

RAQUEL DREOSSO FERRAZ

Análise do processo de furação de painéis de MDF

Raquel Dreosso Ferraz

Análise do processo de furação de painéis de MDF

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

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves

Ferraz, Raquel Dreosso

F381a Análise do processo de furação de painéis MDF / Raquel
Dreosso Ferraz – Guaratinguetá, 2018.

110 f : il.

Bibliografia: f. 105-109

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica –
Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de
Guaratinguetá, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

RAQUEL DREOSSO FERRAZ

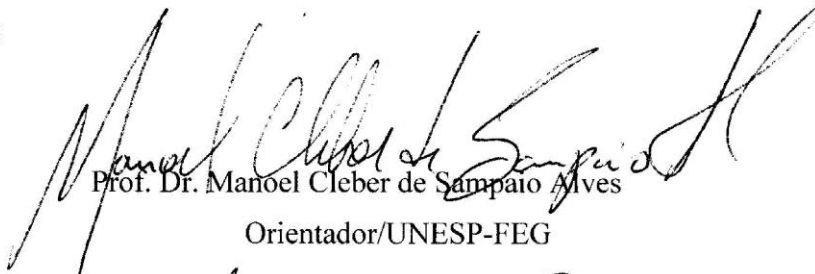
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

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

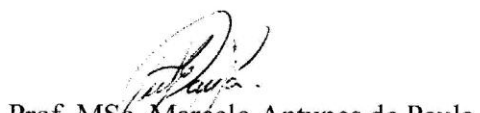
Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS

Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro
UNESP-FEG


Prof. MSc. Marcelo Antunes de Paula
UNESP-FEG

Novembro de 2018

de modo especial, à milha família que sempre me amparou e acreditou em mim, sendo os motivadores de todas as minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus principalmente por minha saúde, também por minha inteligência e capacidade. Sou grata por manter em mim a perseverança e alegria.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Manoel Cléber Sampaio Alves* pela compreensão, humanidade e respeito, me incentivando sempre. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

Aos meus pais *Silvana e Reudens*, e meu irmão *Davi* pelo amor que me faz seguir em frente, pelo incentivo nos estudos e por toda a ajuda e carinho dedicados à mim.

À toda a minha família que com tanta pureza aliviava o cansaço com as brincadeiras de todos os dias e me deram muito suporte nessa jornada.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia de Materiais da UNESP – Campus de Guaratinguetá por toda a ajuda e dedicação na realização dos experimentos deste trabalho.

Aos funcionários da UNESP – Campus de Guaratinguetá pela presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

“Se apenas houvesse uma única verdade, não poderiam pintar-se cem telas sobre o mesmo tema.”

Pablo Picasso

“E nenhum poema será tão grande, tão nobre, tão verdadeiramente digno do nome de poesia quanto aquele que foi escrito tão só e apenas pelo prazer de escrever um poema.”

Edgar Allan Poe

RESUMO

Na indústria moveleira, grande parte das operações cotidianas de usinagem são simplistas, sendo uma delas a fabricação de furos nas peças. Dentre as maiores dificuldades desta indústria, têm-se o arrepimento e lascamento da madeira, que podem acarretar em problemas na superfície do material e levar ao desperdício. Além disso, o uso da madeira maciça é cada vez menos comum, sendo substituído pelo uso de painéis de madeira reconstituída, como o MDF (Medium Density Fiberboard), os quais apresentam melhor acabamento, estabilidade dimensional, além de melhor homogeneidade e resistência mecânica similar à da madeira. A produção do MDF é feita através da união de fibras lignocelulósicas e resina com a ação conjunta de pressão e calor; nesta produção há a eliminação de defeitos naturais do produto, além da adição de propriedades como resistência ao fogo, aumentando suas aplicações possíveis. O processo de furação teve poucos avanços nos últimos anos e ainda existem poucos estudos em centrais de usinagem, utilizando o Comando Numérico Computadorizado (CNC). Com o auxílio da usinagem programada, é possível a fabricação de melhores superfícies, além do aumento da vida da ferramenta, para isso é necessário o estudo dos parâmetros de entrada do processo, como o avanço e a rotação. Avaliaram-se neste trabalho, três rotações: 4000; 5500 e 7000 [rpm] em conjunto com três avanços da ferramenta: 0,1; 0,2 e 0,3 [mm/rot], com três corpos de prova de MDF para cada caso. Foram avaliadas as variáveis de saída: potência consumida pelo motor; vibração e força de avanço; além do estudo da qualidade superficial, através da medição das Rugosidades Média Aritmética (R_a) e Total (R_t); medição do lascamento superficial máximo e medição do erro diametral do furo. Maiores rotações resultaram em menores valores obtidos para vibração e potência consumida, enquanto que a combinação dos maiores valores das variáveis de entrada resultaram em menores valores de força de avanço. Para a qualidade superficial, menores valores de rotação e avanço produziram rugosidades menores, enquanto que a combinação do avanço de 0,1mm/rot e as duas menores rotações produziram menores lascamentos superficiais.

PALAVRAS-CHAVE: Madeira. Rugosidade. Lascamento. Arrepimento. Rotação. Avanço.

ABSTRACT

In the furniture industry, most of the daily machining operations are simplistic; one of them is the manufacture of holes in the parts. The fiber peeling and chipping of wood are among the major difficulties of this industry, which can result in problems on the material surface and lead to waste. In addition to the use of solid wood, the use of engineered wood panels, such as MDF (Medium Density Fiberboard), which have better finish, dimensional stability, better homogeneity and mechanical resistance similar to that of wood, is increasingly common. The production of the MDF is made through the joining of lingo-cellulosic fibers and resin with the joint action of pressure and heat; in this production there is the elimination of natural defects of the product, besides the addition of properties like resistance to fire, increasing its possible applications. The drilling process has had little progress in recent years and there are still few studies in machining centers using the Computerized Numerical Command (CNC). With the aid of programmed machining, it is possible to fabricate better surfaces, in addition to increasing the life of the tool, and for this it is necessary to study the process input parameters, such as feed rate and spindle speed. Three spindle speeds have been analyzed in this study: 4000; 5500 and 7000 [rpm] together with three tool feed rates: 0.1; 0.2 and 0.3 [mm/rot], with three MDF specimens for each case. The analyzed output variables were: power consumed by the motor; vibration and feed force; besides the study of the superficial quality, through the measurement of the Arithmetic Average Roughness (R_a) and Total Roughness (R_t); measurement of the maximum surface chipping and measurement of the diametric bore error. Higher spindle speeds resulted in lower values for vibration and power consumption, whereas the combination of higher values of input variables resulted in lower feed force values. For the surface quality, lower spindle speed and feed values produced smaller roughness, whereas the combination of 0.1mm/rot feed and the two smaller spindle speeds produced smaller surface chipping.

KEYWORDS: Wood. Roughness. Fiber peeling. Spindle speed. Feed rate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Alguns tipos de brocas	20
Figura 2 – Ponta de corte de uma broca helicoidal.....	21
Figura 3 – Furadeira e seus componentes principais.....	22
Figura 4 – Exemplo de CNC	24
Figura 5 – Evolução do Comando Numérico até o CNC	25
Figura 6 – Principais materiais de ferramentas	26
Figura 7 – Parâmetros dos aços rápido e metal duro comparados com outros materiais	27
Figura 8 – Dureza dos elementos quando dissolvidos em Ferro	28
Figura 9 – Influência dos elementos em ligas de aço rápido.....	28
Figura 10 – Influência do Cobalto na dureza do metal duro	30
Figura 11 – Classes de metal duro e suas características	31
Figura 12 – Denominação das partes da broca e ponta de corte.....	32
Figura 13 – Formatos da ponta de corte da broca.....	34
Figura 14 – Processo de retirada do cavaco	35
Figura 15 – Cavacos da furação	37
Figura 16 – Movimentos de corte e avanço.....	38
Figura 17 – Velocidades, rotação e avanço da broca na furação.....	39
Figura 18 – Distribuição de calor na usinagem	40
Figura 19 – Componentes da Força de usinagem.....	41
Figura 20 – Falhas superficiais da madeira oriundas da usinagem	43
Figura 21 – Elementos de um perfil de rugosidade	43
Quadro 1 – Parâmetros de avaliação de rugosidade	44
Figura 22 – Rugosidade aritmética média	45
Figura 23 – Rugosidade Total	46

Figura 24 – Rugosímetro com apalpador	47
Figura 25 – Medição do perfil de rugosidade pela apalpador	47
Figura 26 – Processos de usinagem de madeira com principais taxas de falhas de ferramentas	48
Figura 27 – Processos de usinagem de madeira com principais taxas de defeitos na superfície	48
Figura 28 – Desgaste de flanco	49
Figura 29 – Lascamento da superfície	50
Figura 30 – Produtividade e rotação média do ano de 2016	51
Figura 31 – Resultados das ligações internas e módulos de elasticidade e ruptura para os painéis aglomerados	52
Figura 32 – Produção de MDF	53
Figura 33 – Tipos de picadores do processo de fragmentação	54
Figura 34 – Esquema de um entrelaçador de fibras.....	57
Figura 35 – Flexão de um corpo.....	58
Figura 36 – Densidade genérica do painel pela espessura.....	59
Figura 37 – Camadas do MDF	59
Figura 38 – (a) Umidade relativa absorvida entre madeira maciça e MDF (b) relação encontrada entre o inchamento residual da espessura do MDF e estabilidade de forma	60
Quadro 2 – Propriedades do MDF com 15mm espessura	61
Figura 39 – Chapa comercial de MDF utilizada.....	62
Figura 40 – Brocas de aço rápido sem revestimento	62
Figura 41 – Operação de corte da chapa de MDF	62
Figura 42 – Passos da operação de corte da chapa de MDF.....	63
Figura 43 – Validação das dimensões finais dos corpos de prova	63
Figura 44 – CNC DMU <i>ecoline</i>	64
Figura 45 – Sensor de potência axial utilizado.....	64

Figura 46 – Sensor piezelétrico utilizado	65
Quadro 3 – Características técnicas do módulo de vibração RMS TV10	65
Quadro 4 – Características técnicas da célula de carga	66
Figura 47 – Célula de carga utilizada	66
Quadro 5 – Características técnicas do bloco de conector NI BNC 2120	67
Figura 48 – Bloco de conector utilizado.....	67
Figura 49 – Procedimento de fixação dos corpos de prova.....	68
Figura 50 – CNC no início das usinagens	68
Figura 51 – Fluxograma dos ensaios	69
Figura 52 – Microscópio óptico Carl Zeiss	70
Figura 53 – Medição do lascamento máximo superficial.....	71
Figura 54 – Estereoscópico de medição Mahr.....	72
Figura 55 – Estojos de pinos padrão utilizados	73
Figura 56 – Limpeza dos pinos utilizados	73
Figura 57 – Exemplo de medição	74
Figura 58 – Serra de fita vertical RMF.400-S	75
Figura 59 – Procedimento de corte dos corpos de prova.....	75
Figura 60 – Rugosímetro Mahr modelo MarSurf M300	76
Figura 61 – Medição de rugosidade	76
Figura 62 – <i>Display</i> com resultados de rugosidade	77
Figura 63 – Exemplo de pesagem realizada	77
Figura 64 – Arrepiamento para 0,1mm/rot.....	79
Figura 65 – Arrepiamento para 0,2mm/rot.....	80
Figura 66 – Arrepiamento para 0,3mm/rot.....	80
Figura 67 – Lascamento para 0,1mm/rot.....	81
Figura 68 – Lascamento para 0,2mm/rot.....	82

