SUPERFICIAL NO PROCESSO DE FRESAMENTO EM  
PAINÉIS DE MDF**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Universidade de Caxias do sul como requisito  
parcial à obtenção do grau de Engenheiro  
Mecânico.

Área de Concentração: Processos de  
Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilman

**CAXIAS DO SUL**

**2023**

**FABIO DAL ZOTTO**

**ANÁLISE DA QUALIDADE SUPERFICIAL NO PROCESSO DE FRESAMENTO EM  
PAINÉIS DE MDF**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Universidade de Caxias do sul como requisito  
parcial à obtenção do grau de Engenheiro  
Mecânico.

Área de Concentração: Processos de  
Fabricação.

**APROVADO EM**

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Prof. Dr. Leandro Luís Corso  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

---

Prof. Me. Rafael Dallegrave Conrado  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

## RESUMO

O presente trabalho, requisito parcial para a colação de grau com bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, teve como objetivo avaliar o acabamento em usinagens por meio de fresamento em painéis de aglomerados de média densidade (MDF). A qualidade da superfície, foi analisada de duas formas, sendo elas, pela rugosidade Ra, onde se utilizou o equipamento conhecido como rugosímetro com as configurações de *cut-off* 2,5 mm e comprimento de medição de 12,5 mm, já para a análise de textura, foi utilizado o equipamento denominado projetor de perfil, ao qual foi utilizado uma lente de aumento de 187 vezes. Nos resultados obtidos, mensurando a rugosidade e avaliando os atuais processos de fresamento de e acabamento, foi observado que a operação de lixamento não altera significativamente o resultado da rugosidade Ra, Entretanto, resulta em uma superfície uniforme e de qualidade superior, em especial na região de corte com maior profundidade, ao qual se constatou uma diferença significativa em relação à camada próxima à superfície. A maior compactação de material e a presença de resina na região de corte com profundidade de 2 mm apresentam uma superfície com qualidade significativamente superior. Avaliando painéis de MDF de propriedades distintas, ou seja, com densidade elevada, foram notadas mudanças significativas na textura, em especial na camada central do material, visto que a camada superficial já possuía uma maior compactação e presença de resina no MDF *standard*. Avaliando os parâmetros de processo, em especial para a velocidade de avanço, ao qual foram utilizadas cinco variações, que foram 2, 4, 5, 8, 10 m/min, foi possível ratificar o já apontado pela bibliografia que, quanto menor o avanço da velocidade de avanço, melhores resultados são obtidos. Com os resultados obtidos, tanto para a rugosidade média Ra e para análise visual de textura, constaram-se resultados mais satisfatórios para a menor velocidade de avanço, ou seja, 2 m/min, gerando o resultado para rugosidade de 10,80  $\mu\text{m}$  para a região central dos painéis de MDF e rugosidade de 4,57  $\mu\text{m}$  no corte superficial.

**Palavras-chave:** Rugosidade. Fresamento. Pannel em MDF.

## ABSTRACT

The present work, a partial requirement for graduation with a bachelor's degree in Mechanical Engineering at the University of Caxias do Sul, aimed to evaluate the finish in machining by means of milling in medium-density particleboard (MDF) panels. The surface quality was followed in two ways, namely, by the roughness Ra, where the equipment known as a rugosimeter was used with the settings of cut off 2.5 mm and length measurement of 12.5 mm, as for the texture analysis, the equipment called profile projector was used, to which a magnifying lens of 187 times was used. In the results obtained, measuring the roughness and evaluating the current milling and finishing processes, it was observed that the sanding operation does not significantly change the result of roughness Ra, however, it results in a uniform surface of superior quality, especially in the region cut with greater depth, in which a significant difference was found in relation to the layer close to the surface. The greater compaction of the material and the presence of resin in the cut region with a depth of 2 mm provide a surface with significantly higher quality. Evaluating MDF panels with different properties, that is, with high density, significant changes in the texture were noticed, especially in the central layer of the material, since the surface layer already had greater compaction and presence of resin in the standard MDF. Evaluating the process parameters, especially for the advance speed, which five variations were used, which were 2, 4, 5, 8, 10 m/min, it was possible to ratify what has already been pointed out by the bibliography that, the smaller the advance feed speed, better results are obtained. With the results obtained, both for the average roughness Ra and for the visual texture analysis, more satisfactory results were found for the lowest feed speed, that is, 2 m/min, generating the result for roughness of 10.80  $\mu\text{m}$  for the central region of the MDF panels and roughness of 4.57  $\mu\text{m}$  in the surface cut.

**Keywords:** Roughness. Milling. MDF panel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Parque Fabril Bontempo em São Marcos - RS .....	13
Figura 2 – Franquia Bontempo em Londrina – PR .....	14
Figura 3 - Painéis em MDF .....	17
Figura 4 - Processo de fabricação dos painéis em MDF .....	18
Figura 5 - Sentido de fresamento segundo a trajetória .....	20
Figura 6 - Movimento e sentidos para os fresamentos concordante e discordante .....	21
Figura 7 - Formação do acabamento e tamanhos de corte .....	21
Figura 8 - Gráfico de velocidade de corte .....	22
Figura 9 - Gráfico de velocidade de avanço .....	23
Figura 10 - Análise de rugosidade pelo fator avanço por dente $f_z$ .....	25
Figura 11 - Análise MEV no fresamento concordante .....	26
Figura 12 - Gráfico para o material adequado para a ferramenta.....	27
Figura 13 - Ângulo de corte para diferentes materiais .....	29
Figura 14 - Ferramenta de perfil com usinagem periférica e de face .....	30
Figura 15 - Gráfico ilustrativo para cálculo da média $R_a$ .....	33
Figura 16 - Fresa de Lâmina única, dupla Lâmina .....	35
Figura 17 - Desgaste do gume de corte .....	35
Figura 18 - Gráfico de resultados na medição da rugosidade .....	36
Figura 19 - Análise MEV para fresamento frontal em MDF .....	37
Figura 20 – Objeto e pontos de análise .....	40
Figura 21 – Fresa com pastilhas revestidas de diamante.....	42
Figura 22 – Foto da ferramenta com pastilhas revestidas de diamante.....	42
Figura 23 – Centro de Usinagem Centateq P-300 .....	43
Figura 24 – Rugosímetro MITUTOYO SJ-301.....	44
Figura 25 – Projetor de perfil Hexagon SVM3020 .....	45
Figura 26 - Operações de lixamento.....	50
Figura 27 - Análise comparativa rugosidade: Fresamento x Fresamento e Lixamento .....	50
Figura 28 - Análise comparativa textura $a_p$ 7,5 mm: Fresamento x Fresamento e acabamento .....	51
Figura 29 - Análise comparativa textura $a_p$ 2 mm: Fresamento x Fresamento e acabamento..	52
Figura 30 – Figura 1.1: Curva de sino para distribuição gaussiana.....	54
Figura 31 - Distribuição gaussiana Fresamento X Fresamento + Acabamento .....	54

Figura 32 – Análise comparativa textura $a_p$ 7,5 mm: MDF Standard X MDF Alta densidade	57
Figura 33 - Análise comparativa textura $a_p$ 2 mm: MDF Standard X MDF Alta densidade....	57
Figura 34 - Gráfico rugosidade parâmetro avanço por dente para $a_p$ 7,5 mm.....	59
Figura 35 - Gráfico rugosidade parâmetro avanço por dente para $a_p$ 2 mm.....	59
Figura 36 – Análise de textura: Parâmetros de processo, $a_p$ 7,5 mm. ....	61
Figura 37 - Análise de textura: Parâmetros de processo, $a_p$ 2 mm. ....	62

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação de medições de Rugosidade .....	32
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos painéis em MDF quanto a sua densidade .....	18
Tabela 2 - Experimento prático alterando a velocidade de avanço .....	34
Tabela 3 - Experimento prático alterando profundidade de corte .....	37
Tabela 4 – Painéis de aglomerado utilizados no experimento.....	38
Tabela 5 – Dados de entrada para a confecção das amostras .....	39
Tabela 6 - Resultados da Rugosidade MDF Standard X MDF alta densidade .....	56

## LISTA DE SÍMBOLOS

$f_z$	Avanço por dente
$a_p$	Profundidade de corte
$a_e$	Penetração de trabalho
$V_c$	Velocidade de corte
$V_f$	Velocidade de avanço
$f$	Avanço por rotação
$f_{z\text{eff}}$	Comprimento da marca de corte
$R_a$	Rugosidade média
$k_t$	Ângulo do gume
VB	Desgaste do flanco
$k_r$	Ângulo de corte
$n$	Rotação da ferramenta
$\rho$	Densidade

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MDF	Painel de fibra de média densidade
MDP	Painel de aglomerado de média densidade
CNC	Controle numérico por computador
ABIPA	Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
PCD	Diamante Policristalino
cBN	Nitreto de Boro Cúbico
PcBN	Nitreto Cúbico de Boro Cristalino
HSS	Aço rápido
HDF	Painel de fibra de alta densidade
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
RPM	Rotações por minuto

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	12
1.2	PERFIL DA ORGANIZAÇÃO E AMBIENTE DE ESTÁGIO .....	13
1.3	OBJETIVO GERAL .....	14
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
2.1	PAINEL MDF (Medium Density Fiberboard) .....	16
2.2	FRESAMENTO .....	19
<b>2.2.1</b>	<b>Fresamento do MDF .....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Ferramenta de corte .....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Rugosidade no fresamento do MDF .....</b>	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>38</b>
3.1	MATÉRIA-PRIMA .....	38
3.2	PARÂMETROS APLICADOS – DADOS DE ENTRADA .....	39
3.3	OBJETO DA ANÁLISE .....	40
3.4	MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS .....	41
<b>3.4.1</b>	<b>Ferramenta (fresa) .....</b>	<b>41</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Centro de usinagem HOMAG .....</b>	<b>42</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Rugosímetro .....</b>	<b>43</b>
<b>3.4.4</b>	<b>Projektor de perfil .....</b>	<b>44</b>
3.5	ANÁLISES COMPARATIVAS .....	45
<b>4</b>	<b>RESULTADOS DAS ANÁLISES COMPARATIVAS .....</b>	<b>49</b>
4.1	ANÁLISE – FRESAMENTO X FRESAMENTO E ACABAMENTO .....	49
4.2	DENSIDADE DO MDF .....	55
4.3	PARÂMETROS EMPREGADOS NO PROCESSO DE FRESAMENTO .....	58
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>64</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>66</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>67</b>
	<b>ANEXO A .....</b>	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os processos são fundamentais e constantes na indústria moveleira. Segundo Stemmer (1995), toda operação de usinagem consiste na retirada de material em formas de cavaco utilizando ferramentas de corte com movimento rotativo e uma determinada velocidade de avanço, a fim de transformar a matéria-prima em objetos.

Como principais processos de usinagem na indústria moveleira têm-se: operações de corte, furação e fresamento, os quais necessitam do emprego de ferramentas como serra, fresa e brocas. Com o constante crescimento e evolução das tecnologias, o mercado exige soluções inovadoras, seja em qualidade ou em processo. No ramo moveleiro, cada vez mais tem-se buscado por sofisticação e bem-estar para o cliente final, sem deixar de lado questões como custo-benefício e lucro.

A indústria de móveis utiliza, basicamente, duas matérias-primas provenientes de madeiras reflorestadas que são o MDP (*Medium Density Particleboard*) e o MDF (*Medium Density Fiberboard*). Os dois materiais possuem processo de fabricação parecidos, diferindo-se apenas na sua composição estrutural, o MDP é composto por partículas de madeira, enquanto o MDF é composto por fibras.

No que diz respeito a usinabilidade, o painel em MDF possui vantagens em relação ao MDP. Para processos e produtos que exijam uma superfície com acabamento que tenham menor rugosidade, o painel em MDF apresenta vantagens em comparação ao MDP.

Dentre os processos de fabricação na indústria moveleira, o fresamento se destaca como um processo de usinagem capaz de reproduzir formas e geometrias variadas, podendo ser realizado por diferentes máquinas CNC (Comando numérico por computador), as quais possuem alta capacidade de controle dimensional e qualidade de usinagem.

Os produtos avaliados neste estudo são fabricados utilizando o MDF como matéria-prima. Eles recebem usinagens na face superior e, posteriormente, acabamento em pintura líquida. A utilização do MDF se deve à necessidade de um excelente acabamento das usinagens, facilitando, assim, a preparação da superfície e a aplicação da pintura líquida sobre o produto.

Sempre é possível inovar e propor melhorias e esse estudo se propõe a analisar o atual processo de fresamento em MDF, tendo como objetivo identificar possíveis melhorias com base na pesquisa experimental e conhecimentos adquiridos na graduação do curso de Engenharia Mecânica.

Almeja-se, ao final da pesquisa, aliando métodos, técnicas e experiências coletadas na doutrina, identificar se, dentre as possibilidades disponíveis para os processos de usinagem,

o método utilizado atualmente pela empresa eleita como *locus* da pesquisa é o mais eficiente e, em caso negativo, identificar qual parâmetro poderá ser alterado visando a máxima eficiência.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Desde o início do capitalismo, o lucro é o principal pilar de toda empresa, seja ela prestadora de serviço ou criadora de produto. Com características distintas em decorrência da cultura de cada país ou até mesmo estado ou região, desde que os seres humanos deixaram de ser nômades, a mobília passou a ser um produto essencial.

Com a evolução dos processos, as indústrias moveleiras, atuais responsáveis pela fabricação de tais objetos, por vezes não dão a devida atenção aos processos de fabricação do produto final, perpassando pela matéria-prima e pela sua utilização.

Ao invés de empregar estudos técnicos, as empresas baseiam-se nas proposições feitas pelos fornecedores das matérias-primas, especialmente, no tocante à geometria da ferramenta, materiais e parâmetros de processo, acarretando no desperdício de tempo e esforço intelectual e financeiro para mitigação e solução do problema posto. Com frequência, despontam-se problemas relacionados às imperfeições decorrentes de falha no processo mecânico de desgaste da matéria-prima – usinagem.

O aprimoramento no processo de usinagem, especialmente o fresamento, resultaria na melhoria do acabamento. O que não está ligado apenas à qualidade final do produto, mas, também, na redução de custos de fabricação e de operações, mais precisamente de lixamento e de aplicação de materiais visando deixar a superfície com aspecto visual uniforme. De acordo com Biazus, *et. al.*:

A preocupação das empresas no sentido de que melhorias operacionais reduzam custos e aumentem a competitividade dos produtos é outra característica a ser destacada, pois gera melhoria contínua no processo produtivo (ganhos de qualidade) e nos resultados operacionais das empresas (ganhos financeiros), na tentativa de manter margens satisfatórias mesmo em períodos de retração da demanda (2013, p. 56)

Assim, o presente estudo justifica-se pela possibilidade e necessidade de se obter melhorias no acabamento do produto, por meio de alterações no processo de fresamento, resultando, possivelmente, em um produto de maior qualidade.

## 1.2 PERFIL DA ORGANIZAÇÃO

O município de São Marcos tem raízes históricas permeadas por imensas lacunas. O que se sabe é que, até 1963, foi um distrito da cidade de Caxias do Sul. A cidade permanece com características de cidade de interior, com pouco mais de 21 mil habitantes (IBGE, 2021), em uma área territorial de 263,72 km<sup>2</sup> a 160 km de distância da capital do estado. A cidade de São Marcos abriga uma empresa de grande porte do ramo moveleiro.

Fundada em 1978, a BRS Indústria de Móveis Ltda. tem por nome fantasia “Bontempo”, nome dado em homenagem ao pai dos fundadores que incutiu na família a paixão pelos móveis. Iniciou pela fabricação de cadeiras, perpassando por móveis de jardim pelos quais ganhou destaque nacional chegando ao atual segmento de móveis planejados de alto padrão (BONTEMPO, 2022).

Seu parque fabril possui uma área superior a 20.000m<sup>2</sup> situada na Rua José Michelin, n° 270 no Bairro industrial. Contava, no ano de 2022, com, aproximadamente, 300 colaboradores, a figura 1 apresenta o parque fabril da Bontempo.

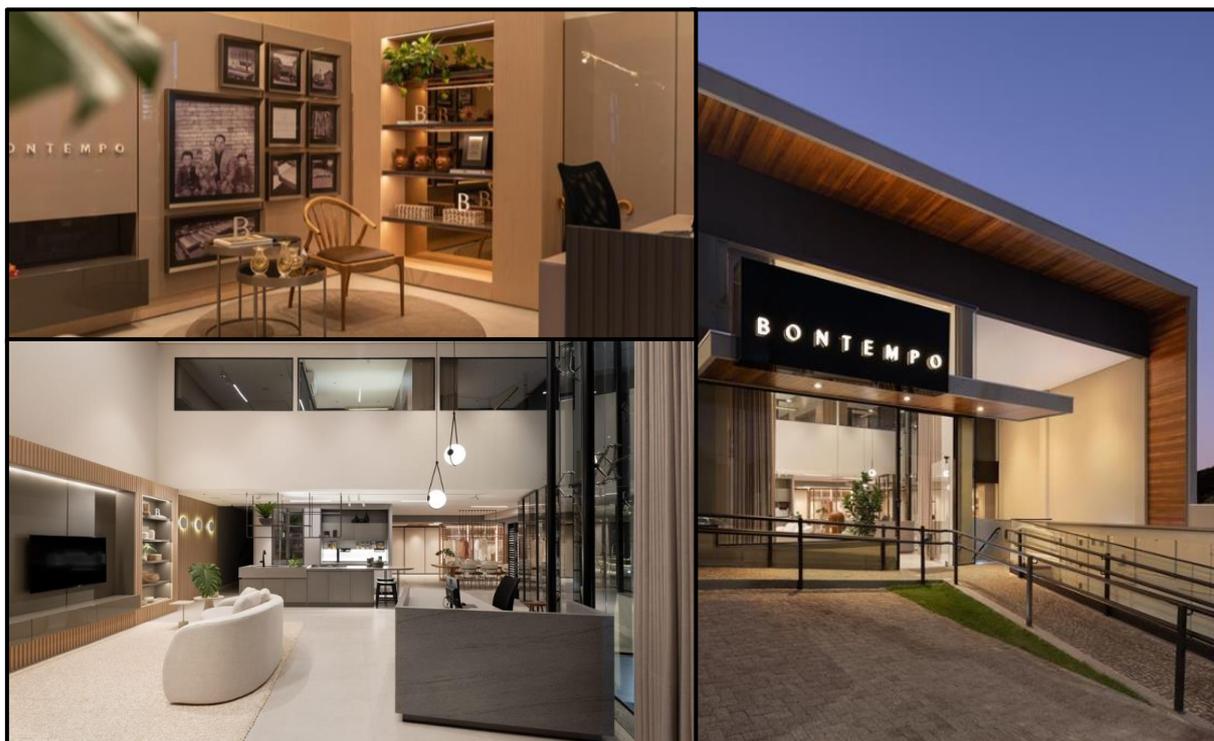
Figura 1 - Parque Fabril Bontempo em São Marcos - RS



Fonte: Adaptado de arquivos Bontempo 2022.

A Bontempo trabalha com a venda de seus produtos por meio de rede de franquias no Brasil e no exterior, como Santiago-CH e Chicago-EUA. Ao todo são 55 lojas com a marca Bontempo. Representado na figura 2, a loja Bontempo localizada em Londrina – PR.

Figura 2 – Franquia Bontempo em Londrina – PR



Fonte: Adaptado de arquivos Bontempo 2022.

### 1.3 OBJETIVO GERAL

Avaliar a qualidade superficial no processo de usinagem de materiais composto de madeira utilizando ferramenta revestida de diamante.

### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A seguir são apresentados os objetivos específicos deste trabalho:

- a) Identificar a rugosidade e a textura do objeto resultante do processo de fresamento utilizado pela empresa BRS comparando com o processo de fresamento e acabamento;
- b) Comparar a influência da variação de propriedades mecânicas nas diferentes camadas dos painéis em MDF;
- c) Constatar, por meio da análise de MDF de diferentes densidades, se a tal propriedade influencia diretamente na qualidade superficial.

d) Identificar se os parâmetros utilizados no processo influenciam diretamente na qualidade superficial do fresamento em painéis de MDF, através de cinco variações de avanço por dente.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No capítulo a seguir será apresentada a revisão bibliográfica em que serão abordados aspectos e variáveis que têm interferência direta com a qualidade superficial no processo de fresamento do MDF, como a matéria-prima, painéis de MDF, os parâmetros utilizados no processo e, por fim, a forma de medir e quantificar a qualidade superficial.