Figura 69 – Lascamento para 0,3mm/rot.....	82
Figura 70 – Desgaste de flanco na broca dos ensaios	83
Figura 71 – Interações para a Força de avanço	85
Figura 72 – Correlações interativas para a Força de avanço	86
Figura 73 – Interações para a potência do motor.....	88
Figura 74 – Correlações interativas para a potência do motor	88
Figura 75 – Interações para a vibração	90
Figura 76 – Correlações interativas para a vibração.....	91
Figura 77 – Interações para a R_a	92
Figura 78 – Correlações interativas para a R_a	93
Figura 79 – Interações para a R_t	95
Figura 80 – Correlações interativas para a R_t	96
Figura 81 – Interações para o erro diametral.....	97
Figura 82 – Correlações interativas para o erro diametral.....	99
Figura 83 – Interações para a lascamento máximo superficial.....	100
Figura 83 – Correlações interativas para lascamento máximo superficial	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados para medição e pesagem das amostras	78
Tabela 2 – Piores lascamentos encontrados	81
Tabela 3 – Resultados para a Força de avanço da ferramenta.....	84
Tabela 4 – Teste de Tukey para V_c e força de avanço.....	85
Tabela 5 – Teste de Tukey para f e força de avanço	86
Tabela 6 – Resultados para a potência consumida pelo motor.....	87
Tabela 7 – Resultados para vibração	89
Tabela 8 – Teste de Tukey para V_c e vibração	90
Tabela 9 – Resultados para R_a	92
Tabela 10 – Teste de Tukey para f e R_a	93
Tabela 11 – Resultados para R_t	95
Tabela 12 – Teste de Tukey para f e R_t	96
Tabela 13 – Resultados para erro diametral	97
Tabela 14 – Teste de Tukey para V_c e erro diametral	98
Tabela 15 – Teste de Tukey para f e erro diametral	98
Tabela 16 – Resultados para lascamento máximo superficial	100
Tabela 17 – Teste de Tukey para f e lascamento máximo superficial.....	101

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	USINAGEM	188
2.2	FURAÇÃO	19
2.2.1	Furação como processo de usinagem	19
2.2.2	Máquinas de furação	22
2.2.2.1	Furadeiras e outros equipamentos.....	25
2.2.2.2	O Comando Numérico Computadorizado (CNC).....	25
2.2.3	As brocas de furação	25
2.2.3.1	Características importantes	25
2.2.3.2	O aço rápido	27
2.2.3.3	O metal duro	29
2.2.3.4	Geometria geral da broca	32
2.2.3.5	Geometria da aresta de corte	33
2.2.4	O cavaco na furação	34
2.2.4.1	O processo de retirada do cavaco.....	34
2.2.4.1	Tipos de cavaco de furação	34
2.2.5	Movimentos e velocidades de corte e avanço	37
2.2.6	Potência e forças de usinagem	40
2.2.7	Rugosidade	42
2.2.7.1	Definição	45
2.2.7.2	Rugosidade aritmética média (R_a)	45
2.2.7.3	Rugosidade total (R_t).....	45
2.2.7.4	Medição da rugosidade	46
2.2.8	Usinagem de madeira	47
2.2.9	Desgastes e avarias das ferramentas	49
2.3	PAINEL DE MDF	500
2.3.1	Definição e matérias-primas	500
2.3.2	Resinas e aditivos utilizados	51
2.3.3	Produção de MDF	53

2.3.3.1	Descascamento.....	53
2.3.3.2	Fragmentação	54
2.3.3.3	Classificação dos cavacos	54
2.3.3.5	Armazenamento dos cavacos	55
2.3.3.5	Tratamento dos cavacos	55
2.3.3.6	Desfibramento.....	55
2.3.3.7	Mistura da resina.....	56
2.3.3.8	Secagem das fibras.....	56
2.3.3.9	Armazenamento das fibras.....	56
2.3.3.10	Entrelaçamento das fibras	56
2.3.3.11	Seccionamento	57
2.3.3.12	Prensagem	57
2.3.3.13	Resfriamento	58
2.3.3.14	Corte, lixamento e revestimento	58
2.3.4	Características físicas e mecânicas	58
3	MATERIAIS E MÉTODOS	611
3.1	USINAGEM	61
3.1.1	Materiais utilizados.....	61
3.1.2	Produção dos corpos de prova	62
3.1.3	Equipamentos utilizados na usinagem	63
3.1.4	Usinagem dos corpos de prova.....	67
3.1.5	Metodologia de identificação dos ensaios e fluxograma de usinagem.....	69
3.2	AVALIAÇÃO MICROSCÓPICA DOS CORPOS DE PROVA	70
3.2.1	Equipamento utilizado.....	70
3.2.2	Avaliação do arrepiamento da superfície interna.....	70
3.2.3	Avaliação do lascamento superficial	71
3.3	AVALIAÇÃO MICROSCÓPICA DAS BROCAS.....	71
3.3.1	Equipamento utilizado.....	71
3.3.2	Medição do desgaste da ferramenta	72
3.4	MEDIÇÃO EXPERIMENTAL DIAMETRAL DOS CORPOS DE PROVA	72
3.4.1	Instrumentos utilizados	72
3.4.2	Limpeza.....	73
3.4.3	Definição da metodologia de medição	73
3.5	MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE	74

3.5.1	Corte dos corpos de prova.....	74
3.5.2	Instrumento utilizado na medição	75
3.5.3	Metodologia de medição	76
3.6	DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE E DIMENSÕES MÉDIAS DOS CORPOS DE PROVA.....	77
3.7	PROCESSAMENTO DOS DADOS	78
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	7979
4.1	ARREPIAMENTO E LASCAMENTO DOS CORPOS DE PROVA.....	79
4.1.1	Arrepiamento dos corpos de prova	79
4.1.2	Lascamento dos corpos de prova.....	81
4.2	DESGASTES E AVARIAS DA BROCA	79
4.3	FORÇA DE AVANÇO DA FERRAMENTA EM RELAÇÃO À VELOCIDADE DE CORTE E O AVANÇO.....	79
4.4	POTÊNCIA CONSUMIDA PELO MOTOR EM RELAÇÃO À VELOCIDADE DE CORTE E O AVANÇO.....	8686
4.5	VIBRAÇÃO EM RELAÇÃO À VELOCIDADE DE CORTE E O AVANÇO ...	889
4.6	RUGOSIDADE MÉDIA ARITMÉTICA EM RELAÇÃO À VELOCIDADE DE CORTE E O AVANÇO	89
4.7	RUGOSIDADE TOTAL EM RELAÇÃO À VELOCIDADE DE CORTE E O AVANÇO	894
4.8	ERRO DIAMETRAL EM RELAÇÃO À VELOCIDADE DE CORTE E O AVANÇO	896
4.9	LASCAMENTO MÁXIMO EM RELAÇÃO À VELOCIDADE DE CORTE E O AVANÇO	899
5	CONCLUSÃO	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
	REFERÊNCIAS	105
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	109
	APÊNDICE A – BASE DE DADOS UTILIZADA	110

1 INTRODUÇÃO

A indústria de madeira cresceu no Brasil durante a última década e em 2017 foi responsável pela criação de 5.800 vagas de trabalho de um total de quase 141 mil novos empregos formais, diz a revista O Papel (O Papel, 2017).

Além de benefícios do ponto de vista econômico, a madeira é um material renovável e muito escolhido devido ao seu dinamismo, o qual permite que quase toda sua estrutura seja utilizada. Na indústria de painéis por exemplo, as cascas são usadas para criação de energia para o processo, enquanto que a estrutura da tora é triturada para a fabricação dos MDFs, não sendo importantes então as dimensões dela, acarretando em uma melhor administração dos recursos disponíveis no processo de produção.

A legislação ambiental brasileira exige que a matéria-prima da indústria de base florestal seja proveniente de florestas certificadas, o que dificulta a ampliação da geração de produto para o mercado em expansão. Isso leva à necessidade de alta produtividade em período reduzido nas florestas, colaborando para o plantio de espécies de reflorestamento mais adaptadas para as condições climáticas e de solo de cada local.

Desde muito tempo, as espécies tropicais amazônicas são a parcela expressiva da madeira serrada produzida no país. Entretanto, as espécies de reflorestamentos possuem um volume considerável e têm crescido continuamente no Brasil, diz a Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI, 2009).

Em 2012, nas áreas de reflorestamento os plantios de *Eucalyptus sp* e *Pinus sp* totalizaram 6.664.812 hectares, com 76,6% correspondentes às áreas de plantio de *Eucalyptus sp* e 23,40% ao plantio de *Pinus sp*, segundo a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas - ABRAF.

O Brasil ocupou o oitavo lugar em 2017 no ranking mundial dos maiores produtores de painéis de madeira com um total de 7,3 milhões de metros cúbicos, de onde 4 milhões destes são de MDF/HDF. A perspectiva futura é de aproveitamento total das florestas, graças à utilização de tecnologias mais avançadas que possibilitarão novas finalidades para as árvores, tais como: indústria automobilística, farmacêutica, química, cosmética, aeronáutica, têxtil e alimentícia (VINET; ZHEDANOV, 2010).

Os painéis de média densidade (MDF), derivados da madeira e produzidos através da aglutinação de suas fibras com resinas sintéticas, contemplam várias aplicações no mercado, principalmente o moveleiro, podendo substituir a própria madeira por apresentar uniformidade, alta usinabilidade e resistência mecânica próxima à da madeira maciça.

Durante seu processo de fabricação, este material conta com vantagens como a eliminação dos defeitos naturais presentes na madeira (nós; tensões de crescimento; entre outros) e ainda a adição de propriedades desejáveis como a resistência ao fogo e à biodegradação, o que aumenta ainda mais seu leque de aplicações.

A furação, um dos principais processos da indústria manufatureira, está presente na grande maioria de peças que possuem ao menos um furo, porém este processo recebeu poucos avanços nos últimos anos, dizem Diniz, Marcondes e Coppini (2013).

Este trabalho tem como objetivo estudar melhor o processo de furação de MDF, apresentando as definições de usinagem, furação, MDF, brocas. Nos materiais e métodos é descrita a metodologia de ensaio e materiais utilizados, nos resultados e discussão é feita uma análise dos resultados com verificação na bibliografia atualizada e que procurará contribuir apontando melhores condições para o processo de usinagem estudado.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como propósito a análise do processo de furação na usinagem de painéis MDF comerciais e o estudo de sua mudança de comportamento na variação de diferentes parâmetros de corte.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Sendo o avanço e a velocidade de corte as condições de usinagem variadas, estudaram-se as variáveis de saída: potência consumida do motor, vibração e força de avanço; além do estudo da qualidade dos furos obtidos (avaliando-se rugosidades média e total, erro diametral de furação final obtido e lascamento máximo superficial).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 USINAGEM

A usinagem é vista como a forma mais antiga de confecção de utilidades desenvolvida pelo homem. Na sua definição simples, as operações de usinagem são vistas como toda e qualquer maneira de modificar a forma, dimensões ou acabamento de uma peça (ou qualquer que seja a combinação destes três itens anteriores) com a produção de resíduos: os cavacos, que são da própria peça e que são removidos desta ao longo da operação por uma ferramenta, como diz Ferraresi (1977).

Uma das primeiras usinagens pode ser vista portanto como a fabricação de uma lança nos tempos das cavernas: onde pretendia-se fabricar, a partir de um pedaço de madeira longo e uniforme nos dois lados (peça), uma ponta afiada (peça finalizada e com forma/dimensões diferentes). Utilizavam-se pedras resistentes (ferramentas) para a retirada de material de uma das pontas e ao longo deste processo eram produzidos fragmentos de madeira de forma irregular e que seriam descartados do produto final (cavaco).

Com o avanço do tempo e da tecnologia, descobriram-se novos materiais e novas utilizações para eles nas indústrias e no cotidiano. Mas ao mesmo tempo, também surgiram dificuldades em sua usinagem:

- Necessitavam-se de ferramentas de corte mais resistentes;
- Precisavam-se de tolerâncias cada vez mais precisas;
- A produção manual destes itens custeava o processo e o tornava muito mais demorado.

As saídas para estas questões vêm sendo construídas desde a Revolução Industrial do século XVIII, quando as máquinas à vapor possibilitaram o início da automatização de tarefas repetitivas, que até então eram manuais. Além disso, esta revolução também possibilitou a utilização de ligas de aço como ferramentas de corte, iniciando-se o estudo da utilização destes materiais como são empregados hoje em dia e os estudos no campo de usinagem dos materiais.

Segundo Trent e Wright (2000), essas ligas de aço utilizadas como ferramentas se mostraram mais difíceis de serem usadas na usinagem do que o ferro forjado, e os custos com sua usinagem se mostravam altos já no final do século XIX: para manter uma vida razoável

destas ferramentas, as velocidades de corte dos processos eram diminuídas. Por outro lado, financiavam-se soluções que reduzissem ainda mais os custos de usinagem através da aceleração e automação do processo de corte. Para eles, estes dois preceitos guiam até a atualidade o rumo das inovações tecnológicas deste ramo.

Para Black e Kohser (2008) uma usinagem de baixo custo não acontece facilmente nos dias atuais, há na verdade uma relação muito próxima e mútua entre o *design* de um produto, a seleção de materiais, processos e equipamentos e a seleção e *design* da ferramenta utilizada.

Pinheiro (2014) ainda ressalta que os três fatores que mais refletem nos resultados de uma boa usinagem são a escolha do material a ser usinado, a ferramenta de corte e a forma de remoção de cavaco.

O controle sobre a ferramenta de corte durante a usinagem foi maximizado com a criação das máquinas de usinagem convencionais, os tornos, e foi melhorado com as máquinas automáticas e os CNC, Comandos Numéricos Computadorizados (TRENT; WRIGHT, 2000).

Citando Black e Kohser (2008), o CNC é um exemplo típico de automatização robótica, onde pode-se programar externamente, através de *softwares* de computadores, uma máquina que desempenhará caminhos com o número necessário de passes da ferramenta na peça e garantindo sua qualidade.

As operações de usinagem podem ser divididas em dois grandes grupos: o desbaste e o acabamento da peça. Onde a primeira está mais fundamentada na elevada taxa de remoção de material enquanto a segunda foca na qualidade final da peça (MACHADO et al., 2009).

De modo mais amplo, as principais operações de usinagem são classificadas em torneamento, aplainamento, fresamento, furação, brochamento e retificação.

2.2 FURAÇÃO

2.2.1 Furação como processo de usinagem

De todos os processos realizados na indústria de manufatura, 25% dos furos são realizados por brocas no processo de furação. Embora pareça um processo simples, ela é na verdade bem complexa: as ferramentas mais comuns são brocas helicoidais com duas superfícies de corte em sua ponta (BLACK; KOSHER, 2008).

A furação consiste, em sua mais simples definição, na utilização de uma ferramenta de corte para abrir um furo, geralmente cilíndrico, em uma peça. Da variação diametral

esperada para o furo, do material da peça e de outras condições da usinagem que será determinado o material da ferramenta e seu *design*. Na Figura 1 são exemplificadas algumas brocas atuais com *designs*, materiais diferentes e com ou sem revestimentos.

Figura 1 - Alguns tipos de brocas



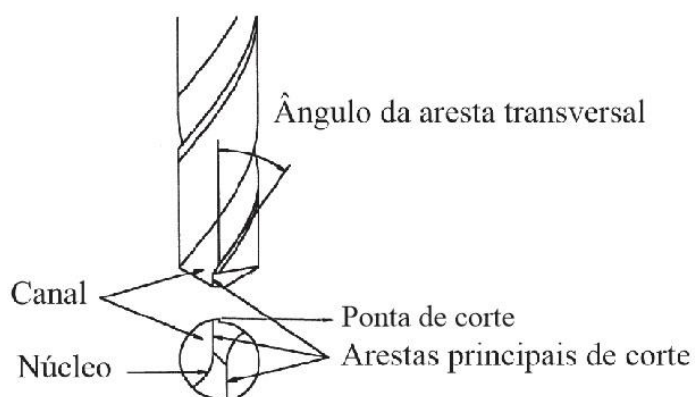
Fonte: HMS (2018).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), as ferramentas da furação avançaram mais lentamente quando comparadas com as de outros processos, como o fresamento e o torneamento. Nessas operações, materiais como metal duro, diamante e cerâmicas estão entre os mais utilizados, enquanto as brocas mais comuns são as de aço rápido. Porém, com o uso dos Centros de Usinagem CNC na furação, os materiais destas ferramentas estão sendo mais desenvolvidos.

O fabricante MITSUBISHI MATERIALS CORP. (s.d.) comenta que para o corpo da broca não produzir atrito com a parede interna do furo, existe uma conicidade, ou redução de diâmetro, a partir de sua ponta até a haste, localizada perto do local de fixação da ferramenta. Esta redução é da faixa de 0,04 até 0,1mm, mas pode variar de acordo os materiais a serem usinados e no caso de brocas de alta eficiência.

Na Figura 2 têm-se a ponta de corte de uma broca helicoidal e alguns de seus componentes. Nela as linhas do núcleo, da aresta de corte junto com a linha do centro da broca (a aresta transversal) formam o flanco.

Figura 2 - Ponta de corte de uma broca helicoidal



Fonte: Trent & Wright (2000).

Um outro ponto essencial da furação são as variações da velocidade e ângulo da aresta transversal, mostrado na Figura 2, ao longo da aresta de corte da ferramenta. A velocidade é máxima ao longo do diâmetro máximo e cai para zero no centro do núcleo, o ângulo de aresta também decresce desde a periferia e no centro é extremamente negativo. Estas variações são responsáveis por muitas das características desta usinagem: brocas sujeitas à alto estresse de operação; existência de canais cuidadosamente desenhados para o escoamento do cavaco enquanto mantêm a resistência destas ferramentas; ângulos de aresta diferentes para cada tipo de classe de material usinado (TRENT; WRIGHT, 2000).

Durante este processo, a ferramenta penetra quase que totalmente na peça e a fricção de sua ponta de corte com as paredes do furo leva à geração de calor, que em parte é absorvido termicamente pelo cavaco durante sua produção. Entretanto, a falta de espaço para a saída desse material do furo somados com o restante do calor formado por fricção, tornam a lubrificação e resfriamento da broca muito difíceis.

Lima e Vieira (2002) dizem que este aumento de temperatura é o responsável pela dilatação de espessuras mais finas da peça durante a usinagem e também por mudanças de fase do material da peça na região de contato peça-ferramenta. Toda a região da peça que têm sua integridade estrutural e material comprometidas pelo calor é chamada de Camada Afetada pelo Calor (CAC).

A solução encontrada para dada situação pode ser a interrupção frequente do processo de furação para a retirada e resfriamento da broca; ou ainda a utilização de ferramentas com canais de lubrificação, que tornam possíveis o uso de fluidos de corte sob pressão para a lubrificação do fundo do furo e da parte da broca de maior estresse durante a usinagem: a ponta de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Nesta parte da ferramenta, representada na Figura 1, Black e Kohser (2008) afirmam que existem quatro tipos de efeitos durante a furação:

- No contato entre o centro do núcleo e a superfície da peça (devido à pressão e rotação), percebe-se a formação de um círculo muito pequeno;
- A formação do cavaco, realizada pelas arestas de corte;
- A remoção do cavaco, realizada pelos canais helicoidais em conjunto com o movimento de rotação da broca;
- A ferramenta ser guiada através de rotas deixadas pela fricção da ponta de corte com as paredes do furo.

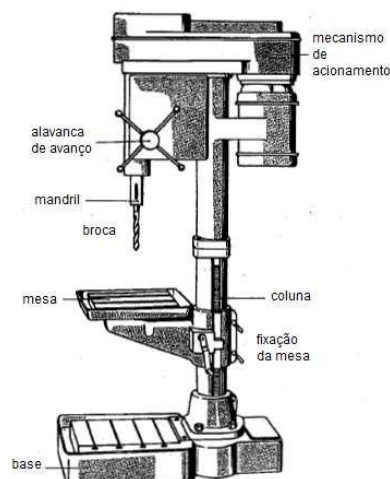
A existência de furos também leva à ocorrência de tensões remanescentes na peça, que são originadas dos processos de usinagem, e têm probabilidade de ocorrência mais acentuada quando os parâmetros da usinagem têm valores otimizados (LIMA, VIEIRA, 2002).

2.2.2 Máquinas de furação

2.2.2.1 Furadeiras e outros equipamentos

A furação de uma peça pode ser realizada em diversas máquinas, como tornos, fresadoras horizontais e verticais e centros de usinagem. Mas o equipamento que é projetado e construído essencialmente para este tipo de usinagem é a furadeira, representada na Figura 3.

Figura 3 - Furadeira e seus componentes principais



Fonte: Lacerda (2018).

Para Black e Kohser (2000), as características necessárias de um equipamento para efetuar a furação são:

- Possuir torque e forças suficientes para a fabricação do furo;
- Possuir rigidez adequada, prevenindo assim flexões da ferramenta durante o corte;
- Possuir folga mínima para reduzir a pressão na ferramenta durante a ruptura no final da fabricação do furo;
- E, principalmente, possuir um eixo, onde será fixada a broca, que rotacione precisamente e que suporte quaisquer que sejam as forças resultantes deste processo.