### 2.1 PAINEL MDF (*MEDIUM DENSITY FIBERBOARD*)

A evolução histórica social perpassa pela formação da sociedade na qual boa parte dos *homosapiens* deixam de ser nômades e passam a se agrupar e a criar bens que facilitem a sobrevivência, que deem conforto e, assim, sucessivamente até chegar no modelo de sociedade de consumo alimentada pelo capitalismo.

Em dado momento, a madeira, que era um material abundante e de fácil acesso, se torna cara e escassa, especialmente as madeiras maciças – assim chamadas as que possuem maior resistência e qualidade. Esses fatores, atrelados ao desenvolvimento tecnológico, abrem espaço para o surgimento de novas possibilidades em substituição da madeira e, assim, em dado momento, que se remete à década de 1960, nasce um novo produto: o Painel de Média Densidade. Torquato (2008) chama atenção no sentido de que questões financeiras e ambientais não foram os únicos fatores a influenciar o nascimento do MDF, mas, também, o anseio por inovação.

Os carpinteiros pouco a pouco adquiriram um *know-how* e definiram as regras da sua arte. No início, pressionados pelas qualidades e defeitos da madeira que estavam à sua disposição, eles obtiveram, graças a um equipamento melhor, 17 seções adaptadas para o emprego e a realização de peças com aparências mais belas. Por outro lado, os marceneiros progrediram no conhecimento do material e melhoraram a sua técnica. Tal como os seus clientes, eles queriam mobiliário melhor "trabalhado", peças com um aspecto mais elaborado e refinadas. O aparecimento de lacas e vernizes impôs às partes visíveis da utilização de tábuas sem defeitos, impecável, ou com características especiais. A partir desta preocupação estética nasceu a idéia (sic) de "placas", ou seja, com uma fina camada de madeira de 0,5 a 5 milímetros de espessura, "colocada" na superfície de uma prancha de menor qualidade, seja madeira maciça ou reconstituída, para dar uma aparência melhor, mais decorativa (TORQUATO, 2008, p. 17).

Caracterizado como um produto industrial, ou seja, matéria-prima empregada na formação de um produto, nas palavras de Priscila Roel de Deus (2015) "O MDF (painel de média densidade) é um produto industrial produzido a partir de fibras lignocelulósicas e resina através da ação conjunta de pressão e calor" (2015, p. 18). Com possibilidade de uso nas mesmas condições que a madeira maciça, o MDF, que surge em meados da década de 1960 nos

Estados Unidos, chega à Europa em 1970 e ao Brasil na década de 1990 e se torna uma das principais matérias-primas para a indústria moveleira no Brasil (MATTOS *ET AL.*,2008).

A indústria moveleira faz uso deste material devido as suas características, possuindo estabilidade dimensional e uma excelente usinabilidade que permite a obtenção de melhor acabamento por conta da homogeneidade (ABIPA, 2013).

Por suas características, o MDF pode ser utilizado em diversos produtos que passam por processo de usinagens tanto em sua face, como em suas bordas, obtendo como resultado uma excelente qualidade superficial favorecendo os processos de revestimento.

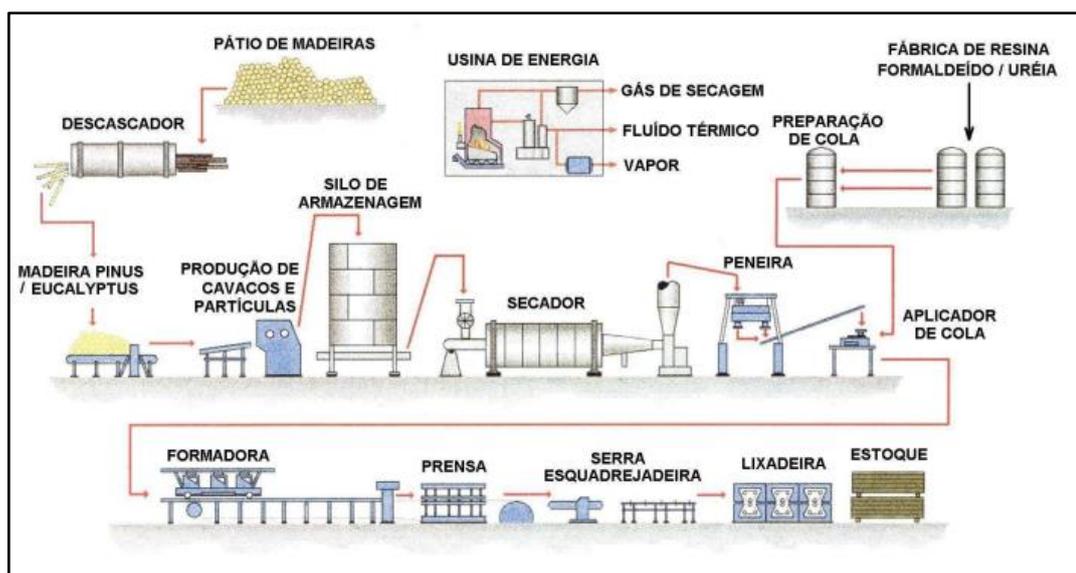
Figura 3 - Painéis em MDF



Fonte: Adaptado de Berneck 2022

Conforme ABIPA (2013), a fabricação dos painéis de MDF se dá a partir de matéria-prima reflorestada, com grande utilização de Eucalipto e Pinus. Em seu processo de formação, o colchão contendo fibras da madeira reflorestada é prensado sob a ação de elevado calor e pressão. Na figura 4 estão representadas as etapas do processo de fabricação dos painéis em MDF, iniciando pela obtenção da matéria-prima e seguindo até a estocagem.

Figura 4 - Processo de fabricação dos painéis em MDF



Fonte: Adaptado de Iwakiri, 2005

Os painéis de MDF são classificados pela norma ABNT NBR 15316:2009 conforme a sua densidade, que é a “relação entre massa e volume de um corpo, a determinado teor de umidade, conforme pode ser observado na tabela 1. O ensaio de volume específico é realizado baseando-se nos padrões da Norma Europeia NP, EN 323:2000” (ASSIS, 2013, p.31).

Tabela 1 - Classificação dos painéis em MDF quanto a sua densidade

<b>Classificação</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>
HDF	Maior que 800
Standard	Entre 650 a 800
Light	Entre 550 a 650
Ultra Light	Menor que 550

Fonte: Adaptado de ABIPA (2013)

No que concerne às propriedades mecânicas, para Iwakiri (2005), a distribuição das fibras de forma homogênea e isotrópica resulta em um material com propriedades de alta resistência mecânica e resistência ao arranque de parafusos, características estas que são de grande importância na fabricação de móveis, além de apresentarem vantagens quanto a sua usinagem decorrentes da superfície lisa.

Eleotério (2000) cita que, nos painéis de MDF, a densidade do material apresenta variação. À medida que nos aproximamos do centro do material a densidade e homogeneidade

apresentam valores menores do que em sua face. Desta forma usinagens com menor profundidade de corte, apresentam resultados mais satisfatórios, com menor rugosidade.

## 2.2 FRESAMENTO

O processo de usinagem, ou seja, o processo mecânico de desgaste da matéria-prima que dá origem a uma peça, pode ser efetivado de diversas formas como torneamento, aplainamento, furação, brochamento, retificação e fresamento (FERRARESI, 1970).

Na indústria moveleira, os processos de furação e fresamento são constantes e essenciais. Uma vez que é o processo de furação que possibilita a montagem de maneira alinhada e o fresamento é o processo pelo qual se obtém formas variadas de bordas e superfícies. O fresamento resulta em um produto com *design* diferenciado e um acabamento de qualidade o que tem por consequência um diferencial de destaque no mercado.

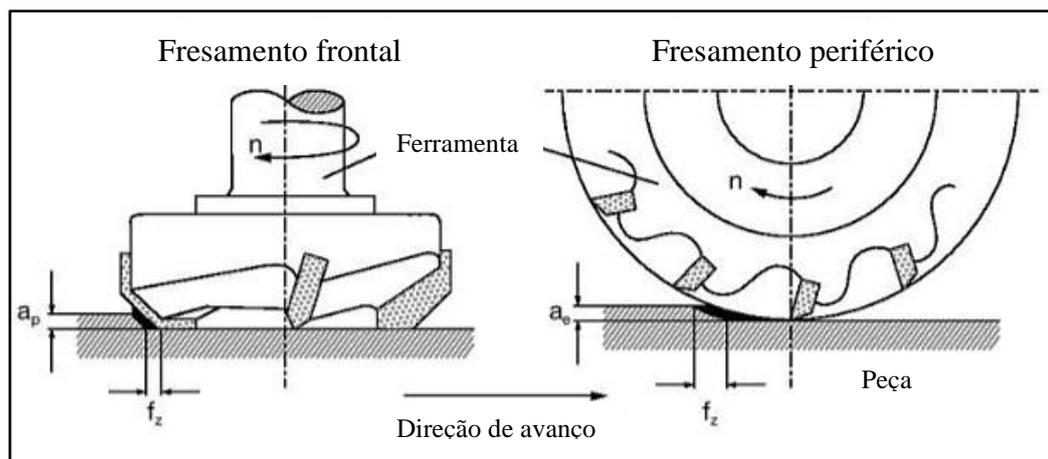
O processo de fresamento consiste na remoção de material em forma de cavaco afim de transformar a matéria-prima em produto. Define-se cavaco como sendo a porção de material retirado por meio de um processo utilizando uma ferramenta (FERRARESI, 1977).

Nos processos de usinagens, algumas variáveis estão diretamente ligadas à qualidade, das quais destaca-se o material e geometria da ferramenta; a matéria-prima que será objeto da usinagem e a forma da remoção do cavaco (Pinheiro, 2014).

Para Ferraresi (1970), o fresamento pode ser subdividido em dois tipos de acordo com a trajetória da ferramenta, podendo ser fresamento frontal ou fresamento tangencial. No fresamento chamado frontal a ferramenta está disposta perpendicularmente em relação à peça conforme indicação da figura 5, na qual é possível obter uma superfície plana, ou, então, replicando a geometria da ferramenta.

Enquanto o fresamento tangencial ou periférico é o processo no qual o eixo da ferramenta está posicionado paralelamente em relação à peça, em que os dentes ativos estão na superfície cilíndrica da ferramenta (STEMMER, 2005), conforme ilustrado na figura 5.

Figura 5 - Sentido de fresamento segundo a trajetória



Fonte: Adaptado W. Koenig, 2002

Onde:

$f_z$  = Avanço por dente;

$a_p$  = profundidade de corte;

$a_e$  = Penetração de trabalho.

Outra classificação do fresamento decorre do avanço e do sentido de movimentação da peça e do sentido de rotação da ferramenta (HIOKI, 2006) chamados de fresamento concordante ou discordante.

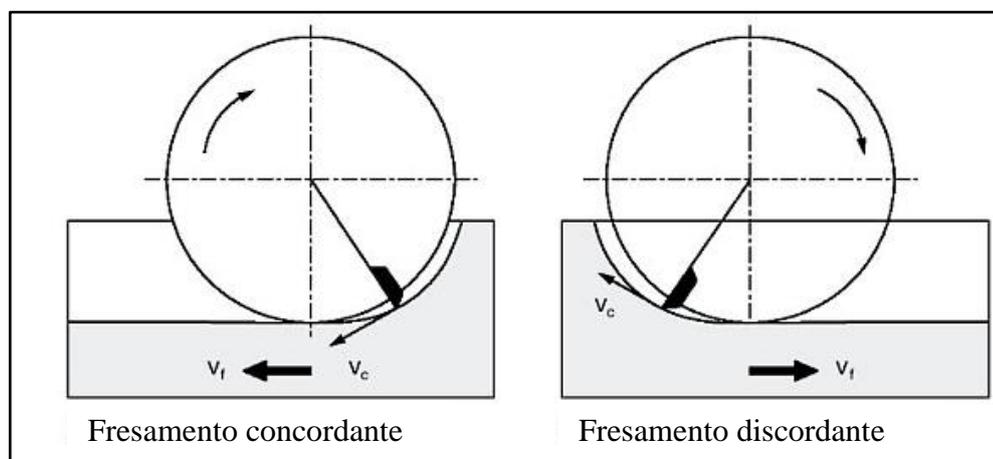
O fresamento concordante é descrito por Diniz *et al.* (2006) como sendo o processo em que a ferramenta e o sentido de movimentação da peça são equivalentes, ou seja, a peça está sempre sendo empurrada em direção da base. O corte nestas condições de usinagem se inicia com ângulo máximo até zero o que, via de regra, tem-se por uma condição prejudicial à vida útil da ferramenta.

O fresamento concordante apresenta condições desfavoráveis também quanto à qualidade superficial do material a ser usinado, quando este apresenta em sua superfície irregularidades, prejudicando a rugosidade superficial (Rossi *et al.* 2005).

O fresamento discordante é o oposto do concordante, ou seja, o sentido de rotação da ferramenta é contrário ao sentido de avanço da peça, a fresa exerce uma força tendendo a puxar a peça. O corte inicia com ângulo zero e termina com ângulo máximo. A força exercida é, então, capaz de romper o limite de ruptura do material, resultando em cavacos em forma de vírgula (DINIZ ET AL.,2006).

A figura 6 ilustra os possíveis sentidos de movimentação do fresamento, concordante e discordante:

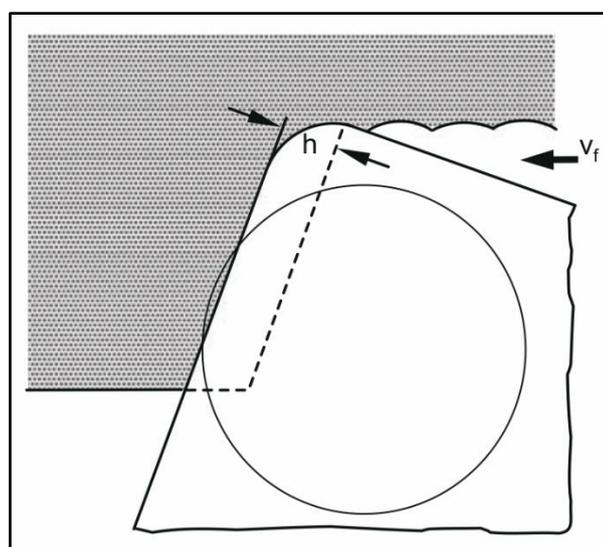
Figura 6 - Movimento e sentidos para os fresamentos concordante e discordante



Fonte: Adaptado W. Koenig, 2002

A ferramenta utilizada para o processo de corte, seja ele corte periférico ou corte de face, possui variáveis que irão determinar o resultado do acabamento, definindo o passo, a profundidade e a uniformidade das marcas de fresamento, conforme demonstrado na figura 7 (LEITZ LEXICON, 2022):

Figura 7 - Formação do acabamento e tamanhos de corte



Fonte: Adaptado de Klocke (2011)

Os parâmetros utilizados no processo de fresamento podem ser determinados utilizando as fórmulas a seguir:

- Velocidade de corte ( $V_c$ ) [m/s]:

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000 \cdot 60}$$

- Velocidade de avanço ( $V_f$ ) [m/min]:

$$V_f = \frac{f_z \cdot n \cdot Z}{1000}$$

- Avanço por dente ( $f_z$ ) [mm]:

$$f_z = \frac{V_f}{(n \cdot Z)} \cdot 1000$$

- Avanço por rotação ( $f$ ):

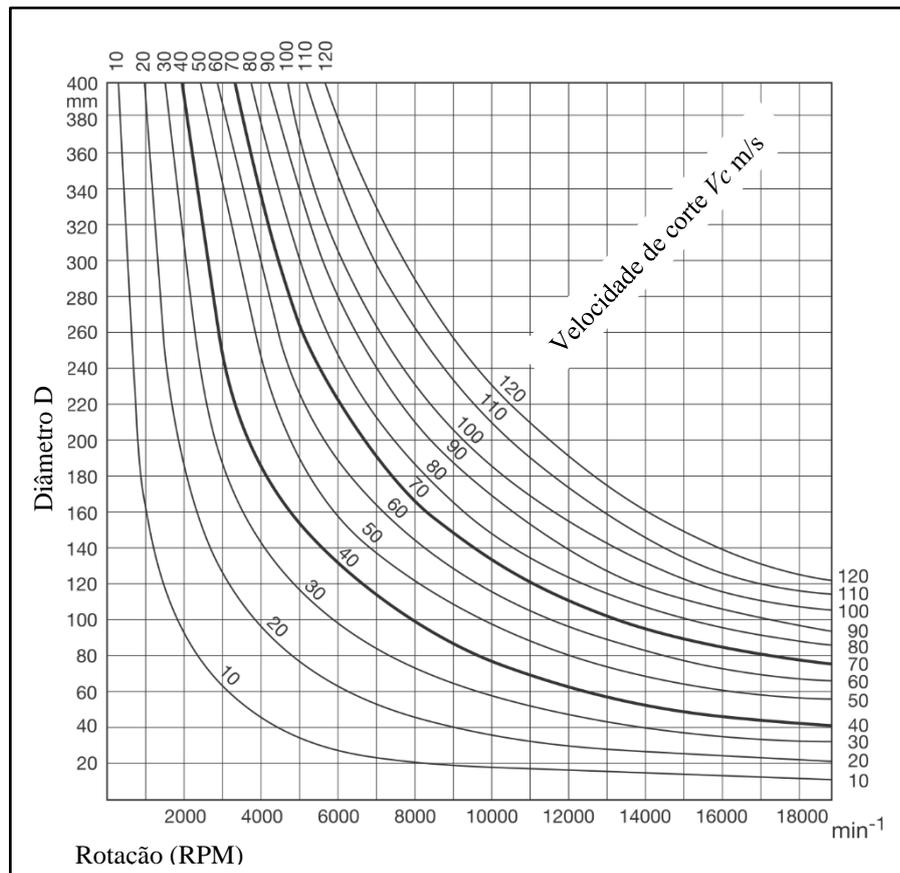
$$f = \frac{V_f}{n \cdot 1000}$$

- Comprimento da marca de corte ( $f_{z\text{eff}}$ ) [mm]:

$$f_{z\text{eff}} = \frac{V_f}{n \cdot 1000}$$

Outros parâmetros como a rotação ideal de trabalho podem ser obtidos através do gráfico da figura 8, elaborado por Leitz Lexicon (2022):

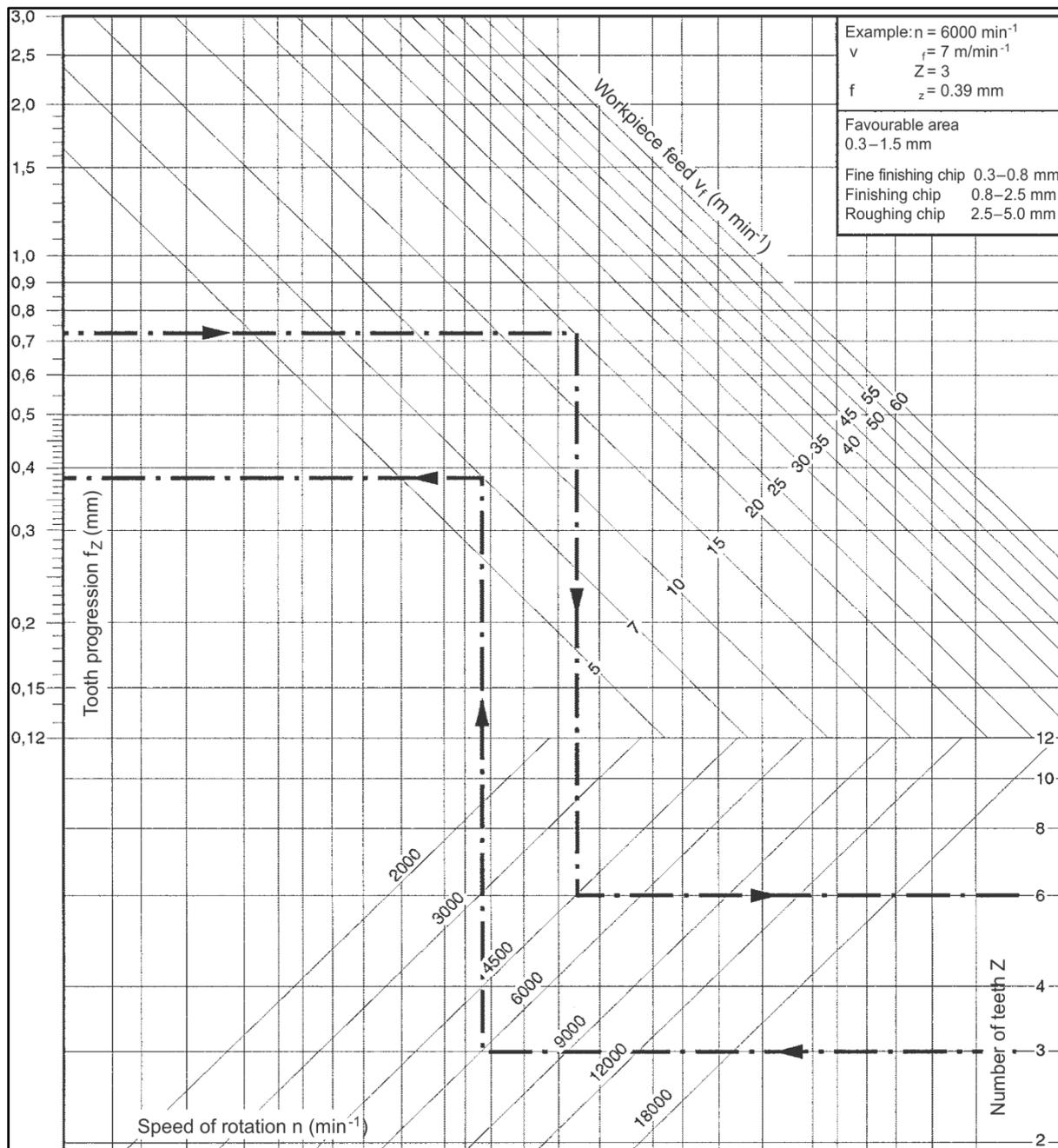
Figura 8 - Gráfico de velocidade de corte



Fonte: Leitz Lexicon (2022)

De outro ponto de vista, parâmetros como velocidade de avanço, avanço por dente e número de dentes podem ser determinados de acordo com o gráfico da figura 9, também de criação de Leitz Lexicon (2022):

Figura 9 - Gráfico de velocidade de avanço



Fonte: Fonte: Leitz Lexicon (2022)

A dimensão das marcas do corte são uma combinação do raio de corte, o número efetivo de dentes, velocidade de rotação da ferramenta e velocidade de avanço. Superfícies de alta qualidade têm marcas de corte com passo regular entre 1,3 e 1,7 mm. À medida que o

comprimento da marca de corte aumenta, a qualidade do acabamento se deteriora, em contrapartida, a vida útil da ferramenta aumenta (LEITZ-LEXICON, 2022).