Na furadeira, a broca é fixa no mandril e utiliza-se a alavanca de avanço para aproximá-la da superfície da peça. Entretanto, com este equipamento não é possível realizar furos com profundidades precisas, devido à impossibilidade de visualização exata do local da broca dentro da peça por parte do operador.

Outra dificuldade encontrada pelo operador na furadeira é vista para o caso onde a peça terá mais de um furo, e então, terá de ser deslocada da mesa até a posição correta, ocasionando um aumento do tempo de usinagem e tendendo a gerar erros de usinagem devido ao posicionamento.

2.2.2.2 O Comando Numérico Computadorizado (CNC)

Diferentemente do processo convencional de usinagem, onde são usadas máquinas como as já citadas, no CNC um microcomputador, que é parte do equipamento, é usado para controlar a usinagem, como observa-se na Figura 4 no canto superior direito.

Figura 4 - Exemplo de CNC



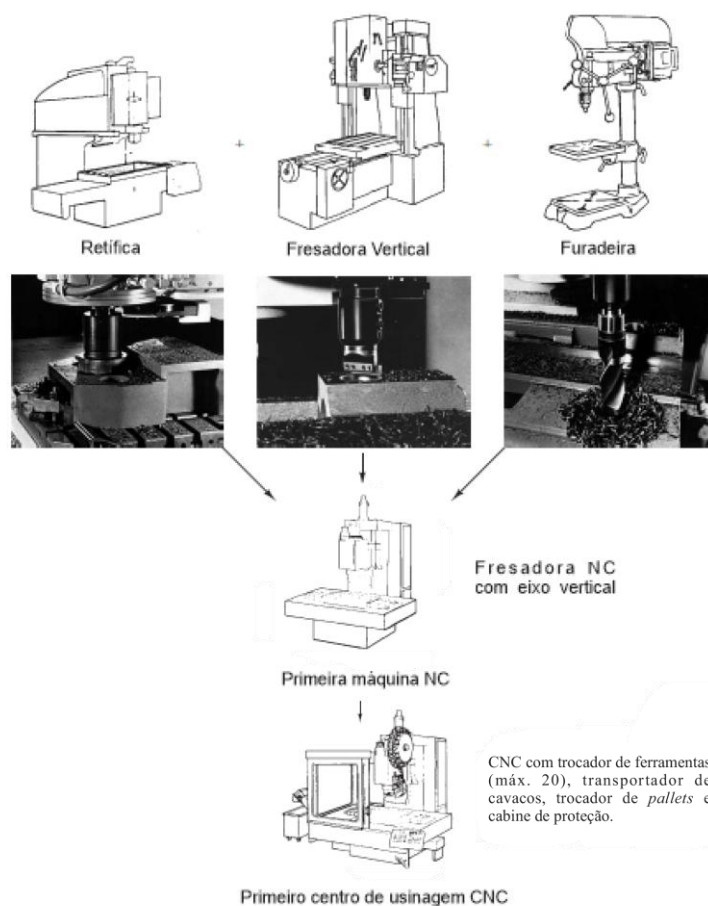
Fonte: Comerlatto (2019).

Machado et al. (2009) comentam que as máquinas CNC funcionam a partir do comando programado e podem produzir qualquer perfil geométrico que obedeça ao sistema de coordenadas cartesianas.

Para Marciano (s.d.), comparando as CNCs com máquinas convencionais observam-se vantagens tais como alta produtividade e repetitividade dos processos; boa precisão dimensional; menor dependência das habilidades do operador, já que o *software* da máquina executa um programa para a realização do processo; tempos de preparação da máquina ("setup") e de usinagem menores; entre outros. Entre as principais desvantagens estão o maior custo inicial deste equipamento e seu maior custo de manutenção, mas embora apresentem despesas maiores, o uso destes equipamentos na indústria aponta retornos financeiros melhores.

Historicamente falando, os Comandos Numéricos, NC, vieram anteriormente aos CNCs e a maior diferença entre ambos foi a troca do controle de hardwares por *softwares*. Na Figura 5 têm-se a evolução do desenvolvimento do centro de usinagem convencional para o CNC.

Figura 5 - Evolução do Comando Numérico até o CNC



Fonte: Black e Kohser (2008).

Os NC impactaram nas máquinas de usinagem notavelmente, segundo Black e Kohser (2008), demandando novos *designs* que suportassem o desgaste dos *drivers*, engrenagens e motores, além de necessitarem de maior precisão. Elas possuíam um custo elevado, mas traziam uma eficiência maior para os processos, através de trocadores automáticos de ferramentas e trocadores de *pallets*, que transformaram estas máquinas nos primeiros centros de usinagem.

2.2.3 As brocas de furação

2.2.3.1 Características importantes

A característica da usinagem é utilizar uma ferramenta que seja mais dura e mecanicamente mais resistente do que a peça a ser usinada. Porém, algumas usinagens,

principalmente de materiais frágeis e em cortes interrompidos, também requerem tenacidade destas ferramentas (MACHADO et al., 2009)

A tenacidade é a capacidade de um material suportar choques e outros impactos oriundos do processo de usinagem, enquanto a dureza é sua resistência à deformações. Tais características são vistas como opostas e um dos desafios dos fabricantes de ferramentas é adequar a proporção destas características para criar ferramentas mais eficientes.

Esta conciliação é feita desde o século XIX através de diferentes composições químicas; controle dos processos de fabricação, os quais tornam os materiais mais puros e com mais qualidade; entre outras soluções (FERRARESI, 1977).

Os materiais de ferramentas não possuem uma classificação geral, mas podem ser colocados em grupos com base em suas características químicas, sendo eles: Aços rápidos (com e sem revestimento); Coronite; Metal duro (com e sem revestimento); Materiais cerâmicos; Nitretos de boro cúbicos e o Diamante (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Na Figura 6 estão alguns destes materiais e outros que serão citados posteriormente, mostram-se os materiais, seus módulos de elasticidade (ou Módulo de Young), coeficientes de expansão térmica, densidades, temperaturas de fusão e durezas.

Figura 6 - Principais materiais de ferramentas

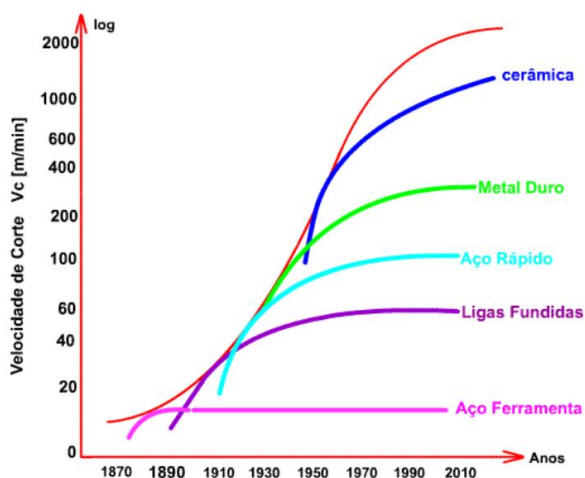
Materiais Duros	Dureza (HV)	Energia de Formação Livre (kcal/g • atom)	Solubilidade em Ferro (% 1250°C)	Condutividade Térmica (W/m • k)	Expansão Térmica ($\times 10^{-6}/k$) *	Material da Ferramenta
Diamante	>9000	—	Alta	2100	3.1	Diamante Sinterizado
CBN	>4500	—	—	1300	4.7	CBN Sinterizado
Si ₃ N ₄	1600	—	—	100	3.4	Cerâmicas
Al ₂ O ₃	2100	-100	≈ 0	29	7.8	Cerâmicas Metal duro sem cobertura
TiC	3200	-35	< 0.5	21	7.4	Cermet Metal Duro com Cobertura
TiN	2500	-50	—	29	9.4	Cermet Metal Duro com Cobertura
TaC	1800	-40	0.5	21	6.3	Metal duro sem cobertura
WC	2100	-10	7	121	5.2	Metal duro sem cobertura

*1W/m • K=2.39 $\times 10^{-3}$ cal/cm • s • °C

Fonte: Mitsubishi Materials Corporation (2018).

Todavia, os materiais mais importantes dentre eles são os Aços rápidos e os Metais duros, sendo até hoje usados nas ferramentas e, por serem os materiais desenvolvidos a mais tempo, seus valores são usados como parâmetros para medição das características dos novos materiais que são desenvolvidos (FERRARESI, 1977), como é possível depreender da Figura 7.

Figura 7 - Parâmetros de velocidade dos aços rápidos e metal duro comparados com outros materiais



Fonte: CIMM (2018).

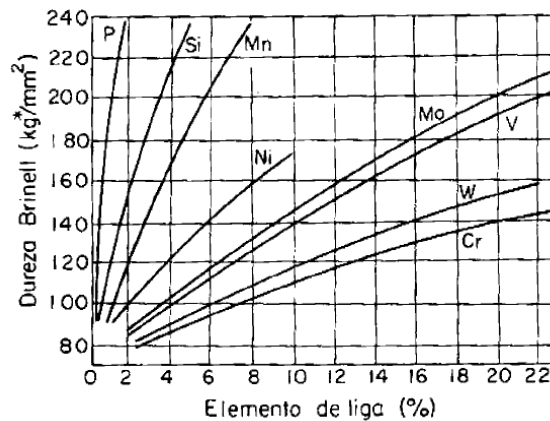
Nesta Revisão serão apresentados os materiais: aço rápido e metal duro; os materiais mais utilizados no processo de furação.

2.2.3.2 O aço rápido

Estes aços recebem este nome pois aumentaram as velocidades de corte em quase dez vezes no final do século XIX, ano de seu desenvolvimento. Se comparados com os valores encontrados nos dias atuais, já não são tão eficientes quanto naquela época, tendo velocidades relativamente baixas (MACHADO et al., 2009).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), quanto mais elementos de liga estão dissolvidos em meio à composição da liga do aço rápido, maior será sua dureza em temperaturas quentes; enquanto que a tenacidade dependerá da presença de alguns elementos principais e de sua dissolução, como observa-se nas Figuras 8 e 9.

Figura 8 - Dureza dos elementos quando dissolvidos em Ferro



Fonte: Ferraresi (1977).

Figura 9 - Influência dos elementos em ligas de aço rápido

Influência na Propriedade	Elemento									
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Al
Aumento da Resistência	●	●	●		●				●	
Aumento da Dureza	●	●	●		●					
Aumento da Resistência ao Impacto						●				
Redução da ductibilidade	●		●	●						
Aumento da Resistência em altas temperaturas								●		
Aumento da Temperabilidade							●	●		
Ação Desoxidante		●			●					●
Aumento da Resistência à Corrosão							●			
Aumento da Resistência à Abrasão							●			
Redução da Soldabilidade	●									

Fonte: Peixoto (2018).

Da Figura 8 observa-se que elementos como o Manganês (Mn), Fósforo (P) e Silício (Si) aumentam notavelmente a dureza da liga mesmo em concentrações pequenas. Da Figura 9 observam-se outras características que estes e os elementos Níquel (Ni), Molibdênio (Mo), Alumínio (Al), Enxofre (S) e Carbono (C) alteram com sua presença nas ligas de aço rápido, tais como: melhor resistência à corrosão; redução da ductibilidade (ou aumento da tenacidade); aumento da resistência; entre outros.