### 2.2.1 Fresamento do MDF

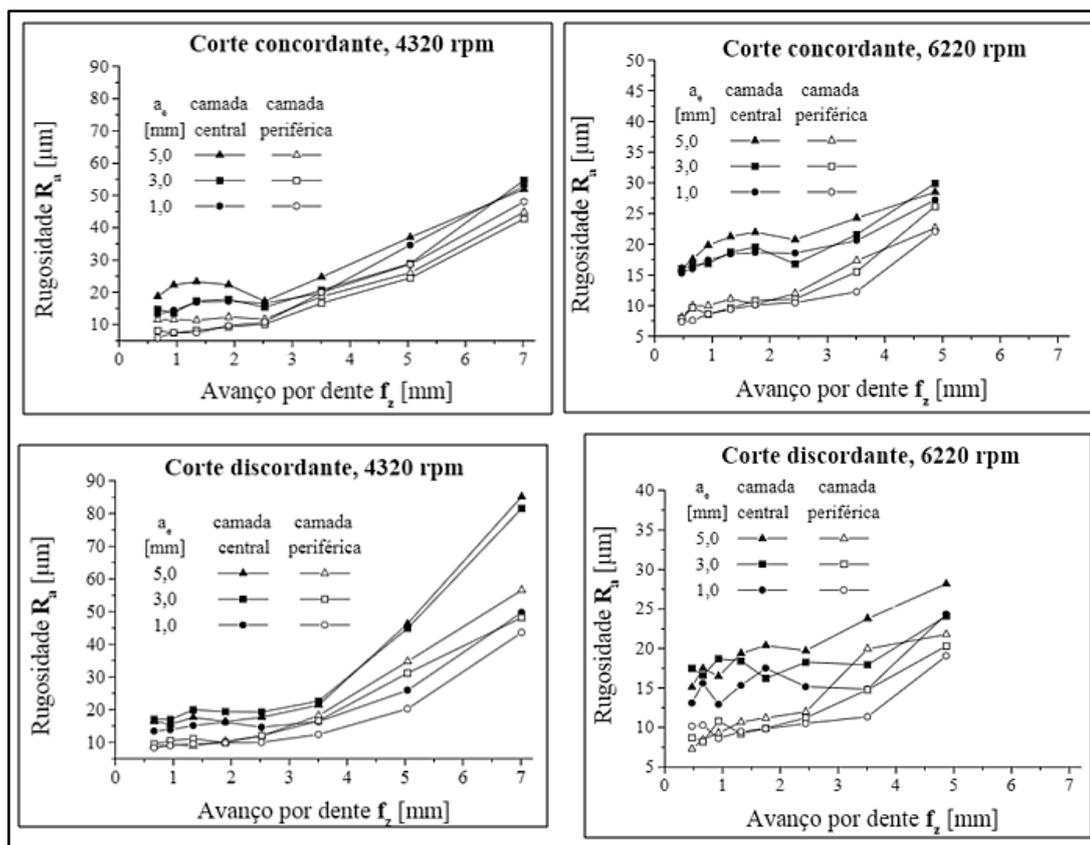
O MDF é composto de fibras, por conta disso, a direção de corte é um fator crucial no que diz respeito ao acabamento superficial (WILKOWSKI, 2013), tendo em vista que o deslocamento no sentido das fibras apresentaria um acabamento superior do que no sentido transversal.

A composição dos painéis em MDF, como qualquer outro material a ser usinado, pode reduzir a vida útil da ferramenta de usinagem, bem como danificá-la prejudicando a qualidade da usinagem e, até mesmo, a produtividade. Assim, é de extrema importância que as propriedades mecânicas da matéria-prima sejam conhecidas para que se obtenha um melhor desempenho (ZAMARIAN *ET AL.*, 2012).

Gonçalves (2002), em seu procedimento experimental para análise da qualidade superficial na usinagem por fresamento em MDF, adotou os seguintes fatores e variações:

- Sentido de corte: Concordante e Discordante;
- Rotação da ferramenta: 4320 e 6220 rpm;
- Espessura de corte ( $a_e$ ): 1.00, 3.00, 5.00 mm;
- Avanço por dente ( $F_z$ ): entre 0,67 a 7,01 mm;
- Camada de corte: Central e periférica.

Os resultados obtidos pelo autor podem ser expressos por gráficos contendo as variações descritas acima, conforme ilustrado na figura 10:

Figura 10 - Análise de rugosidade pelo fator avanço por dente  $f_z$ 

Fonte: adaptado de Gonçalves (2002)

Com o aumento de  $f_z$ , tem-se aumento da rugosidade. Se os valores de  $f_z$  estiverem superiores a 5 mm, o aumento da rugosidade é expressivamente maior, tal fato decorre do deslocamento das fibras do material.

À medida que a profundidade de corte se aproxima do centro do painel de MDF produz superfícies com acabamento inferior. A qualidade inferior é consequência da diferença de densidade entre as camadas.

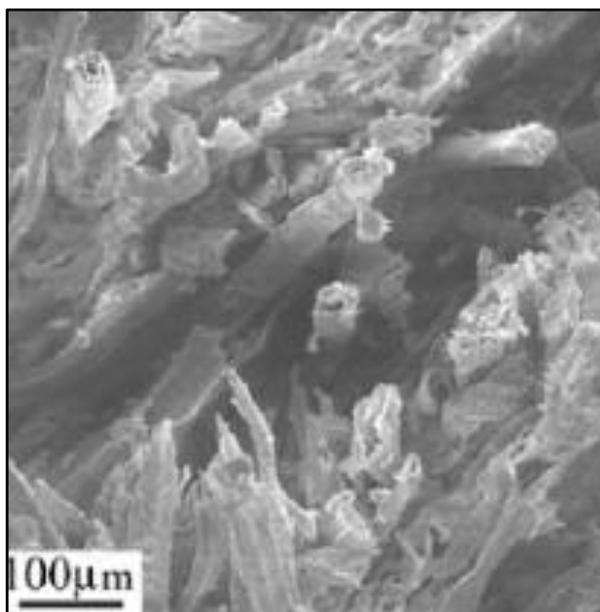
A espessura de corte também tem influência no resultado, pois, com larguras menores, obtém-se melhores acabamentos. Para Castro e Goncalves (2002, p. 410) “[...] no corte discordante do MDF a aresta de corte promove um maior controle sobre a superfície usinada por iniciar o percurso de corte neste plano, onde a espessura de corte  $a_e$  é mínima (cavaco em forme de vírgula)”. Este é o motivo pelo qual esse modo de usinagem se torna mais fácil e seguro operacionalmente e, conseqüentemente, mais difundido (CASTRO; GONÇALVES, 2002).

Pode-se concluir, de certo modo, que a forma pela qual o cavaco é removido influencia diretamente na qualidade da superfície do material usinado (DEUS ET AL., 2016).

No MDF, o fresamento em sentido discordante resulta em superfícies com menor rugosidade, o que, segundo Deus *Et Al.* (2016) a diferença pode chegar a 50% em relação ao fresamento concordante. Em contrapartida, o sentido discordante, apresenta maior consumo de energia empregado no processo de fresamento, resultando em um maior custo operacional agregado. (Pinheiro, 2014).

Castro e Gonçalves (2002) destacam a análise da superfície por meio da visualização utilizando um equipamento conhecido como microscópio eletrônico de varredura (MEV). Observa-se através deste método que o fresamento no sentido discordante com velocidade de avanço 30 m/min apresentou destacamento das fibras, conforme pode ser observado na figura 11.

Figura 11 - Análise MEV no fresamento concordante



Fonte: Castro e Gonçalves (2002)

O destacamento das fibras pode ocorrer no fresamento dos painéis em MDF, material este constituído por fibras compactadas e aglutinadas. Tal fenômeno apresenta maior tendência de ocorrer no fresamento com sentido concordante, devido a maior força aplicada pela ferramenta na remoção de material em forma de cavaco, segundo Priscila Roel de Deus (2015).

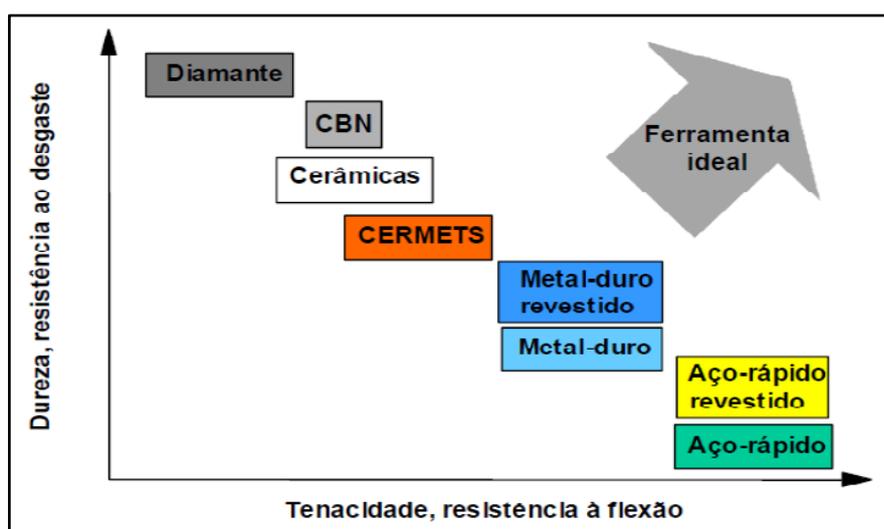
## 2.2.2 Ferramenta de corte

Para a realização dos cortes é necessário a utilização de uma ferramenta, sendo assim, trata-se de um item fundamental e indispensável para a realização da usinagem (MACHADO ET AL, 2011). As propriedades da ferramenta interferem diretamente no resultado.

Dentre as propriedades a dureza da ferramenta está entre um dos principais fatores. A dureza da ferramenta deve ser superior a peça a ser usinada para que se obtenha um resultado de qualidade. Outros fatores como resistência ao desgaste, resistência a compressão, resistência ao cisalhamento e tenacidade também são decisivos para o resultado. Portanto, o resultado está atrelado ao material utilizado na constituição da ferramenta em contraponto ao material que será alvo do processo de usinagem (DINIZ ET AL.,2006).

Para a usinagem em madeira, é necessário que a ferramenta seja constituída de um material capaz de resistir principalmente à abrasão. Já no MDF, devido a sua constituição em fibras e resinas, um dos principais aspectos a ser observado é o desgaste que tal material influi na ferramenta (STEMMER, 1995; GONÇALVES, 2000). Na Figura 12, abaixo, estão representados os materiais mais comuns para ferramentas, bem como suas propriedades:

Figura 12 - Gráfico para o material adequado para a ferramenta



Fonte: Adaptado de König (2002)

Dentre os materiais mais utilizados na indústria moveleira para usinagem em madeira está o Diamante. A popularidade desse material decorre da sua dureza elevada e da sua

expressiva resistência ao desgaste, proporcionando uma vida útil prolongada à ferramenta, qualidade no acabamento e grande controle dimensional (MACHADO *ET AL.*, 2011).

Machado *et al.* (2011) classifica os materiais para ferramentas como aço-carbono; aço semirrápido; aço rápido; aço super-rápido; ligas fundidas; metal duro, cermets, cerâmicas e ultraduros.

Os ultraduros são os que possuem dureza superior a 3.000 HV, que são:

- Diamantes naturais mono e policristalino;
- Diamante sintético monocristalino;
- Diamante sintético policristalino (PCD);
- Nitreto cúbico de boro (CBN);
- Nitreto cúbico de boro policristalino (PCBN);

Sendo o material de maior dureza e resistência ao desgaste, o diamante natural é utilizado quando se deseja obter acabamentos de qualidade na ordem de  $R_a = 25$  nm. No entanto, a sua alta resistência se contrapõe ao seu elevado custo e sua fragilidade. Com surgimento dos diamantes e cBNs sintéticos, que podem substituir o diamante natural e manter a eficiência, o diamante natural acaba perdendo espaço para estes materiais (CLARK E SEM, 1998).

Na década de 1970, os diamantes sintéticos entraram no mercado de ferramentas de corte, em que, tanto o PCD e o PcBN são utilizados para revestimento em metal duro, com camadas de 0,5 mm a 1,0 mm. Todavia, os diamantes sintéticos possuem limitações quanto a sua utilização em materiais ferrosos, pois, ao atingir temperaturas maiores que 780 °C, com a presença de oxigênio, corre-se o risco de voltar ao estado de grafite (MACHADO *ET AL.*, 2011).

Na indústria moveleira, na usinagem de madeira, os materiais mais comuns são os aços rápidos (HS), o metal duro (HW) e as ferramentas de diamante policristalino (PCD). As ferramentas de diamante policristalino levam vantagens sobre as demais no que diz respeito à resistência, abrasão e durabilidade (BIANCHI, 1996; FARIAS, 2000; BONDUELLE, 2001).

Para Gonçalves (2000), a dureza é uma propriedade mecânica que está ligada com a massa específica e com a densidade do material. Painéis de madeira com densidade relativamente baixa acabam apresentando superfícies com maior número de defeitos, devido ao deslocamento das células dos tecidos frágeis. Por outra via, a madeira com maior densidade

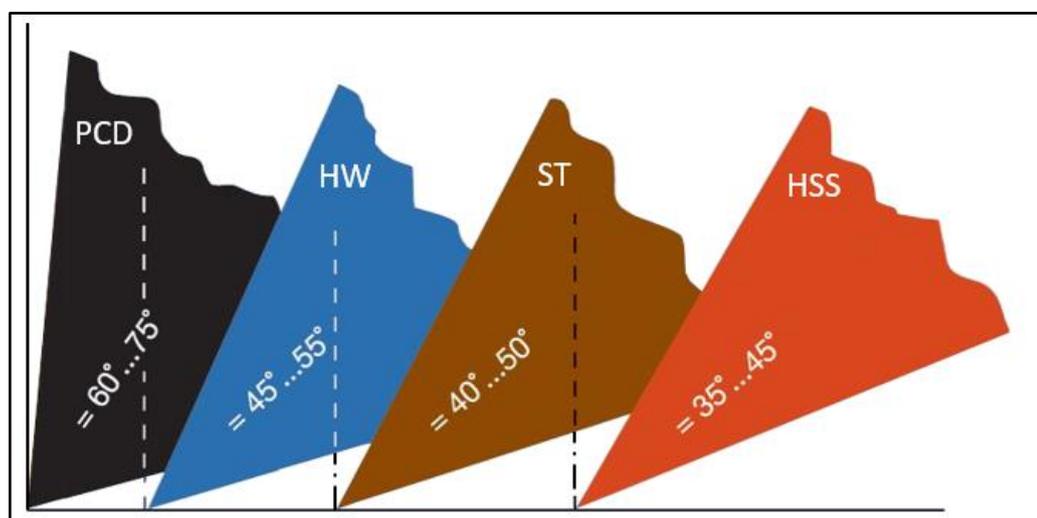
apresenta dificuldades em sua usinagem, proporcionando desgastes na ferramenta de corte devido a sua dureza e sua propriedade abrasiva.

Outro fator de suma importância no resultado é a geometria da ferramenta, segundo Machado *et. al* “A geometria da ferramenta de corte exerce grande influência no desempenho da usinagem. Por melhor que seja o material da ferramenta, se a sua geometria não for preparada adequadamente, não haverá êxito na operação.” (2011, p. 39).

Segundo Stemmer (2005), a quantidade de gumes cortantes da ferramenta depende de alguns fatores, como a forma e o tamanho da própria ferramenta, da potência de corte e da formação de cavaco. Cavacos curtos proporcionam uma ferramenta com maior número de dentes e menor espaço entre eles.

Devido a relação entre a dureza e tenacidade da ferramenta, existem ângulos de inclinação para a aresta cortante específicos para cada material utilizado na construção da ferramenta. Estes parâmetros são de suma importância para a obtenção de melhores desempenhos de corte. Para ferramentas em PCD, o ângulo de corte pode variar de 60° a 75° de inclinação. Demais materiais podem ser observados de acordo com a figura 13 (LEITZ Lexicon, 2022):

Figura 13 - Ângulo de corte para diferentes materiais



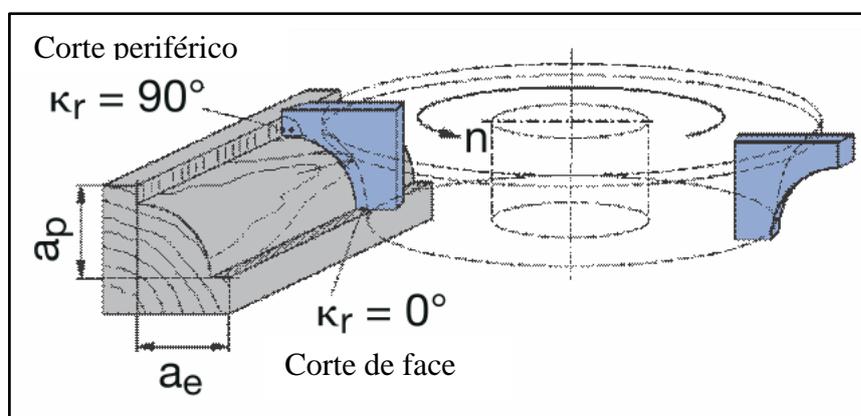
Fonte: Leitz Lexicon (2022)

Na usinagem em madeira ou produtos derivados deste material, a aresta de corte acaba sofrendo um desgaste abrasivo, bem como uma flexão e tensões de cisalhamento. Levando em consideração estes fenômenos presentes na usinagem do MDF, o PCD apresenta uma resistência à dureza e ao desgaste superior aos demais materiais utilizados em ferramentas

de corte no ramo moveleiro, por exemplo, o metal duro e HSS. No entanto, a tenacidade do PCD é um pouco menor do que a do metal duro, fato este que pode ser compensando com o aumento do ângulo de cunha (COOK M.W, 2023).