Os aços rápidos são divididos em duas categorias: os aços que têm Tungstênio (W) em sua composição, da categoria "T", e os que possuem Molibdênio (Mo), da categoria "M". O Tungstênio e o Molibdênio, que é utilizado como substituto do Tungstênio, conferem às ligas uma elevada dureza à quente e resistência ao desgaste (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Para os aços rápidos com revestimento, este garante um tempo de vida e velocidades de corte maiores do que as que seriam alcançadas sem o revestimento (MACHADO et al., 2009). Nos aços rápidos são encontrados mais comumente os revestimentos de nitreto de Titânio (TiN), que ficaram mais baratos nos anos de 1980, e conferem à ferramenta alta dureza (a quente e a frio), pequeno atrito, menores desgastes, entre outros (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

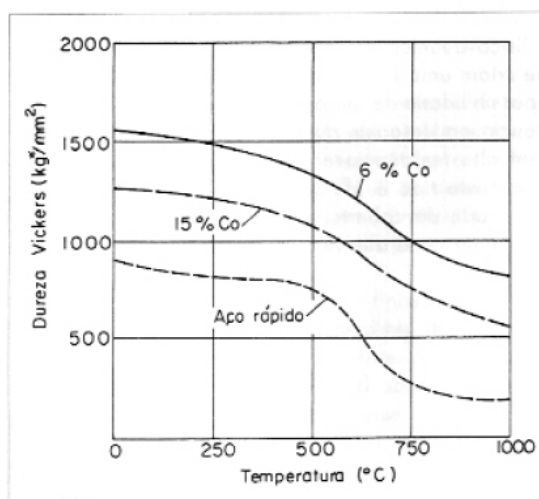
Os autores ainda dizem que, quando usadas em brocas e outras ferramentas de geometria complexa, estas devem ser modificadas para que, no caso das brocas, uma maior quantidade de cavaco consiga ser removida sem prejudicar a ferramenta, isso graças ao aumento dos ângulos de hélice ou através de outras geometrias para os canais helicoidais.

2.2.3.3 O metal duro

O metal duro, ou carboneto de Tungstênio (WC), foi descoberto por volta dos anos de 1920 e novamente proporcionou um salto de quase dez vezes nas velocidades de corte alcançadas na época. Sendo o material que surgiu logo após o aço rápido, possuía uma ótima combinação de resistências mecânica e ao desgaste além de boa tenacidade na usinagem de ferros fundidos cinzentos, mas para a usinagem de aços, desgastava-se muito (MACHADO et al., 2009).

Em sua composição inicial, o metal duro também continha o Cobalto (Co) cuja presença se relaciona diretamente com a diminuição da dureza a quente e o aumento da resistência à fratura do material (ZHANG et al., 2003), como pode-se depreender da Figura 10, a qual usa os valores do aço rápido como comparação entre duas diferentes porcentagens de composição de Cobalto no metal duro (6% e 15% respectivamente).

Figura 10 - Influência do Cobalto na dureza do metal duro



Fonte: Ferraresi (1977).

Para aumentar o leque de usos do metal duro, através da melhoria de sua dureza à quente, foram adicionados carbonetos de Titânio, Tântalo e Nióbio (TiC, TaC e NbC) e criadas classes diferentes deste material de acordo com sua composição. Os materiais que não receberam estes carbonetos ficaram conhecidos como "classe dos ferros fundidos" ou classe "K", enquanto para uma adição em maior quantidade dos carbonetos, foi criada a classe "P" e para uma adição em menor quantidade, criou-se a classe "M" (MACHADO et al., 2009).

A adição de TaC (com ou sem o Nióbio) melhora a tenacidade quando comparada com as composições da classe "K" do metal duro. A sua substituição por TiC não melhora as capacidades de corte da ferramenta, porém observou-se que a presença de dois ou mais carbonetos na mesma liga produzem usinagens melhores (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Segundo Machado et al. (2009), as principais vantagens da implementação destes carbonetos foram a melhoria da resistência ao desgaste abrasivo e a dificuldade na difusão dos elementos de liga durante a usinagem; isso devido à menor solubilidade dos carbonetos e sua maior estabilidade química.

Ainda para os autores, as ferramentas de metal duro conseguem usinar qualquer tipo de material com dureza até 45 HRC e sua utilização necessita de máquinas mais rígidas e com um leque de velocidades de corte maior, devido à sua resistência a altas temperaturas e sua eficiência em altas velocidades, respectivamente.

Na Figura 11 encontram-se as classes de metal duro, com as respectivas composições dos materiais já explicados e suas características de dureza e tenacidade.

Figura 11 - Classes de metal duro e suas características

Designação	% WC	%TiC + Tac	%Co	Densd. (g/cm ³)	Dureza (HV)	Tenacide (Kg/mm ²)
ISO						
P01	30	64	6	7,2	1800	75
P10	55	36	9	10,4	1600	140
P20	76	14	10	11,9	1500	150
P30	82	8	10	13	1450	170
P40	77	12	11	13,1	1400	180
P50	70	14	16	12,9	1300	200
K01	93	2	5	14,8	1750	120
K10	92	2	6	14,8	1650	150
K20	91,5	2,5	6	14,8	1550	170
K30	89	2	9	14,5	1450	190
K40	88		12	14,3	1300	210
M10	84	10	6	13,1	1650	140
M20	82	10	8	13,4	1550	160
M30	81	10	9	14,4	1450	180
M40	78	7	15	13,5	1300	200

Fonte: Sandvik Coromant (2003).

Já para o revestimento dos metais duros, assim como no revestimento dos aços rápidos, almeja-se aumentar a resistência ao desgaste da camada de contato peça-ferramenta e a vida da ferramenta. Com a aplicação do revestimento também é possível manter características dos metais do núcleo da broca, como a tenacidade, garantindo sua conciliação com a resistência ao desgaste e dureza a quente. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Machado et al. (2009) comentam que um dos fatores da seleção de ferramentas de metal duro é o número de camadas presentes, onde o mais comum é se encontrarem revestimentos triplos em camadas intercaladas e cada qual com sua função. Os revestimentos mais utilizados na indústria, para os metais duros, são TiC (carboneto de Titânio), TiCN (carbonitreto de Titânio) e TiN (nitreto de Titânio), Al₂O₃ (óxido de Alumínio) e TiN. As principais características, para Diniz, Marcondes e Coppini (2013), de cada tipo destes três revestimentos são:

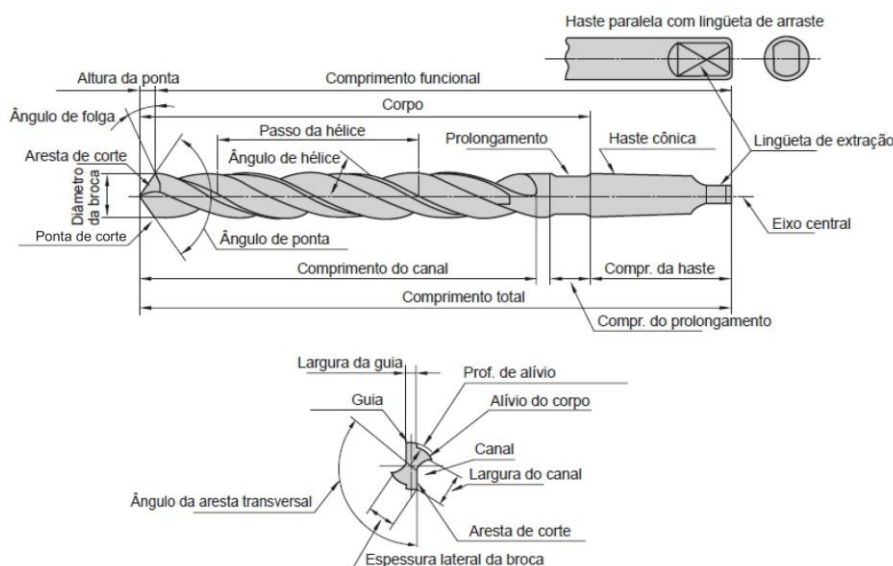
- TiC: é usado na primeira camada por garantir aderência das demais (devido à sua afinidade química com o material do núcleo da ferramenta), possui boa resistência ao desgaste por abrasão e é o material com maior dureza dos três revestimentos;
- Al₂O₃: este material, por ser cerâmico, possui estabilidade térmica a altas temperaturas, estabilidade química e resistência à oxidação; melhorando estas características na ferramenta, além de ter se mostrado o principal responsável pela diminuição do aparecimento do desgaste de cratera nas ferramentas;

- TiN: é normalmente mais encontrado na última camada dos revestimentos por possuir baixa paridade química com os aços, sua principal função é reduzir o coeficiente de atrito entre o cavaco e a ferramenta.

2.2.3.4 Geometria geral da broca

Os aspectos principais da geometria da broca, em sua maioria, se encontram na ponta de corte desta e são projetados para atender às necessidades de corte encontradas durante a retirada do cavaco da peça. Na Figura 12 estão todos os componentes da broca e, abaixo, de sua ponta de corte. Após, o detalhamento da influência dos mais importantes nos processos de furação e características importantes a serem consideradas no *design* da ferramenta.

Figura 12 - Denominação das partes da broca e ponta de corte



Fonte: Mitsubishi Materials Corporation (2018).

No *design* geral de uma broca, para o fabricante MITSUBISHI MATERIALS CORP. (s.d.), os aspectos mais importantes são: o comprimento do canal; ângulo de ponta; espessura do núcleo; a guia e o ângulo de hélice ou ângulo de saída do material.

A guia é a responsável pela determinação diametral da ferramenta e sua largura depende da fricção que será encontrada com a peça. Para baixos atritos, a largura é pequena. Para dimensões maiores, há uma melhora na precisão, mas mais desgaste por fricção.

O núcleo, que pode ser melhor visualizado na Figura 2, encontra-se no centro da ponta de corte da broca. Sua espessura varia de acordo com a aplicação da ferramenta: espessuras

pequenas são usadas para materiais com baixa rigidez e boa usinabilidade. Esta furação tenderá a ter baixos esforços de corte e boa expulsão dos cavacos pelas hélices da broca; espessuras maiores são mais usadas em materiais de altas dureza e rigidez, na usinagem de furos passantes ou para esforços de corte grandes e dificuldades na remoção do cavaco.

Para Black e Kosher (2008), o ângulo de ponta é formado pelas arestas de corte da ferramenta e dependendo do material de usinagem possuirá faixas de valores diferentes:

- Para materiais dúcteis, como ligas de Alumínio, varia na faixa de 118° até 135° ;
- Faixas menores, que vão de 90° até 118° são usadas para materiais frágeis, como ligas de magnésio;
- Para materiais plásticos este ângulo é normalmente de 90° .

Entretanto, o mais usado, por ter mostrado boas condições de usinagem e uma vida razoável para a ferramenta, é o de 118° . Inicialmente este ângulo se mostrou eficiente em aços com teor de Carbono médio, mas atualmente é usado em uma grande fatia dos processos de furação.

MITSUBISHI MATERIALS CORP (s.d.) comenta que o comprimento do canal deve ser projetado de acordo com as características do conjunto profundidade do furo, comprimento do mancal e reafiações da broca. Todavia, canais de ferramenta grandes provocam uma redução na vida da ferramenta.

Por último, o ângulo de hélice, ou de saída do cavaco, deve ser projetado de acordo com a dureza do material da peça. Ao contrário do que se imagina, os ângulos serão pequenos quando usinados materiais com alta dureza e serão grandes para baixa dureza. Isso porque materiais pouco duros, como as ligas de Alumínio, produzirão uma quantidade de cavaco maior em sua usinagem, ao contrário de ligas com alto teor de Carbono, por exemplo; logo, para a remoção desta quantidade maior de cavaco precisar-se-á de ângulos de hélice mais abertos para o escoamento do material.

2.2.3.5 Geometria da aresta de corte

Para Black e Kosher (2008), durante a furação, quando há o contato da aresta transversal com a peça, ela tende a deslocar-se do ponto de furação desejado, movendo toda a broca consigo. Na solução deste problema, são necessárias ações complementares como a

utilização de pontas centrais na broca, remoção de rebarbas da usinagem e troca de ferramenta; fatores que diminuem a produtividade da operação.

Na busca de uma eficiência sempre maior da usinagem, é possível escolher o formato da ponta de corte da broca, ou seu tipo de afiação. Na Figura 13 estão os tipos de afiações possíveis com seus formatos e ao lado em detalhe o formato de cada flanco.

Figura 13 - Formatos da ponta de corte da broca

Tipo de afiação	Formato
Detalonado	
1 face	
3 faces	
Spiral point	
Ponta curva	
Center point	

Fonte: Mitsubishi Materials Corporation (2018).

Para o fabricante, a escolha da ponta de corte dependerá sobretudo do diâmetro da broca e da precisão necessária na furação, sendo o primeiro caso da figura o mais usado para furações no geral e o último o mais usado para furação em madeiras.

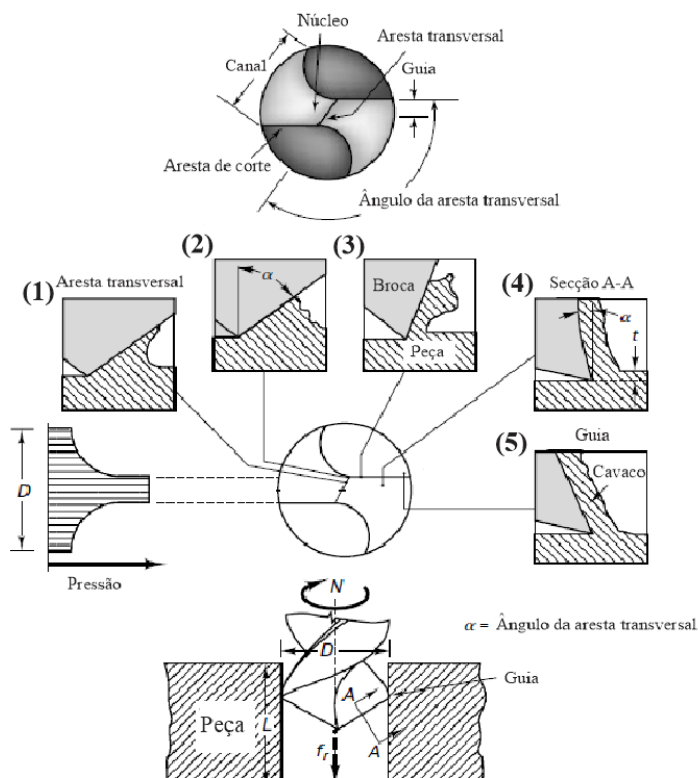
2.2.4 O cavaco na furação

2.2.4.1 O processo de retirada do cavaco

O percurso do cavaco pelas faces e pontas da ferramenta da peça também têm importância na compreensão da usinagem e na performance geral das ferramentas (TRENT; WRIGHT, 2000).

Na Figura 14 têm-se a ponta de corte da broca e nos detalhes de uma a cinco os momentos mais importantes na retirada do cavaco da peça. Ainda é possível observar qual a utilização de cada parte da aresta de corte e aresta transversal nestes momentos.

Figura 14 - Processo de retirada do cavaco



Fonte: Black e Kosher (2008).

No detalhe (1) é possível observar o início do contato peça-ferramenta, onde a aresta transversal é a responsável pelo início da furação. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), neste momento inicial, o material que formará o cavaco, ainda unido à peça, pressiona a superfície da aresta transversal e começa a ser deformado elástica e plasticamente.

No detalhe (2), na continuação do corte, é possível observar que o ângulo entre o cavaco e a peça é igual ao ângulo da aresta transversal. Este material que formará o cavaco continuará a ser deformado progressivamente na usinagem até que seja atingido seu estado de cisalhamento, que para Machado et al. (2009), é o momento em que algum critério da natureza do material, como limite de fragilidade ou de ductibilidade, é superado pela combinação de tensões atuantes na peça.

No detalhe (3), o corte já está sendo realizado totalmente pela aresta de corte da broca. Também é possível notar uma maior deformação plástica do material peça-cavaco em comparação com o detalhe (1). Ferraresi (1977) explica que neste momento o material pode sofrer uma ruptura parcial ou completa, que será definida por suas características de ductibilidade e das condições de usinagem: em materiais altamente deformáveis formar-se-á o cavaco do tipo contínuo e para materiais frágeis será formado o cavaco de cisalhamento ou de ruptura.

No detalhe (4) nota-se o momento onde a ponta de corte da ferramenta, ou guia, responsável pela usinagem diametral, entra em contato com a peça. Black e Kosher (2008) esclarecem que, na furação, a largura do furo (t) usinado por esta parte da ferramenta é igual à metade do avanço da broca (fr).

No detalhe (5), que mostra o fim do ciclo, o material deformado e cisalhado escorrega sobre a superfície de saída da broca, ao mesmo tempo em que uma nova porção está sendo formada e cisalhada, repetindo o processo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Por fim, ainda é possível ver, abaixo do detalhe (1), o gráfico de Pressão ao longo do diâmetro (D), o qual mostra que a aresta transversal é a parte da ferramenta que mais sofre esforços oriundos da pressão, o que acarreta em um maior número de falhas nesta região da ferramenta.

2.2.4.2 Tipos de cavaco de furação

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), problemas práticos podem relacionar-se com a forma do cavaco que é produzido na usinagem. Tais como o comprometimento da segurança do operador; danos à ferramenta; problemas no manuseio/armazenagem do cavaco e aumento dos esforços de corte, os quais levam ao encurtamento da vida da ferramenta.

Machado et al. (2009) classificam o material da peça como o mais influente na forma e tipo de cavaco, seguido pelo avanço da ferramenta e profundidade de corte. Os autores ainda comentam que o cavaco de forma longa é o que mais causa problemas à segurança e produtividade da usinagem.

De modo geral, pode-se classificar o cavaco em três tipos, conforme explicado por Ferraresi (1977). Abaixo está esta classificação mais comum e uma breve descrição dos materiais, que quando usinados, apresentam tal forma de cavaco:

- Cavaco contínuo: É formado na usinagem de materiais dúcteis e homogêneos, sob um pequeno ou médio avanço e sem a presença de vibrações tanto externas quanto na superfície de saída da ferramenta;
- Cavaco de cisalhamento: É formado quando são empregados altos avanços juntamente com velocidades de corte pequenas, inferiores a 100m/min, e ângulos de saída pequenos. Normalmente são encontrados quando há uma diminuição da resistência do material devido à maiores deformações, presença de vibrações externas na usinagem e heterogeneidade na composição química da superfície de usinagem;
- Cavaco de ruptura: É formado durante a usinagem de materiais frágeis ou de estrutura química heterogênea.

Na Figura 15 têm-se os tipos e formas dos cavacos encontrados no processo de furação e é mostrada uma breve descrição para cada um.

Figura 15 - Cavacos da furação

Tipos de Cavacos	Formato	Características
Espiral cônico		À medida que é cortado pela aresta, o cavaco é enrolado no canal da broca. Este tipo de cavaco é comum na usinagem de materiais dúcteis com baixos avanços. A expulsão de cavacos é satisfatória quando o cavaco se rompe com algumas voltas.
Passo longo		Cavaco alongado, geralmente formado na usinagem de materiais maleáveis. Não ocorre o enrolamento do cavaco no canal, sendo expulso da forma como é cortado pela aresta. Este tipo de cavaco pode causar problemas como emaranhamento em torno da broca.
Virgula		Este é um tipo de cavaco gerado pela restrição causada pelo canal da broca e a parede do furo usinado. É gerado quando a taxa de avanço é alta.
Fragmento cônico		Forma-se inicialmente como um cavaco tipo espiral cônico, mas com a limitação da parede do furo usinado, é quebrado antes de se alongar devido à baixa ductilidade do material. Excelente controle e expulsão de cavacos.
Leque		Cavaco com geometria tipo zigue-zague (com dobras) devido às características do material usinado e à geometria do canal. Este tipo de cavaco pode causar obstrução no canal.
Aguilha		Este tipo de cavaco é formado quando o material é frágil ou quando o raio de enrolamento do cavaco é muito pequeno, rompendo-se com as vibrações. A expulsão de cavacos é relativamente boa, mas pode causar obstrução no canal.

Fonte: Mitsubishi Materials Corporation (2018).

2.2.5 Movimentos e velocidades de corte e avanço

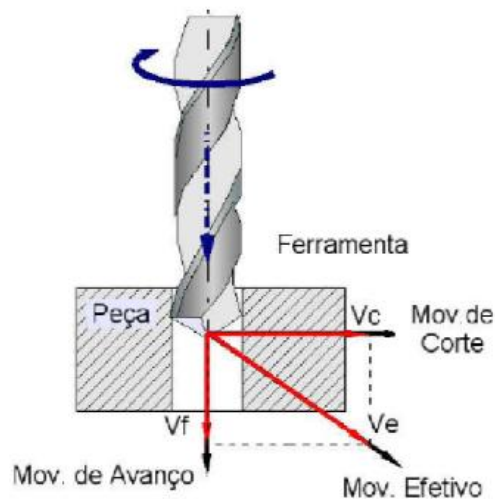
Como já comentado, os parâmetros de usinagem devem ser muito bem definidos para a obtenção de usinagens mais eficientes, obtenção de peças com melhores acabamentos e o prolongamento da vida das ferramentas de corte.

Um dos princípios usados em todas as máquina-ferramenta na usinagem é a utilização de movimentos relativos entre peça-ferramenta. Destes, os movimentos que influenciam diretamente a retirada do cavaco da peça são o movimento de corte e o de avanço. Sendo sua soma vetorial representada como o movimento efetivo de corte. (MACHADO et al., 2009).