Em ferramentas de perfil, há uma combinação de corte periférico e de face, o que se tem por ideal nesse tipo de construção da ferramenta de corte, haja vista que tem por resultado uma suave transição na alteração entre o corte de face (paralelo ao material usinado) e o periférico (perpendicular ao material). O ângulo de corte  $\kappa_r$  do perfil pode variar na mesma ferramenta de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , conforme demonstrado na figura 14 (LEITZ-LEXICON, 2022):

Figura 14 - Ferramenta de perfil com usinagem periférica e de face



Fonte: Leitz Lexicon (2022)

### 2.2.3 Rugosidade no fresamento do MDF

Para Fracaro (2017) além de metas como tempos de produção, evolução de matérias-primas, ferramentas e máquinas, a qualidade na superfície também deve ser um objetivo no processo de usinagem.

Diversos são os fatores que podem influenciar na qualidade superficial, já que a remoção do material se dá por meio de cavacos, gerando calor, vibrações, tensões aplicadas tanto sobre a peça, quanto sobre a ferramenta e a máquina.

Machado *et al.* (2011) cita que a qualidade da superfície usinada é resultado de diversos fatores, podendo ser classificados em rugosidade, ondulações e falhas. Portanto, a meta a ser obtida deve ser prevista no momento do projeto. Para Machado *et al.* (2011), os fatores que devem ser considerados no projeto são:

- Grau de acoplamento entre componentes, como selos de mancais, elementos de vedação e moldes para injeção;

- Coeficiente de atrito, desgaste e lubrificação;
- Resistência à fadiga e à corrosão;
- Resistividade elétrica e térmica e contato;
- Processamento posterior, como pintura;
- Aparência;
- Custo.

Dos fatores listados por Machado *et al.* (2009), a aparência é uma das especificações que deve ser controlada durante o processo, fazendo-se necessário que haja uma definição de qualidade superficial ideal a ser atingida.

Na busca pela obtenção da qualidade almejada, a rugosidade é um dos pilares centrais.

Machado *et al.* (2009) define a rugosidade de uma superfície como sendo irregularidades micro geométricas, decorrentes do processo de corte. Fatores como marcas de avanço, aresta de corte, desgaste da ferramenta entre outros podem influenciar na qualidade superficial. Assim, a rugosidade se torna parâmetro de controle no processo.

Ferraresi (1970) classifica a rugosidade em transversal e longitudinal. As irregularidades transversais são apresentadas na direção do movimento de avanço da ferramenta, enquanto a rugosidade longitudinal se dá na direção de corte.

A responsável pela rugosidade superficial é a ferramenta, sendo que, quanto maior a distância entre os passos da ferramenta, maior será a distância entre os picos de rugosidade (FRACARO, 2017). Algumas normas definem a classificação e a medição da rugosidade, sendo elas: NBR ISO 4287 (ABNT, 2002) e NBR ISO 4288 (ABNT, 1996). Tais normas também apresentam critérios para amostra e medições.

A medição da rugosidade pode ser realizada por diferentes parâmetros, cada um deles com suas particularidades. No quadro 1 estão representados quais são esses parâmetros, bem como a forma de realização da medição:

Quadro 1 - Classificação de medições de Rugosidade

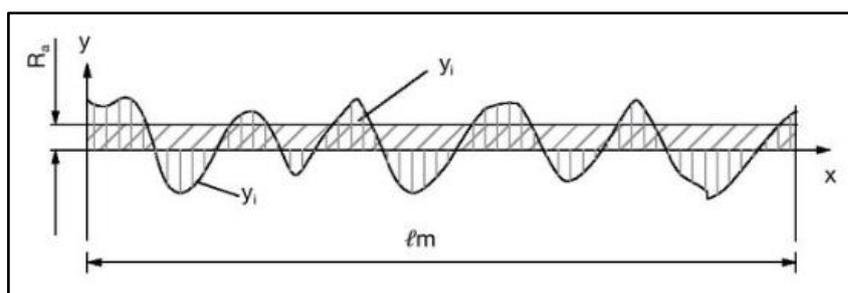
Símbolo	Nome	Definição
$R_a$	Desvio aritmético médio	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem.
$R_q$	Desvio médio quadrático	Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.
$R_t$	Altura total do perfil	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação.
$R_z^*$	Altura máxima do perfil	Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem
$R_{sk}$	Fator de assimetria do perfil (skewness)	Quociente entre o valor médio do valores das ordenadas e $R_q$ ao cubo, no comprimento de amostragem
$R_{ku}$		Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta potência e o valor de $R_q$ à quarta potência no comprimento de amostragem.
* A norma DIN define o parâmetro R como sendo a média das cinco alturas máximas detectadas em cada comprimento de amostragem.		

Fonte: Adaptado de Machado *et al.* 2009

Dos parâmetros citados no quadro acima, o mais utilizado na indústria como meio de controle da qualidade da superfície no processo é o  $R_a$ , uma vez que a alteração do seu valor indica alguma alteração no processo. Outro fator que influencia na escolha do  $R_a$  como parâmetro decorre do fato de o equipamento de medição ser relativamente simples de manuseio, segundo Machado *et al.* (2009).

Outro parâmetro utilizado é o  $R_q$  que, por sua vez, tem como foco principal identificar picos e vales isolados, auxiliando na identificação de defeitos ou marcas superficiais bem-acabadas, (MACHADO ET AL, 2009).

A figura 15 representa a forma de se calcular o valor de  $R_a$ , que se dá através da média dos picos e vales dentro do comprimento da amostragem  $l_m$ , conforme indicação da norma NBR ISSO 4288 (1996), (Fracaro (2017)).

Figura 15 - Gráfico ilustrativo para cálculo da média  $R_a$ 

Fonte: Adaptado de ABNT, 2002

A qualidade superficial após a usinagem no MDF pode afetar na qualidade do produto. Para que se obtenha a qualidade desejada, se faz necessário definir os parâmetros de qualidade, bem como realizar análise dos materiais.

Uma das formas de análise se dá por meio da medição de rugosidade. Com essa análise, é possível identificar possibilidades de melhorias nos padrões de processo que abarcam desde a velocidade de corte, avanço, geometria da ferramenta, entre outros e, com isso, se garantir a qualidade do produto.

O estudo realizado por Davim *et al.* (2009) concluiu que quanto maior a velocidade de rotação da ferramenta maiores são as taxas de remoção de material, associando isso uma superfície de menor rugosidade. Além de que a qualidade da superfície aumenta à medida que se aumenta a velocidade de avanço da ferramenta.

Outro ponto importante identificado pelo autor diz respeito à variação de densidade nas camadas dos painéis de MDF, em que foram observados que, à medida que se aumenta a profundidade de corte, se tem um aumento nas medições de rugosidade devido a menor taxa de densidade, quando mais interno ao painel. Davim *et al.* (2009) constata que velocidades elevadas resultam em melhores acabamentos no fresamento do MDF.

Para Bal e Akçakaya (2018), à medida que se tem aumento da velocidade de avanço, os valores de medição na rugosidade também sofrem aumento. O autor realizou estudo com velocidades de avanço de 3, 5 e 7 m/min, relatando os resultados obtidos. Os parâmetros de 3 e 5 m/min tiveram como resultados acabamentos bem próximos, já com a velocidade de avanço de 7 m/min, o acabamento perdeu qualidade significativamente, conforme pode ser observado na tabela 2, contendo os resultados:

Tabela 2 - Experimento prático alterando a velocidade de avanço

<b>Velocidade de avanço (m/min)</b>	<b>R<sub>a</sub> (μm)</b>
3,00	11,73
5,00	11,95
7,00	12,66

Fonte: Adaptado de Bal e Akçakaya (2018)

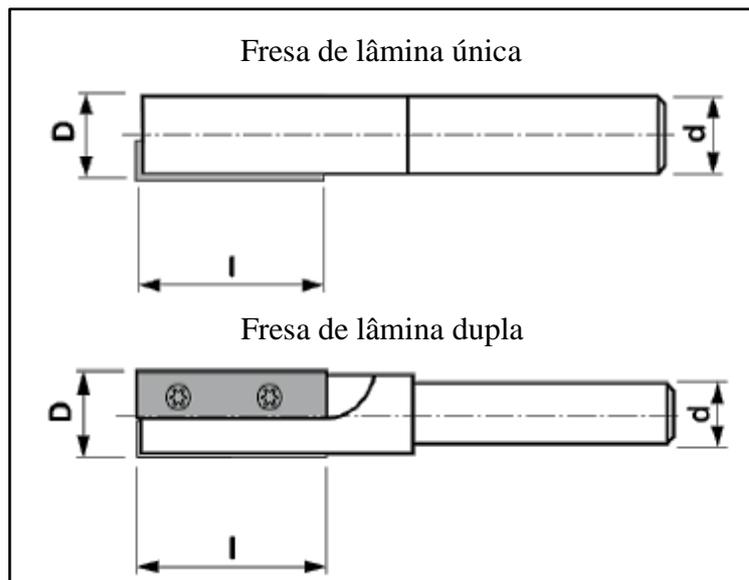
Para İşleyen e Karamanoğlu (2019), a qualidade da superfície da madeira é um aspecto de grande importância para aplicação de acabamentos posterior a usinagem, ressaltando que se faz necessário ter definido qual a qualidade ideal necessária. Não é possível realizar análises quando não se tem parâmetros definidos.

Além dos estudos envolvendo a matéria-prima e os parâmetros de processo, como taxa de avanço, rotação da ferramenta, taxa de remoção de material, entre outros, a geometria da ferramenta também deve ser observada. İşleyen e Karamanoğlu (2019) utilizaram ferramentas de diâmetros diferentes (4 mm e 6 mm) para a análise da qualidade de usinagem, além dos parâmetros de processo, constatando que a fresa com diâmetro de 6 mm apresentou aumento da temperatura, força de corte e aumento na vibração, produzindo acabamento inferior à ferramenta com diâmetro menor.

Salje *et al.*, (1985) observou que, dentre os pontos analisados, o avanço por dente apresenta maior influência em relação à rugosidade do que velocidade de corte e profundidade da usinagem. Esse fato foi evidenciado por Gonçalves (2002), em que o fator avanço por dente  $f_z$ , apresenta diferença significativa: quanto maior a grandeza pior o acabamento.

Para Kminiak *et al.* (2020), a qualidade da superfície é afetada, principalmente, pela ferramenta de corte. Em seu artigo, o autor investigou a diferença no acabamento utilizando duas composições de fresas. Na primeira composição, Kminiak *et al.* (2020) utilizou a ferramenta com apenas uma lâmina de corte e a segunda com duas lâminas de corte, conforme figura 16, ambas as fresas possuindo um diâmetro final de 16 mm:

Figura 16 - Fresa de Lâmina única, dupla Lâmina

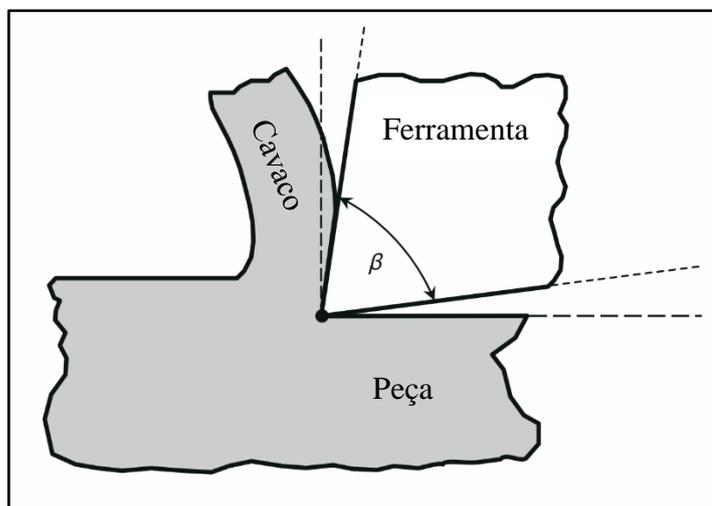


Fonte: Adaptado de Kminiak et al. (2020)

De acordo com os resultados obtidos através da medição da rugosidade, a primeira composição de lâmina única resultou em  $R_a$  de  $16,26 \mu\text{m}$ , já a ferramenta utilizando dupla lâmina apresentou uma diminuição do  $R_a$  para  $11,33 \mu\text{m}$ , ou seja, redução de, aproximadamente, 30%.

Um ponto crítico que influencia diretamente na qualidade da superfície é o desgaste da ferramenta. O desgaste da ferramenta é o deslocamento do gume de corte (VB), o qual está em contato com a peça retirando o material em forma de cavaco, conforme podemos observar na figura 17 (GOTTLOB,1996):

Figura 17 - Desgaste do gume de corte



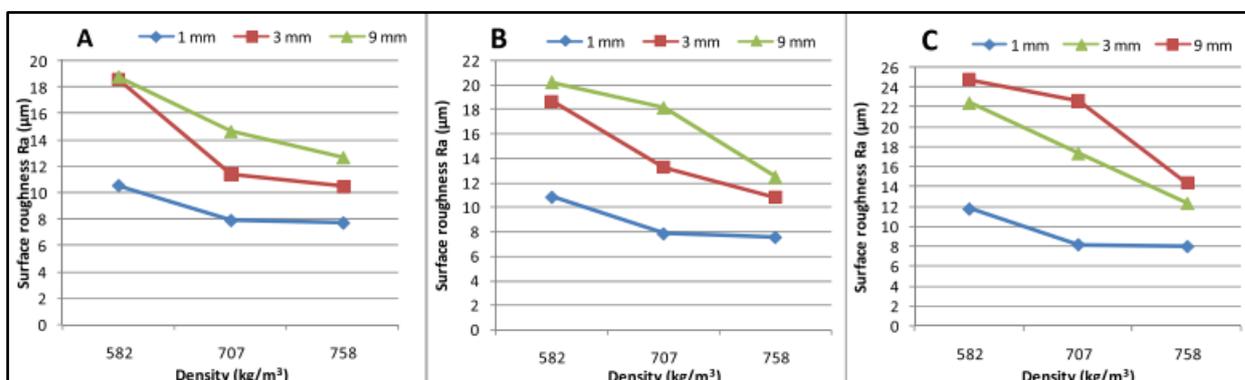
Fonte: Adaptado de Klocke (2011)

É de extrema importância o monitoramento dos desgastes nas ferramentas, a fim de manter a qualidade na usinagem e a redução de custos, já que a ferramenta com desgaste proporciona maior esforço nos motores (LEITZ, 2022). Com o corte, se acumulam nos gumes e ângulos de corte partículas de pó (cavacos) misturados com resina ou cola do próprio material usinado, tais resíduos acumulados podem obstruir as saídas de cavaco, interferindo no acabamento. Sendo assim, a limpeza periódica é um requisito básico para garantir a qualidade de corte e a durabilidade da ferramenta. O afiamento da ferramenta também deve ser observado e realizado quando a aresta do gume tiver um deslocamento superior a 0,2 mm.

Para Gottlob (1996), o desgaste no gume pode afetar a qualidade do corte e a qualidade da superfície, aumentar os custos de manutenção das ferramentas e o tempo de produção. O desgaste na ferramenta pode, ainda, acarretar o aumento da temperatura e vibrações. A vibração pode ser reduzida utilizando uma taxa de alimentação mais baixa, porém, como consequência a qualidade tende a piorar (KMINIAK *ET AL.*, 2020).

Para Bal e Gündes (2020), aspectos como densidade do material, teor de umidade e profundidade de corte têm participação direta no resultado. Os autores realizaram um estudo levando em consideração três classes de MDF, com variação de densidade entre eles de 582, 707 e 758 kg/m<sup>3</sup>. Os três materiais foram preparados e dimensionados quanto ao teor de umidade em 6, 9 e 12 %. No que diz respeito aos parâmetros de usinagem, foram mantidas as características para todas as variações, com velocidade de 8,00 rpm e com variações de profundidade de 1, 3 e 9 mm. A figura 18, abaixo, representa os resultados da medição de rugosidade obtidos pelo autor:

Figura 18 - Gráfico de resultados na medição da rugosidade



Fonte: Adaptado de Bal e Gündes (2020)

De acordo com os resultados obtidos, pode se constatar que a qualidade da superfície diminuiu com o aumento da profundidade, além disso, as cargas sobre a ferramenta aumentaram, gerando maiores vibrações e superfícies mais ásperas.

Resultados semelhantes foram obtidos por Bal e Akçakaya (2018), citando a diferença de densidade entre as camadas como sendo responsável pela diminuição do acabamento. Conforme pode se observar na tabela 3 para profundidades de 2 e 6 mm:

Tabela 3 - Experimento prático alterando profundidade de corte

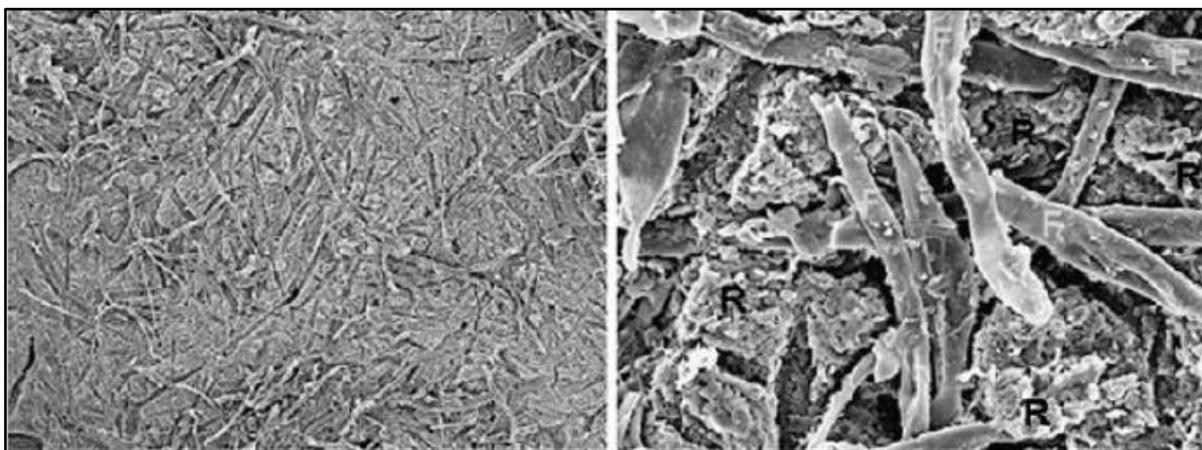
Profundidade (mm)	R <sub>a</sub> (μm)
2,00	10,46
6,00	13,77

Fonte: Adaptado de Bal e Akçakaya (2018)

Os estudos evidenciam que uma das propriedades mais significativas da superfície dos painéis derivados de madeira é a rugosidade. Os painéis de HDF (High Density Fiberboard) mostraram uma forte relação entre a sua densidade e os valores dos parâmetros de rugosidade. A densidade elevada produz acabamento homogêneo com menor número de defeitos, levando vantagem quanto a utilização do MDF. Superfícies com melhor acabamento necessitam de menor quantidade de material aplicado para seu acabamento (HENKE *ET AL.*, 2022).

Priscila Roel de Deus (2015) observou, em sua análise, que velocidades de cortes maiores apresentam fibras compactadas e com textura mais homogênea, enquanto velocidades de corte menores resultaram em fibras danificadas e fragmentadas. Resultados semelhantes foram obtidos por Davim *et al.* (2009), utilizando velocidade de corte de 1608 m/min, velocidade de avanço de 10 m/min e profundidade de 5 mm. O resultado obtido pelo autor pode ser observado na figura 19.

Figura 19 - Análise MEV para fresamento frontal em MDF



Fonte: Adaptado de Davim et al. (2009)

### 3 METODOLOGIA

Neste t3pico vislumbra-se definir e delimitar os materiais, objetos e possibilidades de an3lise para execu3o do estudo de caso proposto. Onde a an3lise da superf3cie no fresamento de pain3is de MDF foi efetivada por meio do emprego de m3todos e t3cnicas aliados a equipamentos espec3ficos.

Trata-se de uma pesquisa qualitativa, a qual possui par3metros definidos em normas t3cnicas que precisam ser respeitadas para que os resultados obtidos tenham legitimidade.

#### 3.1 MAT3RIA-PRIMA

Tem-se por mat3ria-prima do presente estudo os pain3is de MDF. A empresa *locus* utiliza tal material nos objetos por ela produzidos que necessitam de acabamento em sua superf3cie com aplica3o de pintura l3quida. Onde, para os corpos de prova, foi utilizado o m3todo comparativo de opera3o e usinagem por fresamento, entre duas composi3es de pain3is de aglomerados.

A primeira amostra foi composta pela mat3ria-prima utilizada atualmente pela empresa *locus*, j3 a segunda amostra foi composta por pain3is de MDF de maior densidade. As amostras utilizadas possu3am densidades com diferencia3o de 10% entre elas, conforme especifica3o na tabela 4.

Tabela 4 – Pain3is de aglomerado utilizados no experimento

Material	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
MDF Standard	680,00
MDF alta densidade	750,00

Fonte: Adaptado de Berneck (2022)

Os estudos da tem3tica apontam que a qualidade da usinagem est3 ligada diretamente com a densidade do MDF. Para Bal e G3ndes (2020), uma densidade maior resulta em um material mais compacto e com menor n3mero de defeitos em seu interior. Como consequ3ncia dessa premissa, espera-se que o MDF de alta densidade apresente uma rugosidade menor comparado com o MDF *Standard* que tem menor densidade.

A bibliografia indica algumas possibilidades, no entanto, para se chegar a uma conclus3o precisa quanto 3 rela3o entre a rugosidade e a qualidade do material, h3 que se

estabelecer parâmetros precisos e específicos de aferição e análise a serem aplicados ao objeto de estudo. Descrevem-se, nas próximas etapas deste trabalho, os dados de entrada e de saída aplicados.

### 3.2 PARÂMETROS APLICADOS – DADOS DE ENTRADA

A bibliografia aponta ampla série de fatores que interferem no acabamento da peça a ser usinada, como a quantidade de gumes de corte, de acordo com descrito por KMINIAK *ET AL.*, (2020), a diferente densidade entre as camadas dos painéis de MDF e os parâmetros empregados no processo de fresamento conforme relatado no estudo efetuado por GOLÇALVES, (2002).

Dentre os fatores de interferência disponíveis, foram selecionados dois, os quais acredita-se serem os que possuem melhor condição de responder aos objetivos propostos, sendo eles: a) a matéria-prima utilizada e b) os parâmetros utilizados no processo (velocidade de avanço e avanço por dente).

Para afunilar as análises e se aproximar do objetivo proposto, foram estabelecidos dados de entrada a serem aplicados em cada uma das análises, os quais estão detalhados na tabela 5. Vale salientar que, nos demais parâmetros, em especial a rotação da ferramenta, não houve variação mantendo-se 18.000 rpm para ambas as amostras, conseqüentemente, a velocidade de corte também foi mantida em 61,8 m/s.

Tabela 5 – Dados de entrada para a confecção das amostras

<b>Número da amostra</b>	<b>Material</b>	<b>Processo de fabricação</b>	<b>Velocidade de avanço (m/min)</b>	<b>Avanço por dente (mm)</b>
Amostra 1	MDF <i>Standard</i>	Fresamento	5	0,138
Amostra 2	MDF <i>Standard</i>	Fresamento	5	0,138
Amostra 3	MDF <i>Standard</i>	Fresamento e acabamento	5	0,138
Amostra 4	MDF <i>Standard</i>	Fresamento e acabamento	5	0,138
Amostra 5	MDF <i>Standard</i>	Fresamento	2	0,055
Amostra 6	MDF <i>Standard</i>	Fresamento	2	0,055
Amostra 7	MDF <i>Standard</i>	Fresamento	4	0,111
Amostra 8	MDF <i>Standard</i>	Fresamento	4	0,111
Amostra 9	MDF <i>Standard</i>	Fresamento	8	0,222
Amostra 10	MDF <i>Standard</i>	Fresamento	8	0,222
Amostra 11	MDF <i>Standard</i>	Fresamento	10	0,278
Amostra 12	MDF <i>Standard</i>	Fresamento	10	0,278
Amostra 13	MDF alta densidade	Fresamento	5	0,138
Amostra 14	MDF alta densidade	Fresamento	5	0,138

Fonte: O autor (2023)

Os parâmetros estabelecidos têm por objetivo serem aplicados na matéria-prima objeto de análise a qual passa-se a detalhar no tópico a seguir.

### 3.3 OBJETO DA ANÁLISE

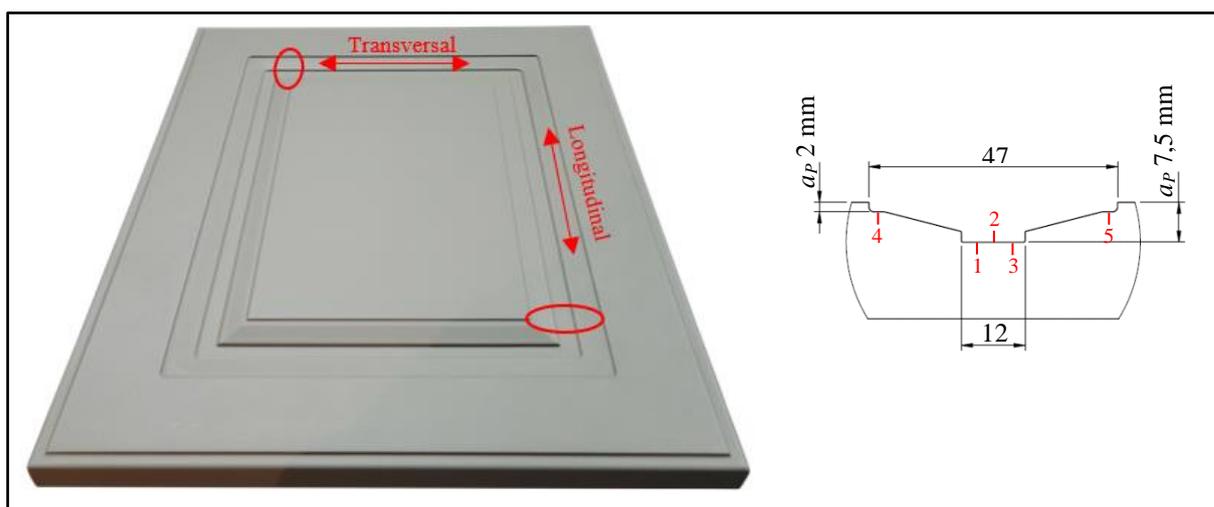
A BRS indústria de móveis, possui uma grande variedade de produtos que utilizam MDF como matéria-prima e passam pelo processo de fresamento e, posteriormente, aplicação de pintura líquida para acabamento.

Para esse estudo, foram selecionadas as portas e frentes de gavetas utilizadas em móveis residenciais internos como objeto de análise. O produto foi batizado com o nome de “Piazza” pela produtora.

As portas e frentes de gavetas “Piazza” possuem, além das usinagens tradicionais para montagem (furação para dobradiças, sistema de malhete e espiga para fixação no corpo da gaveta), fresamento em sua face com finalidade estética.

A figura 20, a seguir, demonstra o objeto de análise já com a aplicação do revestimento e pronto para a montagem.

Figura 20 – Objeto e pontos de análise



Fonte: O autor (2022)

Para a usinagem executada no processo de fresamento, utiliza-se uma fresa de perfil com pastilhas de diamante, reproduzindo desta forma, uma usinagem padrão, sem variações de profundidade e largura de corte. O padrão da ferramenta foi desenvolvido e definido pela

empresa BRS como um padrão para estes modelos de portas e frentes, levando em consideração a questão estética do produto.

Destacados, na figura 20, estão os pontos de análise para a medição da rugosidade. O ponto mais ao centro do objeto é considerado como “ponto crítico”, pois é a região que possui menor densidade, sendo esse o primeiro ponto de medição com uma profundidade de 7,5 mm. O segundo o ponto de medição se dá próximo à superfície do painel, ou seja, o ponto de maior rugosidade em relação ao primeiro e, possivelmente, de todo o objeto.

Analisando esses dois pontos de densidade distinta, é possível identificar a influência ou não da densidade do MDF na qualidade da superfície do objeto.

Cada amostra foi submetida à análise em cinco pontos, conforme destacados na imagem 20. Os pontos foram analisados em dois sentidos, transversal e longitudinal, tendo por objetivo avaliar, também, a influência da orientação das fibras na qualidade do objeto.

### 3.4 MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS

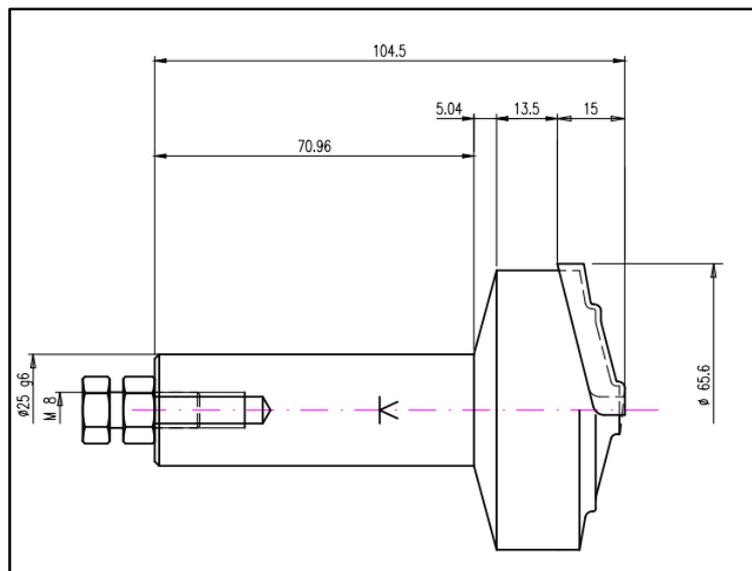
Para a realização das análises, se faz necessário o auxílio de ferramentas. Ferramentas são instrumentos nos quais os métodos serão aplicados em busca de avaliar a qualidade superficial no processo de usinagem de materiais compostos de madeira.

Dentre as possibilidades existentes, foram eleitos como centro de usinagem o HOMAG modelo Centateq P-300, como rugosímetro o MITUTOYO SJ-301 e a fresa de perfil definido, tendo em vista serem as ferramentas à disposição do autor.

#### 3.4.1 Ferramenta (fresa)

Para a realização do presente estudo foi necessária a utilização de uma fresa possuindo duas lâminas de corte parafusadas, em que as pastilhas revestidas em diamante têm o formato a ser reproduzido na peça. A ferramenta possui o diâmetro de 65,6 mm e é equipada com cone térmico para a sua fixação, conforme observado na figura 21 e na figura 22:

Figura 21 – Fresa com pastilhas revestidas de diamante



Fonte: O autor (2022)

Figura 22 – Foto da ferramenta com pastilhas revestidas de diamante



Fonte: O autor (2022)

A ferramenta possui a forma geométrica a ser reproduzida no material alvo da usinagem, com isso, tem-se otimização do tempo de usinagem, possibilitado realizar a usinagem do perfil de forma completa em apenas um movimento de avanço da ferramenta.

### 3.4.2 Centro de usinagem HOMAG

Para a realização da operação de usinagem por fresamento, foi utilizado o centro de usinagem HOMAG modelo Centateq P-300, tal equipamento pode ser observado na figura 23.

Figura 23 – Centro de Usinagem Centateq P-300



Fonte: Adaptado de Homag (2022)

Como principal característica do modelo escolhido, além das movimentações nos eixos tradicionais X, Y e Z, o equipamento possui movimentação de rotação do cabeçote, possuindo, desta forma, movimentação em cinco eixos. Esta característica possibilita a obtenção de geometrias que vão da mais simples a mais complexa.

Para o produto objeto deste trabalho, não serão utilizados todos os recursos oferecidos pelo centro de usinagem, uma vez que o fresamento se dá de forma periférica, necessitando apenas das movimentações nos eixos tradicionais X, Y e Z.

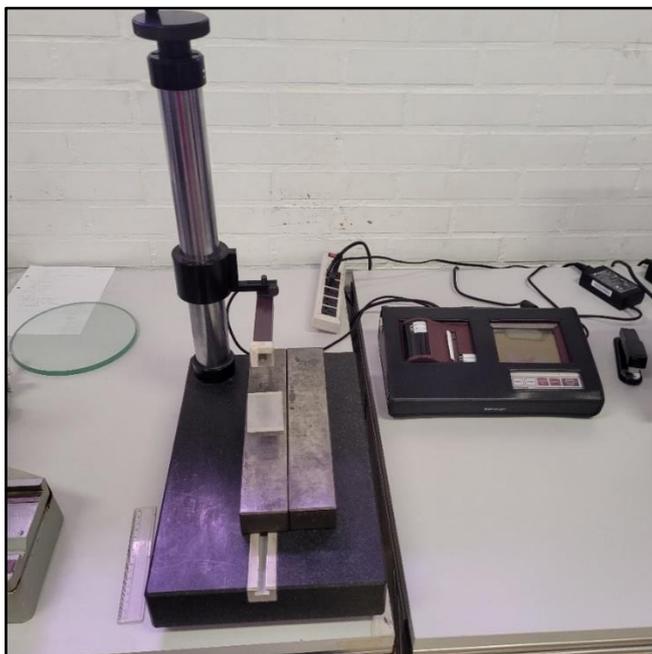
### 3.4.3 Rugosímetro

A avaliação da rugosidade foi realizada com a utilização do rugosímetro da figura 24, disponibilizado pela UCS, equipamento da marca MITUTOYO SJ-301.

O autor, com a finalidade de avaliar a rugosidade na usinagem do MDF, utilizou em seu estudo os mesmos parâmetros já utilizados por Priscila Roel de Deus (2015) no equipamento (rugosímetro), sendo eles: a) equipamento rugosímetro com uma haste de medição com ponta apalpadora de cone-esférico de diamante, com raio de ponta de 2  $\mu\text{m}$ ; b) Como parâmetros para medição, *Cut-off* 2,5 mm e comprimento de medição de 12,5 mm.

Tais configurações também foram utilizadas por Vinicius (2010) para a realização das medições de rugosidade. Com base nos trabalhos de referência dos autores citados, foram utilizadas as mesmas configurações para a realização dos perfis de usinagens nas amostras. Desta forma, sendo possível obter a rugosidade média Ra da superfície analisada como resultado.

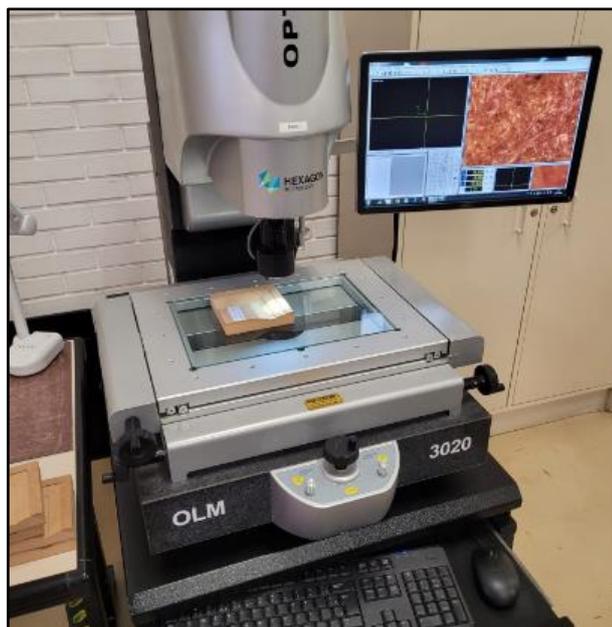
Figura 24 – Rugosímetro MITUTOYO SJ-301



Fonte: O autor (2022)

#### 3.4.4 Projetor de perfil

A avaliação da textura dos corpos de prova foi realizada no equipamento projetor de perfil *Hexagon – SVM3020*, da figura 25, disponibilizado pela UCS. Através do equipamento descrito, foram possíveis obter as imagens de textura da superfície usinada com aumento de 187 vezes de tamanho.

Figura 25 – Projetor de perfil *Hexagon SVM3020*

Fonte: O Autor (2022)

### 3.5 ANÁLISES COMPARATIVAS

A partir das amostras fabricadas aliadas às ferramentas disponíveis e à bibliografia referenciada é possível a realização de três análises comparativas, as quais são descritas a seguir:

I) Análise comparativa entre o processo de fresamento e fresamento com acabamento: essa forma de análise tem por objetivo definir e mensurar a rugosidade e a textura compatível com o acabamento de um objeto considerado de qualidade.

A análise foi realizada em corpos de prova que passaram pelo atual processo de fresamento (amostra 1 e 2) comparando-as com os corpos de prova que foram submetidos ao processo de lixamento (amostras 3 e 4).

A operação de lixamento tem por finalidade suavizar as imperfeições deixadas pelo processo de fresamento, resultando em uma superfície com qualidade apta para o revestimento em pintura líquida.

Os corpos de prova utilizados neste tópico de análise foram elaborados seguindo a metodologia utilizado pela empresa *locus*: *MDF standard* com uma densidade teórica de 680 kg/m<sup>3</sup>. O mesmo se aplica para os parâmetros utilizados durante o fresamento, que foram estabelecidos de acordo com a orientação do fornecedor da ferramenta de corte. A seguir, apresentam-se os parâmetros utilizados de forma esquematizada:

- a) Velocidade de avanço ( $V_f$ ): Utilizado 5 m /min
- b) Rotação da ferramenta ( $n$ ): Utilizado 18.000 Rpm
- c) Número de dentes da ferramenta ( $Z$ ): 2 dentes

Para se obter o Avanço por dente, será utilizada a fórmula:

$$f_z = \frac{V_f}{(n \cdot Z)} \cdot 1000$$

Logo, para a hipótese atual empregada, obtém-se um avanço por dente de 0,138 mm.

Conforme descrito anteriormente, dentre as variáveis que influenciam na qualidade superficial do objeto, duas delas se destacam: a densidade do painel de MDF e o avanço por dente. Para compararmos os resultados obtidos pelos autores descritos no capítulo anterior com os resultados obtidos neste trabalho, serão realizadas as seguintes análises comparativas entre os corpos de prova:

II) Densidade dos painéis em MDF: A densidade do MDF é um dos fatores que influenciam no acabamento, o material com maior densidade apresenta uma superfície com menor número de imperfeições. Assim, se propõe realizar um comparativo entre o material *Standard* (amostras 1 e 2) com densidade teórica de 680 kg/m<sup>3</sup> e material especial (amostras 13 e 14) com densidade teórica de 750 kg/m<sup>3</sup>. Para ambos os materiais, foram utilizados os mesmos parâmetros do processo de fresamento, ou seja, com  $f_z = 0,138$  mm.

III) Parâmetros de processo, avanço por dente: De acordo com os autores já citados, quanto menor o avanço por dente ( $f_z$ ) melhor o acabamento. Existem dois pontos que estão ligados a este parâmetro, as grandezas empregadas no processo, como rotação e velocidade de avanço, e a geometria da ferramenta, em que o número de gumes influencia neste quesito.

Propõe-se analisar a qualidade superficial atingida aplicando velocidades de avanço diferentes, sendo:

Amostras 1 e 2)  $V_f = 2$  m/min e  $f_z = 0,055$  mm

Amostras 5 e 6)  $V_f = 4$  m/min e  $f_z = 0,111$  mm

Amostras 7 e 8)  $V_f = 5$  m/min e  $f_z = 0,138$  mm

Amostras 9 e 10)  $V_f = 8$  m/min e  $f_z = 0,222$  mm

Amostras 11 e 12)  $V_f = 10$  m/min e  $f_z = 0,278$  mm

Para avaliação da influência da velocidade de avanço na qualidade superficial no processo de fresamento, foi utilizado o método estatístico da correlação de Pearson, correlacionando desta forma tal parâmetro de processo com o resultado obtido através da medição da rugosidade.

A correlação de Pearson foi desenvolvida por Karl Pearson, para Garson (2009), e é uma medida de associação bivariada do grau de relacionamento entre duas variáveis. O mesmo pode ser observado segundo Moore (2007), já que o autor afirma que a correlação mensura a direção e o grau da relação linear entre duas variáveis quantitativas. A fórmula utilizada para calcular o coeficiente de correlação de Pearson é a seguinte:

$$r = \frac{1}{n - 1} \sum \left( \frac{xi - \bar{X}}{sx} \right) \left( \frac{yi - \bar{Y}}{sy} \right)$$

Onde:

$n$ : quantidade de amostras;

$xi$ : o valor da coordenada  $x$ ;

$\bar{X}$ : média em  $x$ ;

$sx$ : desvio padrão em  $x$ ;

$yi$ : o valor da coordenada  $y$ ;

$\bar{Y}$ : média em  $y$ ;

$sy$ : desvio padrão em  $y$ .

Para Figueiredo (2009), duas variáveis estão associadas quando os resultados obtidos têm semelhança em sua distribuição, ou seja, elas podem se associar de acordo com a distribuição das frequências ou pelo compartilhamento de variância. Para a correlação de Pearson, vale o parâmetro de compartilhamento de variância, sendo ela uma medida da variância do compartilhamento entre duas variáveis, ou seja, há o aumento ou decréscimo de unidade na variável  $X$ , o que gera o mesmo impacto em  $Y$ .