Diniz, Marcondes e Coppini (2013) descrevem que o movimento de corte resulta da movimentação entre peça e ferramenta e sem o movimento de avanço resulta em uma remoção única de cavaco, durante uma única volta da ferramenta. Já o movimento de avanço, é definido como a movimentação peça-ferramenta e que em conjunto com o movimento de corte resulta na remoção contínua de cavaco da peça.

Na Figura 16 têm-se estes movimentos, suas direções de corte e sua respectivas velocidades no processo de furação.

Figura 16 - Movimentos de corte e avanço



Fonte: Geocities (2018).

Machado et al. (2009) e Diniz, Marcondes e Coppini (2013) definem as velocidades de corte (V_c) e avanço (V_f) como velocidades instantâneas entre pontos de referência iguais mas sob planos de movimentação diferentes. Definem ainda as equações destas velocidades como é mostrado abaixo, respectivamente:

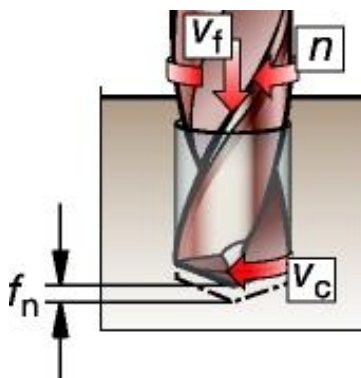
$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000 \times 60} \quad (1)$$

$$V_f = \frac{n \cdot f_z \cdot Z}{1000} \quad (2)$$

Onde: d é o diâmetro da peça em mm; f_z é o avanço por dente (mm); Z é o número de dentes e n é o número de rotações por minuto (rpm).

Na Figura 17 é possível ver as direções das velocidades de corte e avanço, além de outros parâmetros do processo de furação: a rotação do eixo (n) e o avanço (f_n) da ferramenta.

Figura 17 - Velocidades, rotação e avanço da broca na furação



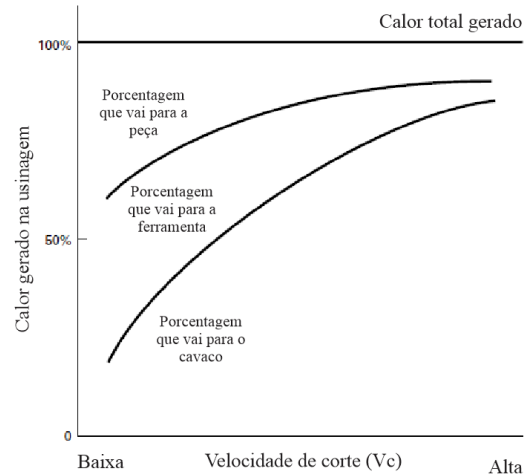
Fonte: Sandvik Coromant (2018).

Wrublak et al. (2008) avalia que através do aumento do movimento de avanço da ferramenta pode-se diminuir o consumo de potência do motor através do aumento da espessura média do cavaco. Ainda comenta que este parâmetro está diretamente conectado com o acabamento da peça e para operações de acabamento deve ser aplicado com um valor baixo e somado à uma velocidade de corte alta.

Os autores explicam que a velocidade de corte está conectada com a potência consumida na usinagem e com a vida da ferramenta. Durante a operação de desbaste, por exemplo, ela deve apresentar um valor mais baixo do que na etapa de acabamento, já que aumentará a vida da ferramenta sem prejudicar a eficiência do processo e sem ampliar demasiadamente os valores totais de potência consumida.

O aumento da velocidade de corte ainda está relacionado com o aumento do calor absorvido pelo cavaco durante sua formação, e a diminuição do calor absorvido pela ferramenta (BLACK; KOSHER, 2008), como é possível depreender da Figura 18.

Figura 18 - Distribuição de calor na usinagem



Fonte: Black e Kosher (2008).

2.2.6 Potência e forças de usinagem

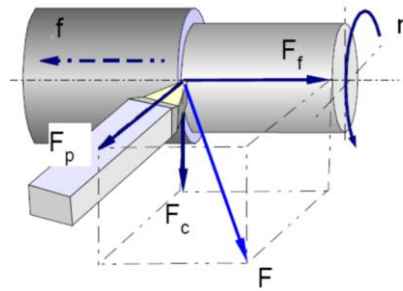
A força de usinagem é a soma de todas as forças atuantes sob a cunha de corte da ferramenta durante a usinagem (FERRARESI, 1977). É possível afirmar que todos os fatores que levam à um melhor deslizamento do cavaco na superfície da aresta de corte da ferramenta atuam diretamente à diminuição das forças de usinagem, dentre eles podem-se citar os fatores presentes na interface ferramenta-cavaco e a resistência mecânica do material da peça (MACHADO et al., 2009).

Machado et al. (2009) e Ferraresi (1977) classificam os três componentes básicos da Força de usinagem como descrito abaixo e comentam que estes são os únicos contribuintes na Potência de usinagem:

- Força de avanço (F_f): É a projeção da Força de usinagem sobre o plano de trabalho e na direção da velocidade de avanço;
- Força de corte (F_c): É a projeção da Força de usinagem na direção da velocidade de corte, sobre o plano de trabalho da ferramenta;
- Força passiva (F_p) ou Força de apoio (F_{ap}): É a projeção da Força de usinagem perpendicularmente ao plano de trabalho;

Na Figura 19 pode-se identificar a Força de usinagem (F) e seus componentes vetoriais.

Figura 19 - Componentes da Força de usinagem



Fonte: Geocities (2018).

Onde: F é a Força de usinagem; F_c é a Força de corte; F_f é a força de avanço; F_p é a Força passiva; n é a rotação e f é o avanço da ferramenta.

O conjunto máquina-ferramenta deve gerar potência para fazer girar seu eixo-árvore e executar os movimentos de corte e avanço da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). No processo de usinagem, as potências necessárias são resultantes de produtos das componentes da força de usinagem com as componentes da velocidade efetiva da ferramenta (FERRARESI, 1977).

Abaixo estão as fórmulas das Potências de corte (N_c), Potência de avanço (N_a) e Potência efetiva de corte (N_e):

$$N_c = \frac{P \cdot v}{60 \cdot 10^3} \quad (3)$$

Onde: N_c é a potência de corte em KW, P é a Força de corte em Newton, v é a velocidade de corte em metros por minuto.

$$N_a = \frac{P_a \cdot v_a}{60 \cdot 10^3} \quad (4)$$

Onde: N_a é a potência de avanço em KW, P_a é a força de avanço em Newton, v_a é a velocidade de avanço em metros por minuto.

$$N_e = N_a + N_c \quad (5)$$

Onde: N_e é a potência efetiva de corte em KW, N_a é a potência de avanço em KW, N_c é a potência de corte em KW.

Ferraresi (1977) explica que para muitos processos de usinagem a Potência efetiva de corte (N_e) pode ser aproximada apenas pelo valor da Potência de corte (N_c). Porém para processos como fresamento, retificação e furação vale o estudo da relação N_c/N_a . Com esta consideração satisfeita, têm-se que a Potência fornecida pelo motor (N_m) é dada como está a seguir:

$$N_m = \frac{N_c}{\eta} \quad (6)$$

Onde: N_m é a potência fornecida pelo motor em KW, N_c é a potência efetiva de corte em KW, η é o rendimento da máquina.

Diniz, Marcondes e Coppini (2013) explicam que o valor de η em máquinas CNC é maior que 90% e para outras máquinas convencionais varia de 60 a 80%.

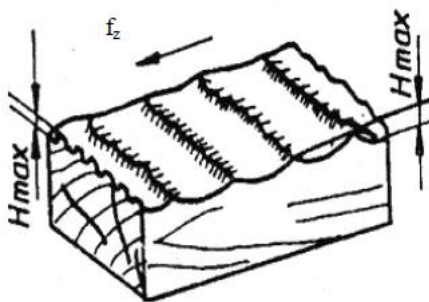
2.2.7 Rugosidade

2.2.7.1 Definição

Na indústria manufatureira, a rugosidade é usada como parâmetro de saída, ajudando a controlar o processo de usinagem. Machado et al. (2009) analisam que a rugosidade de uma peça é tida como uma composição de defeitos ou irregularidades finas e microgeométricas em sua superfície. Tais imperfeições são resultante do processo de corte, sendo alguns exemplos as marcas de avanço e presença de marcas de avarias da ferramenta.

Na Figura 20 é possível identificar marcas de avanço na superfície da peça de madeira, resultantes do avanço da ferramenta (f_z), depreendendo-se que tais marcas não são homogêneas, possuindo perfis e alturas máximas (H_{max}) diferentes.

Figura 20 - Falhas superficiais da madeira oriundas da usinagem



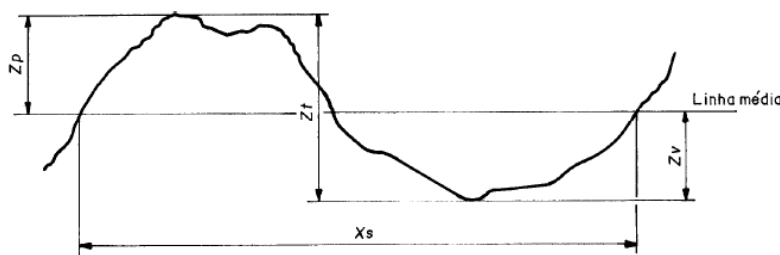
Fonte: Lucas Filho (2004).

Para Lemaster e Beall (1996), os fatores oriundos do processamento que mais afetam a rugosidade de uma peça são a imprecisão e vibração do conjunto máquina-ferramenta, condições da ferramenta e sua geometria de corte.

Através da usinagem, a camada superficial da peça é modificada, podendo ser alteradas sua composição química e dureza. Este efeito dependerá de características do processo e do material da peça, mas sabe-se que quão mais dúctil é um material, maior será esta modificação (FERRARESI, 1977).

Na Figura 21 é possível identificar os principais elementos de um perfil de rugosidade como as profundidades de vales (Z_v), alturas de picos (Z_p), a largura do perfil (X_s) e a altura total (Z_t) do perfil.

Figura 21 - Elementos de um perfil de rugosidade



Fonte: ABNT - NBR ISO 4287 (2002).

Onde: Z_p é a altura de pico do perfil; Z_v é a profundidade de vale do perfil; Z_t é a altura total do elemento do perfil; X_s é a largura do elemento do perfil.

Dos parâmetros existentes para medição de rugosidade, foram usados neste trabalho a Rugosidade aritmética média (R_a) e Rugosidade total (R_t) da superfície. Sendo estes, portanto, aqueles que serão discutidos posteriormente nesta revisão.

Muitos autores e normas, como Ferraresi (1977), Machado et al. (2009), FORM (Talysurf Series Operator's Handbook) e ABNT, dividem os parâmetros que avaliam a rugosidade como mostrado a seguir:

- Parâmetros de amplitude: compostos pelas alturas dos picos e/ou vales dos perfis, sem considerar os espaçamentos entre eles;
- Parâmetros de espaço: compostos desta vez pelos espaçamentos entre o perfil e seus desvios, sem contar sua altura;
- Parâmetros híbridos: aqueles que são combinações dos dois tipos acima descritos.