O coeficiente de correlação de Pearson varia de -1 a 1, em que o sinal indica a direção positiva ou negativa do relacionamento e o valor sugere a relação entre duas variáveis. Sendo que os valores extremos 0 e 1 dificilmente são encontrados na prática, portanto, se faz necessário interpretar a magnitude do resultado. Para Cohen (1988), valores entre 0,10 e 0,29 são considerados fracos, valores entre 0,30 e 0,49 são considerados médios e valores entre 0,50 e 1 podem ser considerados fortes. Dancy e Reidy (2006) classificam de uma maneira um

pouco diferente, sendo valores de 0,10 a 0,30 como fracos, 0,40 a 0,69 valores médios e acima de 0,7 valores fortes.

Superadas as etapas de levantamento bibliográfico, nas quais puderam-se levantar os estudos sobre a temática já realizados, passou-se a eleger quais parâmetros apontados pela bibliografia seriam aplicados no presente trabalho. Os parâmetros foram delimitados e as análises realizadas, sendo assim, passam-se a descrever os resultados obtidos.

## 4 RESULTADOS DAS ANÁLISES COMPARATIVAS

No presente capítulo, são apresentados os resultados obtidos nos testes realizados experimentalmente com a aplicação da metodologia descrita bem como a análise dos resultados obtidos e a comparação entre eles.

### 4.1 ANÁLISE – FRESAMENTO X FRESAMENTO E ACABAMENTO

Neste tópico, são apresentados os resultados obtidos por meio do ensaio para os atuais processos de fabricação empregados na BRS indústria de móveis, tanto para o processo de fresamento, quanto para o posterior processo de lixamento nos painéis de MDF. Desta forma, foi possível mensurar a rugosidade entre ambas as situações. Definidas como amostra 1 e amostra 2 para os processos de fresamento e amostra 3 e amostra 4 para o processo de fresamento e lixamento.

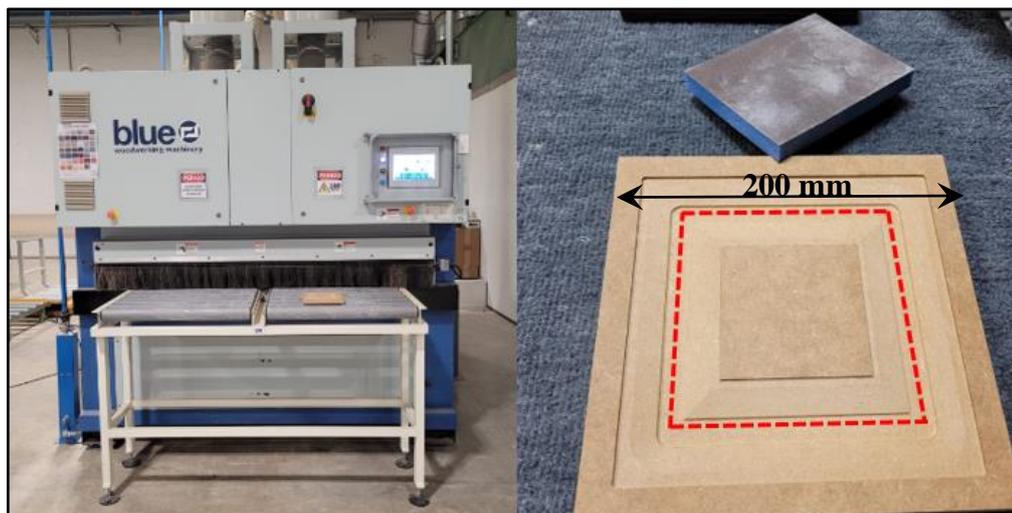
O atual processo de fabricação em produtos que utilizam como matéria-prima base o MDF conta com o processo de fresamento na face frontal com finalidade estética do produto. Utiliza-se uma fresa de perfil com pastilhas de diamante para que seja efetuada a retirada do material.

Para os parâmetros empregados no processo de fresamento, segue-se o indicativo do fornecedor da própria ferramenta. Segundo Leitz, para tal operação, com uma fresa de 65,6 mm de diâmetro, deve se utilizar uma velocidade de avanço de 5 m/min com rotação máxima de 18000 rpm caracterizando um avanço por dente de 0,138 mm.

Para atender o padrão de qualidade de acabamento, anteriormente ao processo de pintura líquida, os painéis já usinados passam por etapas de lixamento com a finalidade de melhorias na superfície para que, assim, possam prosseguir para as demais etapas de revestimento.

O processo de lixamento se dá em duas etapas, a primeira delas é executada em uma máquina específica capaz de lixar as camadas superficiais dos painéis, utilizando uma lixa cinta com grão 220 e lixa grão 280. Já na região próxima ao centro, devido às restrições do equipamento anterior, é realizada de forma manual utilizando uma lixa com grão 320 e lixa esponja grão 600, na região demarcada pela linha pontilhada em vermelho. Ambos os processos de lixamento podem ser observados na figura 26.

Figura 26 - Operações de lixamento



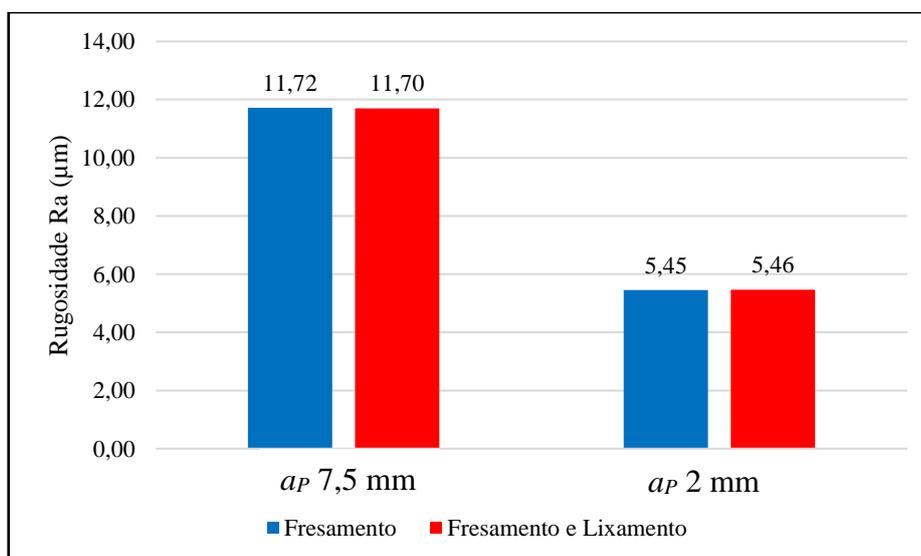
Fonte: O autor (2023)

Em primeira análise, a fim de mensurar qual a qualidade dos painéis em MDF para que possam receber o revestimento em pintura líquida, foram analisadas amostras que passaram pelos processos de fresamento e lixamento nas regiões usinadas.

Em paralelo, foram realizadas as medições de rugosidade e a análise de textura nas amostras que passaram apenas pelo processo de fresamento, desta forma, pôde-se comparar os resultados obtidos em ambas as situações.

Ambas as amostras produzidas utilizando os parâmetros de fresamento descritos anteriormente foram analisadas nos pontos informados no tópico 3.4 deste trabalho. Obteve-se os resultados mostrados na figura 27.

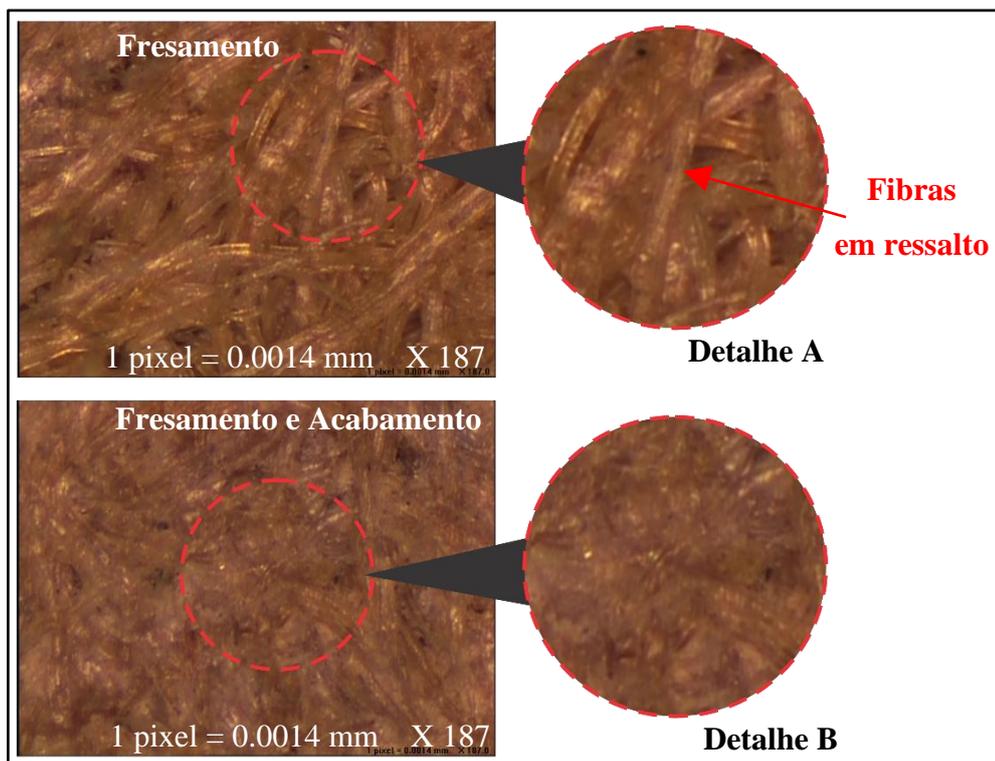
Figura 27 - Análise comparativa rugosidade: Fresamento x Fresamento e Lixamento



Fonte: O Autor (2023)

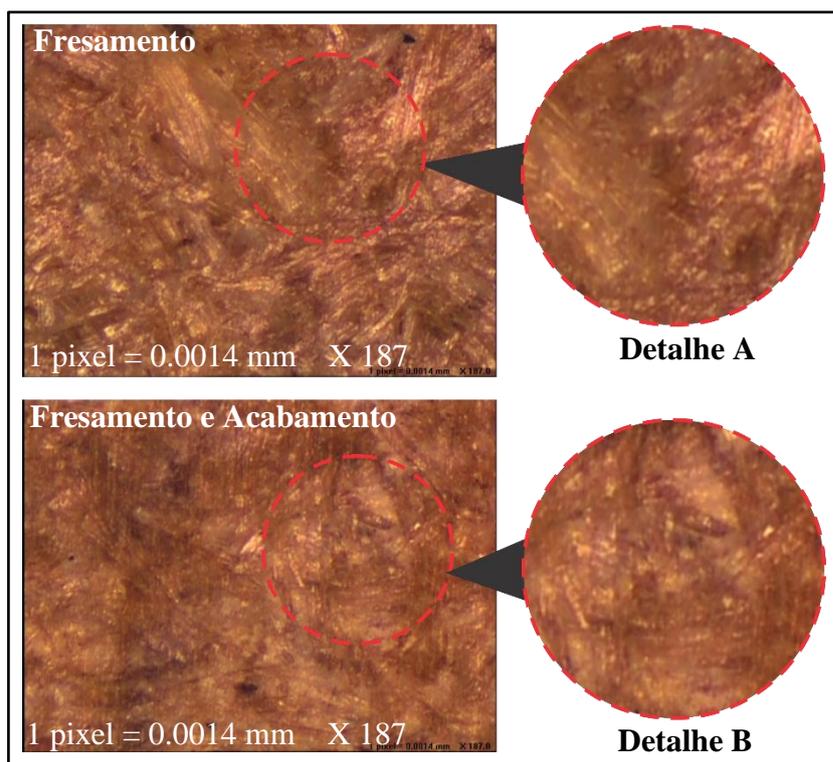
Submetendo as amostras à análise microscópica com aumento de 187 vezes e comparando os resultados obtidos em diferentes regiões, com profundidades de corte de 7,5 mm e 2 mm, pôde-se observar que o corte com menor profundidade produz um acabamento superior ao corte com maior profundidade, ou seja, com maior compactação e presença de fibras.

Figura 28 - Análise comparativa textura  $a_p$  7,5 mm: Fresamento x Fresamento e acabamento



Fonte: O Autor (2023)

Figura 29 - Análise comparativa textura  $a_p$  2 mm: Fresamento x Fresamento e acabamento



Fonte: O Autor (2023)

Os resultados nos mostram que a variação de densidade nos painéis em MDF tem grande influência no acabamento decorrente dos processos de usinagem. Por se tratar de uma região onde o material se torna mais homogêneo, a região com profundidade de corte 2 mm, apresenta um resultado mais satisfatório.

Comparando a textura com a região próxima à superfície entre as amostras de processos diferentes, é possível observar que, mesmo apresentando resultados para a rugosidade bem próximos, a amostra que foi submetida ao processo de lixamento apresentou uma textura mais uniforme se comparada com a amostra que passou apenas pelo fresamento. Sem a presença de fibras em resalto.

Já a região de maior profundidade de corte apresentou resultados inferiores em suas medições de rugosidade devido a menor densidade do material na região. Os resultados obtidos para os processos de fresamento e após o lixamento ficaram bem próximos, fato este que pode ser explicado pela forma de medição, já que a rugosidade  $R_a$  mostra uma média entre os pontos de medição.

Por meio da figura 28, é possível observar na imagem de textura com 187 vezes de aumento, no detalhe A, para as amostras que foram submetidas apenas ao processo de fresamento, a presença de fibras em resalto. Já para o detalhe B, das amostras que passaram

pelo processo de acabamento, a superfície apresenta uma menor incidência destas fibras em ressalto, indicando, desta forma, uma superfície lisa, com menor número de irregularidades.

Ainda, é possível observar na figura 28, em que o corte com 7,5 mm de profundidade, apresenta um emaranhado de fibras, principalmente no detalhe A, enquanto a região  $a_P$  2 mm, apresentada na figura 29, nos detalhes A e B, as fibras dos painéis estão envolvidas em uma camada da resina, material este que serve como liga na construção dos painéis de MDF.

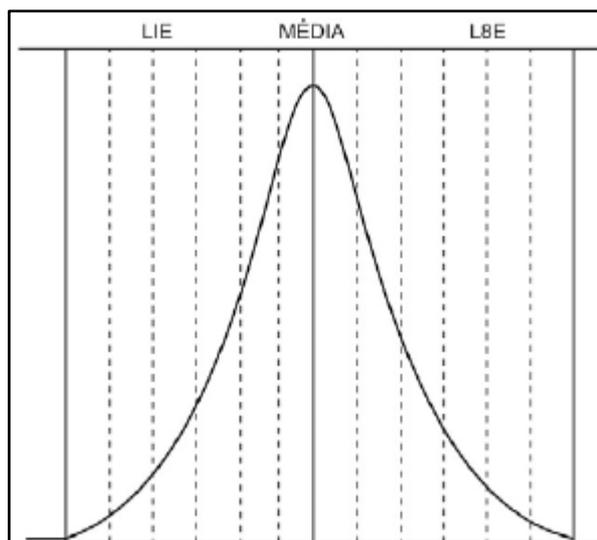
As duas amostras submetidas a mesma análise na região com profundidade de corte com 7,5 mm apresentaram distinções de texturas, porém, a mesma rugosidade, tanto após processo de fresamento e lixamento quanto após o processo apenas de fresamento.

Cada uma das medições para a rugosidade  $R_a$  na configuração aplicada com *cut-off* 2,5 mm e  $L$  de 12,5 mm são gerados aproximadamente 8330 pontos de medições, desta forma, levando em consideração todos os pontos de medições, é possível analisar o comportamento das diferentes amostras analisadas conforme disposto por Rodrigues (2014, p 01):

Em meados do século XIX, o matemático e físico alemão Carl Frederick Gauss, a partir de estudos sobre eventos ocorridos na natureza, concluiu que estes tendiam a um comportamento comum e que poderiam ser representados por uma curva em forma de sino, em um sistema de eixos cartesianos, que foi denominada “curva de Gauss”. A curva de Gauss (Figura 1.1) representou o conceito de probabilidade de ocorrência de um evento e, conseqüentemente, do conceito de variabilidade, ou seja, o grau de concentração dos dados em torno de um valor central ou valor esperado. Matematicamente essa variabilidade pode ser medida através do desvio padrão, que, simbolicamente, é representado pela letra grega sigma ( $\sigma$ ).

Ainda para Rodrigues (2014), a variabilidade é a oscilação em torno da média ou ponto ideal, ou seja, quanto maior a concentração dos pontos em torno da média, menor será a sua variabilidade. Da mesma forma, quanto menor a concentração dos pontos próximos a média, maior será a sua variabilidade, conforme ilustrado na figura 30. Variabilidade esta que pode ser representada pelo desvio padrão ou, então, pelo coeficiente de variação.

Figura 30 – Figura 1.1: Curva de sino para distribuição gaussiana

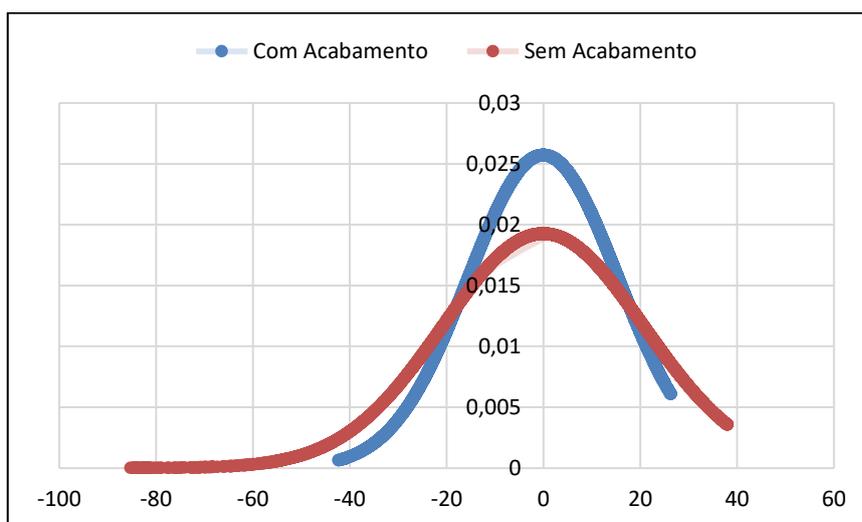


Fonte: Adaptado de Rodrigues (2014)

A amostra que passou pelo processo de fresamento e lixamento apresentou uma rugosidade média  $R_a$  de  $11,70 \mu\text{m}$ , enquanto a amostra submetida apenas pelo processo de fresamento apresentou um resultado de  $11,72 \mu\text{m}$ , ou seja, bastante similar.

A seguir, na figura 31, são demonstrados os resultados obtidos através da distribuição gaussiana para as amostras de diferentes processos, levando em conta o desvio padrão apresentado em cada um dos pontos para a mesma medição de rugosidade em cada uma das amostras.

Figura 31 - Distribuição gaussiana Fresamento X Fresamento + Acabamento



Fonte: O Autor (2023)

Graficamente, é possível observar que ambas as curvas possuem o ponto central em comum, ou seja, o resultado final para a média da rugosidade Ra bem próximas entre as amostras submetidas a diferentes processos.

A curva em destaque referente ao processo com acabamento, ou seja, submetida a fresamento e lixamento (em azul), os pontos obtidos na medição de Rugosidade apresentaram uma amplitude entre os pontos de medição menores e mais estáveis se comparada com a curva em vermelho submetida apenas ao processo de fresamento.

Analisando a curva de distribuição gaussiana, percebe-se que a curva em vermelho apresenta maior deslocamento horizontal, ou seja, uma variabilidade maior, onde cada um dos 8330 pontos de medição para a rugosidade obtidos através do rugosímetro apresenta uma dispersão maior.

Outro ponto evidente analisando a curva obtida para a amostra sem acabamento é que esta apresenta um deslocamento negativo e pontos mais dispersos. Com isso, é possível concluir que a amostra submetida ao processo de acabamento produziu uma superfície com uma qualidade superior, fato este que foi possível observar através das imagens de textura, disponíveis nas figuras 28 e 29 nos detalhes B.

#### 4.2 DENSIDADE DO MDF

De acordo com as análises bibliográficas levantadas, um dos principais fatores que influenciam na qualidade da usinagem nos painéis de MDF diz respeito à variação de densidade da matéria-prima, ou seja, quanto mais próximo ao centro do material, a tendência é que se tenha uma densidade menor do que se comparado com a superfície.

Visando avaliar este fenômeno e buscando minimizar tal influência foi elaborado, pelo fornecedor dos painéis de MDF, um material com uma densidade elevada. Neste se espera que próximo ao centro do material a densidade seja próxima à da superfície.

Os painéis elaborados de forma especial contam com uma densidade teórica de 750 kg/m<sup>3</sup>. Para a comprovação física deste valor, foram elaboradas amostras com as dimensões de 200x200x22 mm. Através da medição do peso das amostras utilizando uma balança de precisão, foi obtido um peso de 647,04 gramas.

Utilizando a fórmula da densidade a seguir, que relaciona o volume e peso, foi possível obter a densidade real da matéria-prima.

$$\rho = \frac{\text{massa}}{\text{volume}}$$

Com volume calculado de 0,00088 m<sup>3</sup> e massa de 0,64704 kg, obteve-se uma densidade de 735,27 kg/m<sup>3</sup>. Densidade que é cerca de 8 % superior, comparando com o MDF *standard* que possui uma densidade de 680 kg/m<sup>3</sup>.

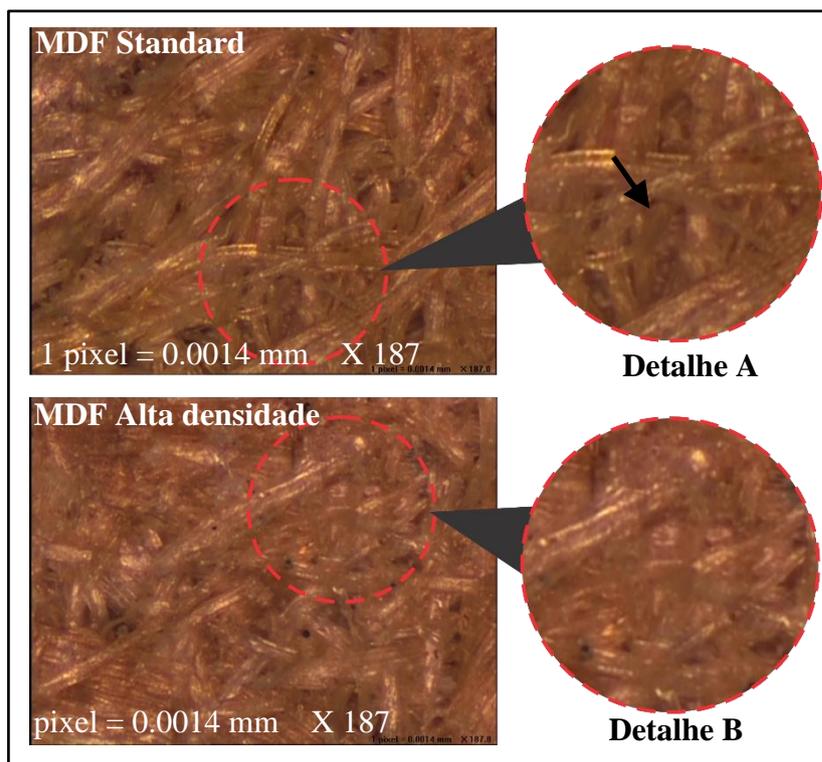
Para analisar e comparar os diferentes materiais, foram confeccionadas as amostras 1 e 2 utilizando o MDF *standard* e amostras 13 e 14 utilizando o MDF com alta densidade. Em todas as amostras, para o processo de fresamento, foram utilizados os parâmetros de rotação e velocidade de avanço atual empregados pela empresa, que são:  $V_f$  de 5 m/min e  $f_z$  de 0,138 mm. Os resultados obtidos através da medição de rugosidade podem ser observados na tabela 6.

Tabela 6 - Resultados da Rugosidade MDF *Standard* X MDF alta densidade

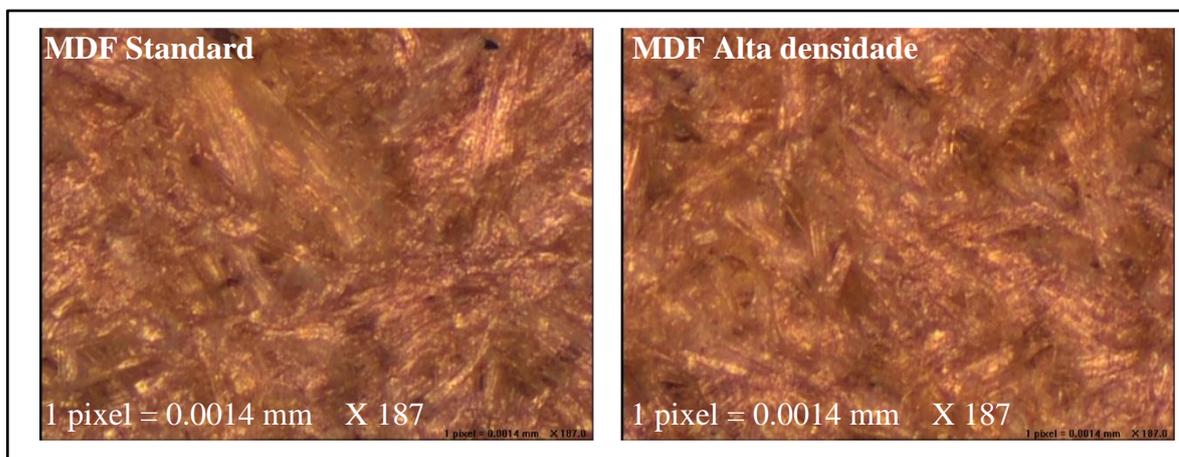
Material	Densidade Prática (Kg/m <sup>3</sup> )	Rugosidade (µm)	
		$a_p$ 2 mm	$a_p$ 7,5 mm
MDF <i>Standard</i>	680,00	5,45	11,72
MDF alta densidade	735,27	4,88	11,04

Fonte: O autor (2023)

Comparando os resultados obtidos através da média das medições de rugosidade, pode-se perceber que ambos os materiais apresentaram um resultado bem próximo, com uma melhoria de apenas 6,11% na região crítica e 11,59% de melhoria na região próxima à superfície. Porém, é possível observar, por meio do anexo A, que os resultados apresentados para o material com a densidade elevada se mantiveram constantes em comparação ao MDF *standard*, evidenciando uma maior compactação de material e produzindo, desta forma, uma superfície com menor número de defeitos, fato este que pode ser observado através das imagens a seguir:

Figura 32 – Análise comparativa textura  $a_p$  7,5 mm: MDF *Standard* X MDF Alta densidade

Fonte: O autor (2023)

Figura 33 - Análise comparativa textura  $a_p$  2 mm: MDF *Standard* X MDF Alta densidade

Fonte: O autor (2023)

Para a região próxima ao centro do material, com profundidade de fresamento de 7,5 mm, é notória a mudança de textura entre os materiais analisados, em que o MDF produzido de forma especial com maior densidade, destacado no detalhe B da figura 32, possui uma maior compactação, ou seja, a presença de maior quantidade de fibras nesta região. Apresenta, desta forma, menor espaçamento entre si, produzindo uma superfície com menor número de defeitos

se comparado com o MDF *standard*, destacado também na figura 32, detalhe A, onde é possível observar o espaçamento presente entre o emaranhado de fibras em destaque.

Já para o corte próximo à superfície com profundidade de corte de 2 mm, da figura 33, não foram notadas mudanças significativas em comparação com a textura do MDF *Standard*, visto que esta região já possuía uma maior compactação e grande presença da resina utilizada no processo de fabricação dos próprios painéis de fibras. O mesmo foi observado por Gonçalves (2002), através das análises por meio de MEV. O autor observou que a camada periférica dos painéis de MDF apresentam maior teor de resina, sendo facilmente visualizado através de “placas” de resina. Ele, ainda, ressalta que os resultados obtidos em comparação entre a camada periférica e a camada central chega a 100 %, sendo a camada periférica a responsável por apresentar uma superfície com menor rugosidade.

#### 4.3 PARÂMETROS EMPREGADOS NO PROCESSO DE FRESAMENTO

Conforme observado por Gonçalves (2002), à medida que se tem um aumento no parâmetro avanço por dente, empregado no processo de fresamento do MDF, têm-se resultados elevados para a rugosidade. O mesmo fenômeno foi observado por Bal e Akçakaya (2018), em que foram avaliadas as velocidades de avanço de 3, 5 e 7 m/min, constatando que para a maior velocidade utilizada, os resultados obtidos foram inferiores.

Visto isto, a fim de avaliar os parâmetros empregados no processo de fresamento, foram confeccionadas amostras com cinco variações de velocidades de avanço, 2, 4, 5, 8 e 10 m/min. Para o experimento, todas as amostras foram fabricadas utilizando a ferramenta de perfil com pastilhas de diamante com 2 gumes de corte, e utilizada a máxima rotação: 18000 rpm. A seguir, são apresentados os parâmetros avanço por dente correspondente para cada uma das velocidades de avanço avaliadas:

Amostras 1 e 2)  $V_f = 2 \text{ m/min}$  e  $fZ = 0,055 \text{ mm/dente}$

Amostras 5 e 6)  $V_f = 4 \text{ m/min}$  e  $fZ = 0,111 \text{ mm/dente}$

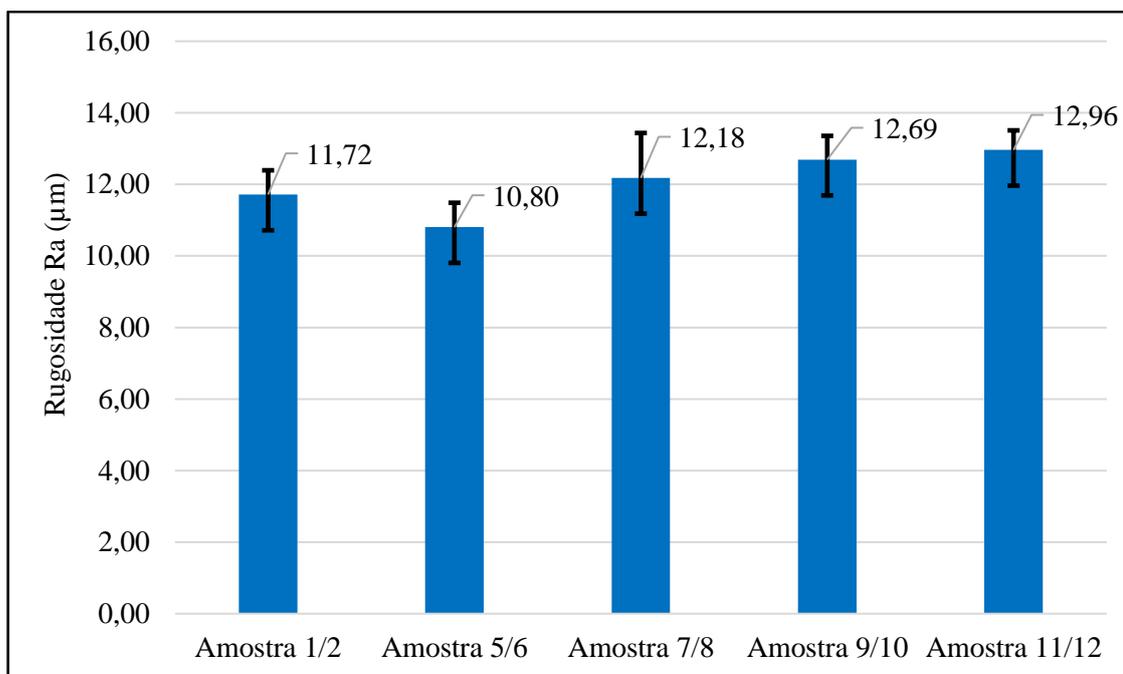
Amostras 7 e 8)  $V_f = 5 \text{ m/min}$  e  $fZ = 0,138 \text{ mm/dente}$

Amostras 9 e 10)  $V_f = 8 \text{ m/min}$  e  $fZ = 0,222 \text{ mm/dente}$

Amostras 11 e 12)  $V_f = 10 \text{ m/min}$  e  $fZ = 0,278 \text{ mm/dente}$

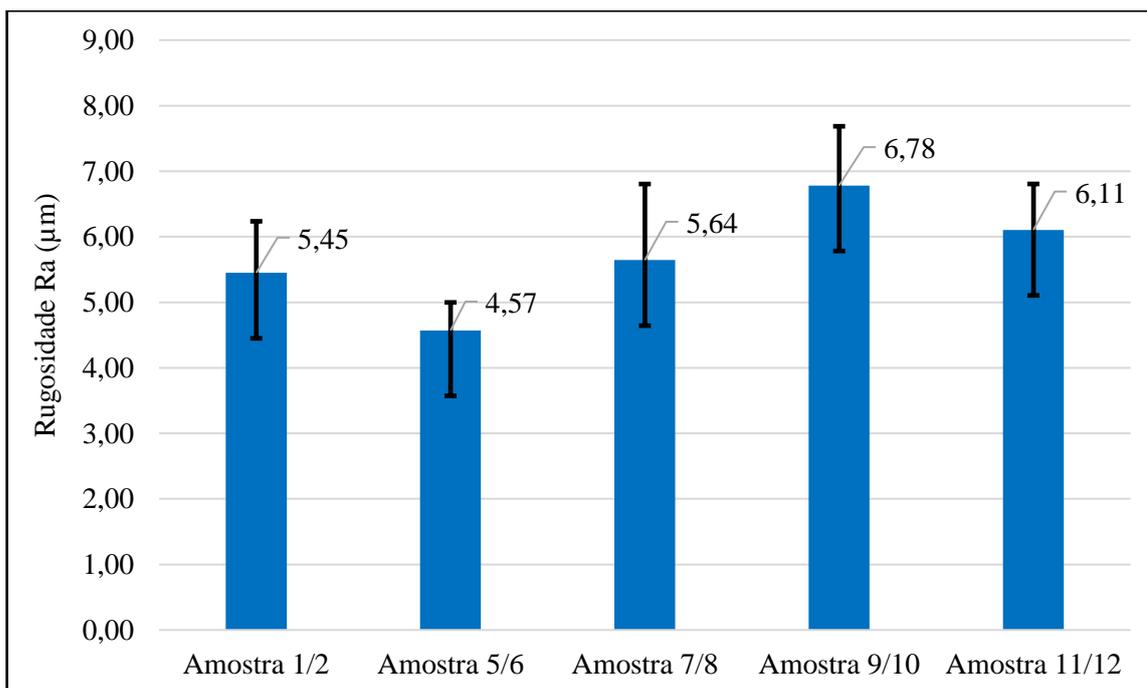
Nos gráficos que seguem, das figuras 34 e 35 para as profundidades de corte de 7,5 mm e 2 mm, respectivamente, são apresentados os resultados obtidos para a média e desvio padrão na medição da rugosidade dos corpos de prova.

Figura 34 - Gráfico rugosidade parâmetro avanço por dente para  $a_p$  7,5 mm



Fonte: O autor (2023)

Figura 35 - Gráfico rugosidade parâmetro avanço por dente para  $a_p$  2 mm



Fonte: O autor (2023)

Os resultados obtidos para a menor velocidade de avanço se mostraram significativamente melhores quando comparado com os demais. Segundo Castro e Gonçalves (2002), isso ocorre, pois, altas velocidades de avanço acarretam destacamento das fibras de MDF.

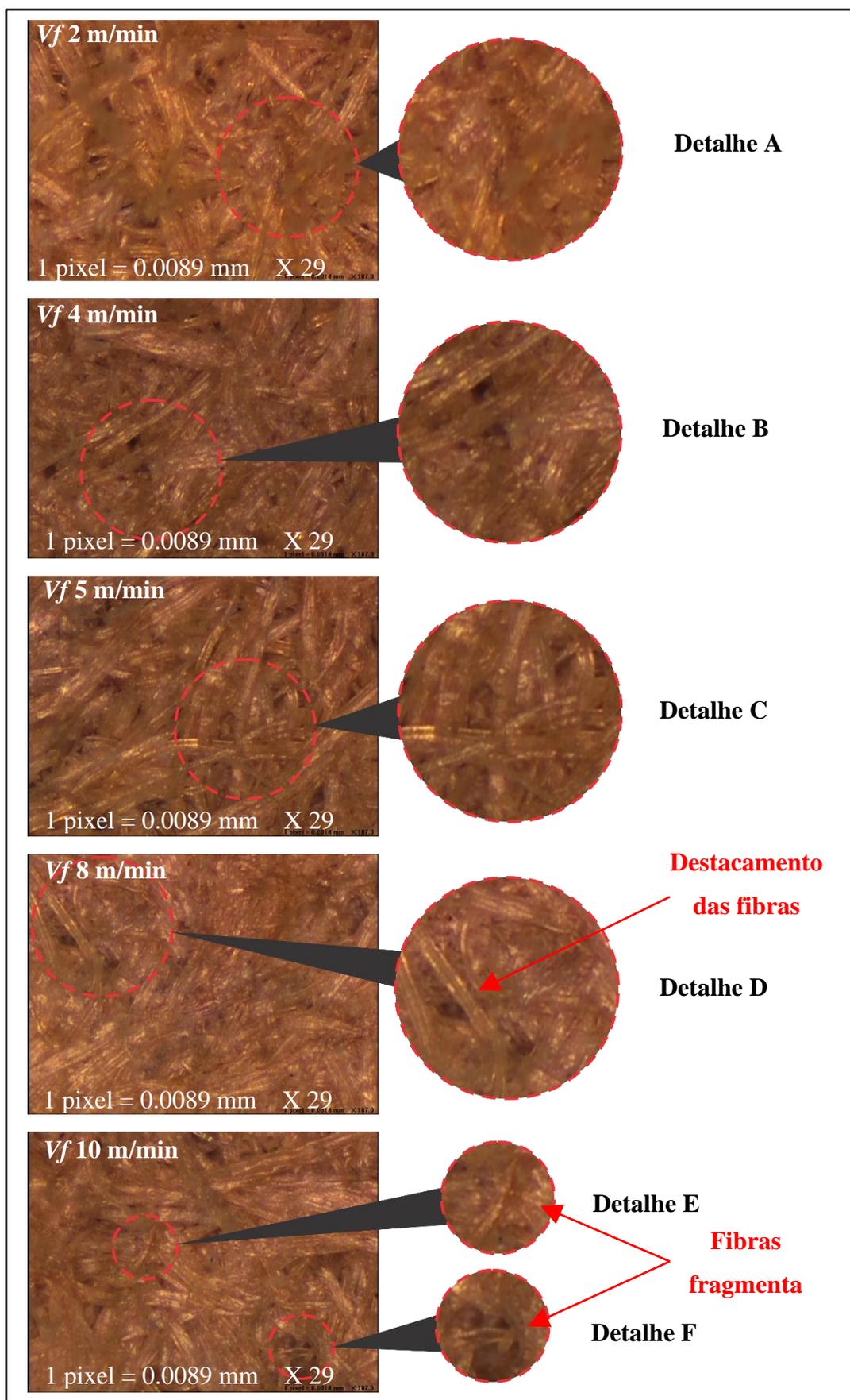
O resultado final para as amostras 7 e 8 com avanço por dente de 0,111 apresentou uma média para a rugosidade superior às amostras 1 e 2 com avanço por dente de 0,138, contradizendo que, quanto maior o fator avanço por dente, mais elevada a rugosidade. O anexo A contém a relação total das medições realizadas.

Uma das medições realizadas para a mostras 7 e 8 acabou apresentando resultado acima dos demais para a mesma configuração de parâmetros de processo, demonstrando uma possível falha no MDF na região de medição, ou seja, uma menor compactação ou possível destacamento das fibras, elevando desta forma a média da rugosidade. Não foi localizada na bibliografia base do presente trabalho outro motivo que justificasse tal fato.

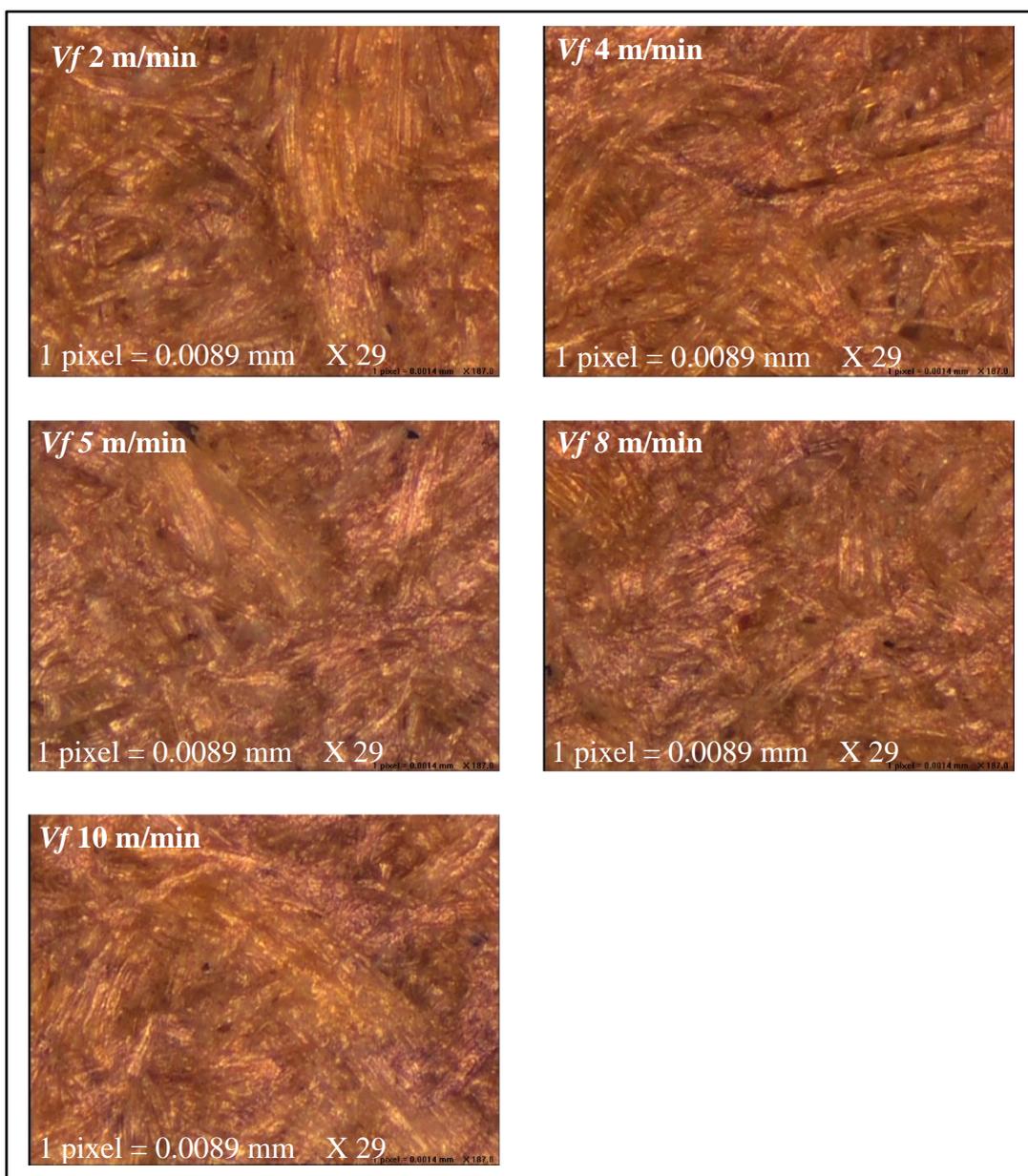
É possível observar na figura 36, nos detalhes A, B, C e D a seguir, a mudança na textura na região central do material para os diferentes parâmetros de processo aplicados no fresamento.

As amostras evidenciam o destacamento das fibras do MDF em maiores velocidades de avanço, fato já observado por Salje *et al.*, (1985) e Gonçalves (2002) em seus estudos. Nos detalhes E e F, ainda da figura 36, é possível observar a presença de fibras fragmentadas em torno da superfície do MDF quando aplicada a velocidade de avanço de 10 m/min. Na região próxima à superfície da figura 37, não foram observados tais fenômenos (destacamento e fragmentação das fibras), o que pode decorrer da presença de uma maior quantidade de resina.

Por tanto, existem uma gama de fatores que exercem influência na qualidade da superfície gerada através do processo de fresamento, inclusive a própria variação na velocidade de corte ao longo do gume (Klocke, 2011).

Figura 36 – Análise de textura: Parâmetros de processo,  $a_P$  7,5 mm.

Fonte: O autor (2023)

Figura 37 - Análise de textura: Parâmetros de processo,  $aP$  2 mm.

Fonte: O autor (2023)

Para avaliar a influência dos parâmetros empregados no processo de fresamento com os resultados obtidos, pode ser utilizada a correlação de Pearson, desta forma, sendo possível analisar e entender o quanto este parâmetro influencia no resultado da superfície.

Desta forma, calculando o coeficiente da correlação de Pearson para as amostras envolvendo os parâmetros empregados no processo de fresamento, variando a velocidade de avanço em 2, 4, 5, 8 e 10 m/min, obteve-se para a região central com profundidade de corte de 7,5 mm um coeficiente de 0,92 e para a região próxima à superfície, com profundidade de corte de 2 mm, o coeficiente de 0,83.

Embora Cohen (1988) e Dancey e Reidy (2006) classifiquem de formas diferentes o coeficiente de Pearson, em ambos as diferentes profundidades de corte e o coeficiente encontrado representam uma forte interação entre os parâmetros de processos utilizados nas amostras com o resultado de rugosidade, ou seja, pode-se afirmar que a variação na velocidade de avanço apresenta diferentes resultados para a qualidade da superfície.

Com os resultados obtidos para a rugosidade, textura e correlação de Pearson, é evidente a influência dos parâmetros empregados no fresamento, ou seja, quanto menor a velocidade de avanço, melhores acabamentos são obtidos. O mesmo fenômeno foi observado por Gonçalves (2002) avaliando a qualidade do fresamento de painéis em MDF variando o avanço por dente de 2,5 mm até 10 mm, em que foi constatado que, a partir do avanço por dente de 5 mm, os resultados para a rugosidade e análise de textura de microscopia eletrônica de varredura mostraram a ocorrência de destacamento de blocos de fibras.

## 5 CONCLUSÃO

A proposta do presente estudo emergiu de um *gap* identificado na empresa BRS. Essa lacuna de processo identificada resulta na necessidade de que as peças produzidas passem por um processo de lixamento após o processo de fresamento. Nessa premissa buscou-se compreender e evidenciar os fenômenos que ocorrem durante o processo de fresamento dos painéis em MDF. Para concretizar os objetivos propostos, foi realizada uma análise bibliográfica com o intuito de identificar os fatores determinantes e as possíveis variáveis. O objeto de análise foram as portas de MDF fabricadas pela BRS.

O primeiro experimento foi a verificação de processos. Ao analisar as amostras submetidas ao processo de acabamento e comparando com as amostras que foram apenas usinadas, os resultados obtidos para a rugosidade foram semelhantes entre ambas as amostras, porém, ao analisar a qualidade da superfície pelo tato, e até mesmo pelas imagens de textura, há diferença entre elas, já que após o processo de acabamento se tem uma superfície com aspecto mais liso.

Percebeu-se, assim, que as operações de lixamento executadas posteriormente ao processo de fresamento não podem ser completamente eliminadas, visto que têm como finalidade, além de uniformizar a superfície, reduzir o aspecto áspero decorrente da formação do material.

Analisando tanto a rugosidade como textura do mesmo objeto fabricado com materiais de densidade distinta, ficou evidente a influência da densidade dos painéis em MDF em torno de suas camadas, visto que, em todas as amostras analisadas, a camada próxima à superfície com profundidade de corte de 2 mm, apresentou um resultado significativamente superior ao corte próximo ao centro com profundidade de corte de 7,5 mm, produzindo, desta forma, uma superfície com melhor acabamento.

Por meio das análises visuais de textura, foi possível observar que a superfície do MDF apresenta uma maior compactação, onde as fibras estão envoltas da resina utilizada no processo de fabricação da matéria-prima, enquanto a camada central apresenta um emaranhado das próprias fibras, fato este que pode facilitar o fenômeno de destacamento e fragmentação das fibras.

Analisando os resultados obtidos para o material fabricado de forma especial com a densidade elevada, foram encontrados melhores resultados tanto para a rugosidade, quanto para a textura, em que a rugosidade apresentou uma redução de 6,15 % na região crítica com profundidade de corte de 7,5 mm e 11,6% na região próxima à superfície. Todavia, ao

analisarmos a superfície, a mudança de textura mais notória se dá na região de maior profundidade, onde se observa uma maior quantidade e compactação de fibras comparando os materiais distintos.

A bibliografia aponta que o fator avanço por dente influencia diretamente no resultado final, tal fato pode ser comprovado no presente estudo, no qual foi observado que, quanto menor o fator avanço por dente, há melhores resultados na qualidade do produto. Para elevadas velocidades de avanço, obteve-se uma superfície com maior número de defeitos, possivelmente, pelo destacamento das fibras do MDF. Isso ocorreu principalmente na região central, já que, na região de superfície, tais fibras estão envoltas da resina utilizada na fabricação dos próprios painéis.

A análise da correlação de Pearson indica que os parâmetros de processo influenciam fortemente no resultado final. No presente estudo, envolvendo o processo de fresamento, foram desconsideradas as análises quanto ao sentido de corte, discordante e concordante, visto que as medições foram realizadas na região central do gume de corte, onde o sentido de corte tem influência praticamente nula.

Desta forma, pode-se concluir que é possível implementar melhorias que resultariam em ganho significativo em termos de qualidade da superfície. Reduzindo a velocidade de avanço para 2 m/min e utilizando o MDF de alta densidade. Entretanto, deve se levar em consideração a manufatura, visto que com menor avanço por dente, ou seja, menor velocidade de avanço, o tempo de processo envolvendo o centro de usinagem seria elevado, bem como a utilização do MDF com densidade elevada, visto que este material apresenta um custo maior que o utilizado atualmente.

## **6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

Com o objetivo de ampliar os conhecimentos nos processos de usinagem, na indústria moveleira, são elencadas a seguir, sugestões para trabalhos futuros.

- Avaliar a geometria da ferramenta de corte, alterando a quantidade de gumes de corte;
- Alteração do produto, utilizando a técnica de prensagem de painel com espessura 6 mm, desta forma a região de corte possui uma maior densidade;
- Avaliar os efeitos da umidade;
- Estender a análise levando em consideração a questão de custos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA. **Programa setorial da qualidade de painéis de partículas de madeira (MDP) e painéis de fibras de madeira (MDF)**, 2013. Disponível em: <<http://www.abipa.org.br>>. Acesso em: 13 de set. 2022.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15316-2: Chapas de fibras de média densidade. Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

ASSIS, Cristiano Prado. Estudo comparativo entre MDF e MDP utilizados na indústria moveleira. 2013.

BAL, Bekir Cihad; AKÇAKAYA, Elif. *The effects of step over, feed rate and finish depth on the surface roughness of fiberboard processed with CNC machine*. **Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi**, v. 1, n. 2, p. 86-93, 2018.

BAL, Bekir Cihad; GÜNDEŞ, Zeynep. *Surface roughness of medium-density fiberboard processed with CNC machine*. **Measurement**, v. 153, p. 107421, 2020.

COOK, M. W.; FLEMING, M. A. O USO DO PCD NA INDÚSTRIA DA MADEIRA. 2023.

BERNECK: Painel de Fibra de Média Densidade. Painel de Fibra de Média Densidade. 2022. Disponível em: <https://www.berneck.com.br/products/mdf-berneck>. Acesso em: 11 nov. 2022.

BIANCHI, Kleber Eduardo. Concepção de uma máquina CNC para medição e usinagem de peças de madeira. 1996. Dissertação. Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, UFSC, Florianópolis.

BIAZUS, André; HORA, André Barros da; LEITE, Bruno Gomes Pereira. Panorama de mercado: painéis de madeira. **BNDES Setorial**, n. 32, set. 2010, p. 49-89, 2010.

BONDUELLE, Arnaud. Usinagem, qualidade e custo. Curso de Engenharia Industrial Madeireira e do Programa de Pós-graduação em Eng. Florestal, UFPR, Curitiba, 2001.

BONTEMPO: Nossa história. Nossa história. 2022. Disponível em: <https://www.bontempo.com.br/site/a-bontempo/nossa-historia>. Acesso em: 11 nov. 2022.

CASTRO, E. M.; GONÇALVES, M. T. T. Estudo do acabamento superficial em chapas MDF usinadas em processo de fresamento. **MADEIRA: arquitetura e engenharia**, Ano 3, n.8, 2002.

COHEN, Jacob. (1988), *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Hillsdale, NJ, Erlbaum

DANCEY, Christine & REIDY, John. (2006), *Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows*. Porto Alegre, Artmed.

DAVIM, J. P. CLEMENTE, V.C. SILVA, S. *Surface Roughness Aspects In Milling MDF (Medium Density Fibreboard)*. **Int J Adv Manuf Technol** 40:49–55. 2009.

DEUS, P. R.; ALVES, M. C. S.; BILESKY, Luciano Rossi. The influence of cutting speed on concordant and discordant tangential milling of MDF. **MMSE J**, v. 6, p. 65-69, 2016.

DEUS, Priscila Roel de. Análise do processo de fresamento de MDF em centro de usinagem CNC. 2015.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. Tecnologia da usinagem dos materiais. 5.ed. São Paulo: Artliber, 2006.

ELEOTÉRIO, J. R. **Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes densidades e teores de resina**. 122 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeira) Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

FARIAS, Marzely Gorges. As questões ambientais e o processo de fresamento em alta velocidade de madeiras de floresta plantada *eucalyptus grandis* e *eucalyptus dunnii*. 2000. Tese (Doutorado) - Programa de pós-graduação em engenharia mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

FERRARESI, D. **Fundamento Da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 751p.

FIGUEIREDO FILHO, Dalson Britto; SILVA JÚNIOR, José Alexandre. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, v. 18, n. 1, p. 115-146, 2009. FERRARESI, Dino. Usinagem dos metais. São Paulo: E. Blücher, c1970. 3 v.

FRACARO, Janaina. Fabricação pelo processo de usinagem e meios de controle. Curitiba: Intersaberes 1º edição, 2017.

GARSON, G. David. (2009), *Statnotes: Topics in Multivariate Analysis*. Disponível em: <http://faculty.chass.ncsu.edu/garson/PA765/statnote.htm>

GONÇALVES, M. T. T. **Processamento da madeira**. 1.ed. Bauru-SP: [s.n.], 2000.

GOTTLOB, W. J. Determinação da vida de ferramentas de aço AISI classe D-6 do stellite-1 na usinagem de madeira de “*Eucalyptus grandis*”. 1996. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

Henke Milena, Lis Barbara, Krystofiak Tomasz “*Evaluation of Surface Roughness Parameters of HDF for Finishing under Industrial Conditions*” Academic Editor: Marco Corradi, 2022

HIOKI, D. **Influência dos Parâmetros de Corte do Fresamento HSM sobre o Desempenho Tribológico do Aço AISI H13 Endurecido**. 2006. 233p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – USP, São Paulo.

IBGE, Censo. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. **Senso Demográfico**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/sao-marcos/panorama>>. Acesso em: 12 nov. 2022.

İŞLEYEN, Ümmü K.; KARAMANOĞLU, Mehmet. *The influence of machining parameters on surface roughness of MDF in milling operation*. **BioResources**, v. 14, n. 2, p. 3266-3277, 2019.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: Ajir Gráfica e Editora Ltda., 2005.

KLOCKE, Fritz. **Manufacturing Processes 1 Cutting**. Steinbachstr: Springer, 2011. 524 p.

KMINIAK, Richard et al. Efeito das condições de corte na qualidade da superfície fresada de painéis de fibras de média densidade. **BioResources** , v. 15, n. 1, pág. 746-766, 2020.

LASZEWICZ, K. GORSKI, J. WILKOWSKI, J. *Long-term accuracy of MDF milling process-development of adaptive control system corresponding to progression of tool wear*. **Eur. J. Wood Prod.** 71:383–385. 2013.

LEITZ-LEXICON, Edition 7. Disponível em < [https://www.leitz.org/fileadmin/Downloads/Lexicon/EN/Leitz\\_Lexicon\\_Edition\\_7\\_-\\_Complete\\_edition\\_01.pdf](https://www.leitz.org/fileadmin/Downloads/Lexicon/EN/Leitz_Lexicon_Edition_7_-_Complete_edition_01.pdf) >. Acesso em: 11 nov. 2022.

MACHADO, Álisson Rocha et al. (). *Teoria da usinagem dos materiais*. 2. ed. rev. São Paulo: Blucher, 2011.

MATTOS, René Luiz Grion; CHAGAS, Flávia Barros das; GONÇALVES, Roberta Mendes. Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 27, p. 121-156, mar. 2008.

MOORE, David S. (2007), *The Basic Practice of Statistics*. New York, Freeman.

PINHEIRO, C. Efeitos do teor de umidade da madeira no fresamento de *Pinus elliottii*. 2014. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, UNESP – Univ. Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

RODRIGUES, Marcus Vinicius. **Entendendo, Aprendendo e Desenvolvendo Qualidade Padrão Seis Sigma**. Elsevier Brasil, 2017.

ROSSI, G. C. KANENOBU, A. A. BATALHA, G. F. Relação Entre Parâmetros De Corte E Rugosidade Da Superfície Usinada. **Máquinas E Metais**, <http://www.arandanet.com.br>, V. Xli, N. 475, P. 156-163. 2005.

SALJE, E.; DRUCKHAMMER, J.; KEUCHEL, K. *Online measuring the edge roughness of wooden materials at machining*. In: **Proceedings of the 8th international wood machining seminar, University of California Forest Products Laboratory, USA**. 1985. p. 342-345.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brocas, rebolos e abrasivos**. 2. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995.

TORQUATO, Luciane Paes. Caracterização dos painéis MDF comerciais produzidos no Brasil. 2008.

ZAMARIAN, E. H. C.; ALBURQUERQUE, C. E.; MATOS, J.L.M, Usinagem Da Madeira De Bracatinga Para Uso Na Indústria Moveleira. **Floresta**, Curitiba, Pr, V. 42, N. 3, P. 631 - 638, Jul./Set. 2012.

## ANEXO A

	Processo	Peso (gramas)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Velocidade de avanço (m/min)	Rotação (rpm)	Fz (mm)	Rugosidade Ra (um)	
							a <sub>p</sub> 7,5 mm	a <sub>p</sub> 2 mm
Amostra 1	Fresamento	614,14	697,89	5	18000	0,138	12,32	6,04
							11,47	5,77
							11,85	4,65
							11,48	5,62
							11,4	6,74
Amostra 2	Fresamento	605,93	688,56				12,1	5,6
							12,47	4,73
							12,42	4,45
							11,34	-
							12,52	-
Amostra 3	Fresamento + Lixamento	611,23	694,58	10,57	-			
				10,65	-			
				10,5	5,02			
				12,77	4,19			
				12,77	5,34			
Amostra 4	Fresamento + Lixamento	608,57	691,56	12,37	5,81			
				10,9	5,59			
				11,14	6,94			
				12,21	5,9			
				12,38	4,91			
Amostra 5	Fresamento	615,66	699,61	10,95	-			
				10,34	-			
				12,19	-			
				11,91	-			
				10,96	4,94			
Amostra 6	Fresamento	613,31	696,94	10,21	4,31			
				11,78	4,46			
				9,42	4,28			
				10,61	4,41			
				11,12	5,06			
Amostra 7	Fresamento	606,48	689,18	10,93	5,15			
				10,51	3,96			
				11,96	-			
				10,39	-			
				11,1	-			
Amostra 8	Fresamento	598,94	680,61	10,66	-			
				11,98	6,21			
				13,31	4,75			
				10,71	8,05			
				11,26	4,79			
						0,111	15,3	4,37
							12,67	5,84
							11,91	5,82
							12,3	5,32

						10,6	-	
						11,66	-	
						12,54	-	
						11,92	-	
Amostra 9	Fresamento	615,28	699,18	8	0,222	12,36	4,7	
							11,57	7,55
							11,83	7,6
							12,79	6,95
							13,04	6,8
							11,79	7
							13,31	6,7
							12,51	6,96
Amostra 10	Fresamento	618,77	703,15			13,41	-	
						13,32	-	
						13,18	-	
						13,18	-	
Amostra 11	Fresamento	607,33	690,15	10	0,278	13,31	5,95	
							12,51	6,7
							13,41	6,49
							13,32	6,48
							13,18	5,19
							13,18	5,56
							13,02	7,13
							13,35	5,34
Amostra 12	Fresamento	619,44	703,91			12,41	-	
						13,6	-	
						11,75	-	
						12,53	-	
Amostra 13	Fresamento	644,21 Alta Densidade	732,06	5	0,138	10,43	4,68	
							11,36	6,22
							10,75	4,33
							11,42	4,91
							10,78	4,91
							11,87	5,09
							10,45	4,21
							10,56	4,72
Amostra 14	Fresamento	647,03 Alta Densidade	735,26			12,31	-	
						10,41	-	
						11,27	-	
						10,67	-	