No Quadro 1 estão os parâmetros de avaliação da rugosidade mais usados e suas definições.

Quadro 1 - Parâmetros de avaliação de rugosidade

<i>Símbolo</i>	<i>Nome</i>	<i>Definição</i>
R_a	<i>Desvio aritmético médio</i>	<i>Média aritmética dos valores absolutos das alturas no comprimento de amostragem.</i>
R_q	<i>Desvio médio quadrático</i>	<i>Raiz quadrada da média dos valores das alturas no comprimento de amostragem.</i>
R_t	<i>Altura total do perfil</i>	<i>Soma da maior altura de pico com a maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação.</i>
R_{z^*}	<i>Altura máxima do perfil</i>	<i>Soma da altura máxima de pico com a profundidade máxima de vale no comprimento de amostragem.</i>
R_{sk}	<i>Fator de assimetria do perfil (skewness)</i>	<i>Quociente entre o valor médio dos valores das alturas e R_q ao cubo, no comprimento de amostragem.</i>
R_{ku}	<i>Fator de achatamento do perfil</i>	<i>Quociente entre o valor médio dos valores das alturas mais R_q à quarta potência no comprimento de amostragem.</i>

Fonte: Machado et al. (2009).

Lemaster e Beall (1996) explicam que algumas características da superfície de produtos à base de madeira podem afetar a textura da superfície, sendo elas o teor de resina e fatores do processo de fabricação (tamanho e mistura das partículas, temperatura, pressão e tempo de prensagem do painel).

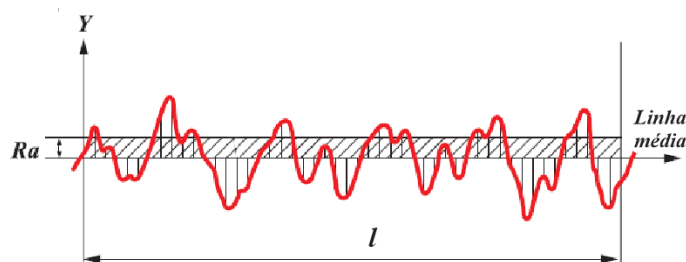
2.2.7.2 Rugosidade aritmética média (R_a)

A Norma NBR ISO 4287 (2002) define a rugosidade aritmética média do perfil como a média dos valores absolutos das alturas, ou $Z(x)$, no comprimento de amostragem (l). Sua equação é dada a seguir:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (7)$$

Na Figura 22 têm-se visualmente a diferença entre a rugosidade R_a de um perfil e a linha média deste.

Figura 22 - Rugosidade aritmética média



Fonte: Mitsubishi Materials Corporation (2018).

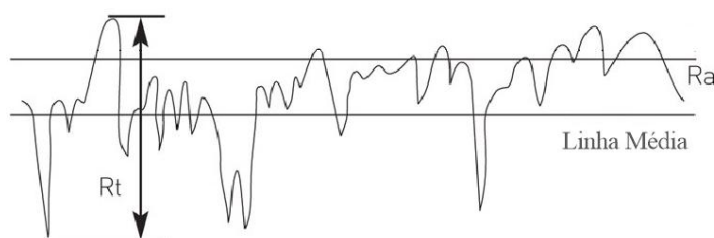
Machado et al. (2009) ainda comentam que dentre os parâmetros de amplitude disponíveis, a Rugosidade aritmética média (R_a) é a mais utilizada para controle de processos na indústria, tendo que alterações na usinagem já são mostradas por ela.

2.2.7.3 Rugosidade total (R_t)

A Norma NBR ISO 4287 (2002) define a rugosidade total (R_t) do perfil como a soma dos maiores Z_p (alturas de pico) com os maiores Z_v (profundidades de vale) dentro do comprimento de avaliação.

Este parâmetro deve ser utilizado quando há a necessidade de especificação da altura máxima da rugosidade, já que não é influenciado por quaisquer defeitos da superfície (MACHADO et al., 2009). Na Figura 23 têm-se visualmente a diferença entre as rugosidades utilizadas neste trabalho, R_t e R_a , com a linha média de um perfil.

Figura 23 - Rugosidade Total



Fonte: Hallite (2018).

2.2.7.4 Medição da rugosidade

Em sua tese de doutorado, Lucas Filho (2004) analisa o desempenho de processos de usinagem de madeira em nove fábricas deste ramo em Santa Catarina. Ele enaltece que a qualidade da superfície de uma peça de madeira é um dos principais influenciadores da qualidade final destes materiais. Isto se deve porque a madeira é usada para muitas finalidades estéticas, como a indústria moveleira no geral, e seu uso deve cumprir as normas de projeto relacionadas à este ramo. Alguns exemplos de limitantes da qualidade final são a obtenção de superfícies lisas, sem ondulações, que permitam a adesão de vernizes e tintas e a diminuição do aparecimento de manchas e lascamento da superfície, fatores oriundos do processo de usinagem.

O aparelho mais comumente empregado nas medições de rugosidade é o rugosímetro, onde a medição pode ser feita com ou sem o contato. Na medição com contato, a mais utilizada, um apalpador de diamante percorre uma linha reta pré-determinada (o comprimento de medição) e seu deslocamento vertical é registrado e convertido em sinais elétricos, que são usados posteriormente nos cálculos dos parâmetros de medição de rugosidade acima já descritos (MACHADO et al., 2009).

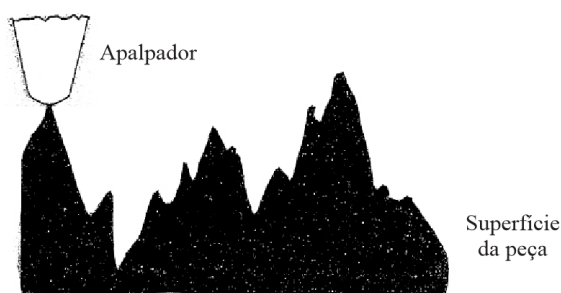
Nas Figuras 24 e 25 têm-se um rugosímetro com apalpador e o processo de medição do apalpador de diamante, respectivamente.

Figura 24 - Rugosímetro com apalpador



Fonte: Continental (2018).

Figura 25 - Medição do perfil de rugosidade pela apalpador



Fonte: Machado et al. (2009).

2.2.8 Usinagem de madeira

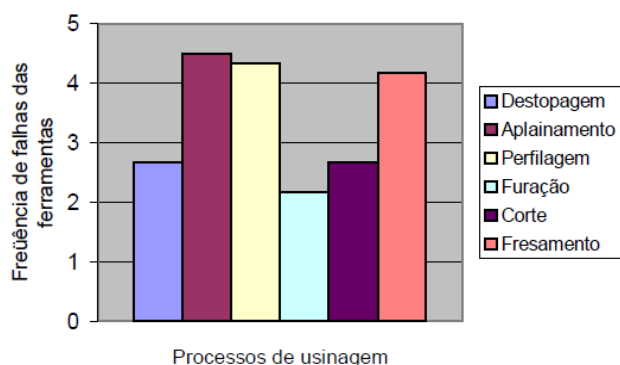
Segundo Lucas Filho (2004) cada processo de usinagem possui um tipo de defeito de ferramenta e um defeito de superfície mais frequente e mais comprometedor para as boas condições de usinagem e qualidade superficial. Com o conhecimento dos tipos de defeitos mais ocorrentes em cada processo, é possível identificar as causas e fatores de correlação para tais, melhorando assim a usinagem.

Nas Figuras 26 e 27 estão os processos de usinagem de madeira estudados pelo autor com a frequência de ocorrência de falhas de ferramentas, com escala de 1 a 5, (Figura 26) e a falha superficial de maior ocorrência para cada caso, com escala de 1 a 8, (Figura 27).

É importante mencionar que, em sua análise das variáveis relevantes para cada processo de usinagem (em seis tipos de madeira maciça), o autor utilizou de matrizes de correlação construídas através de um banco de dados montado com a participação das

empresas de Santa Catarina, onde cada variável estudada teve repetição de dez vezes em cada empresa.

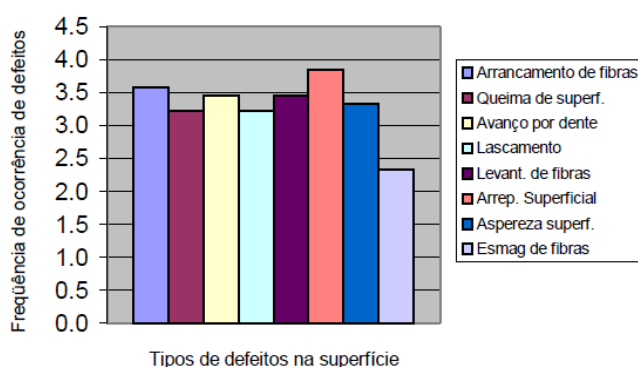
Figura 26 - Processos de usinagem de madeira com principais taxas de falhas de ferramentas



Fonte: Lucas Filho (2004).

É possível depreender da Figura 26 que o processo de furação é o que possui menor frequência de falhas das ferramentas, com taxa de aproximadamente dois de cinco, onde as principais falhas relatadas pelas empresas contribuintes foram a quebra ou lascamento da aresta principal de corte.

Figura 27 - Processos de usinagem de madeira com principais taxas de defeitos na superfície



Fonte: Lucas Filho (2004).

Na Figura 27 depreende-se que, para o processo de furação, o lascamento foi a principal falha superficial, com taxa de aproximadamente 3,25 de 8. Porém, as empresas do setor também identificaram o "arrepimento" superficial como o defeito mais frequente para todos os processos estudados, tornando sua avaliação também importante no presente estudo.

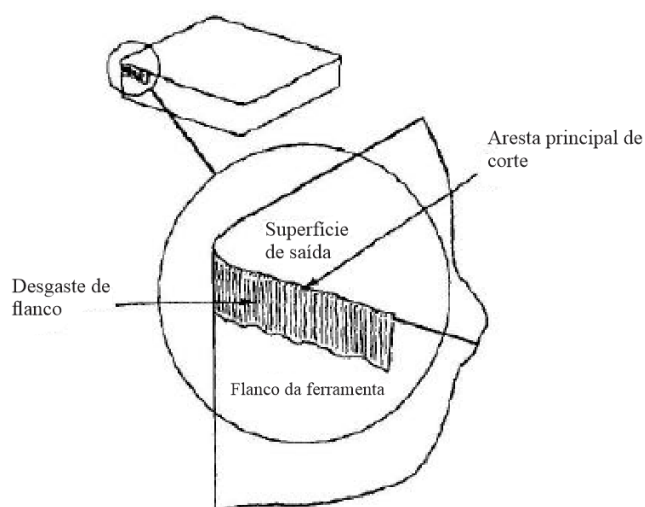
Em seu estudo, Lucas Filho (2004) concluiu que a velocidade de corte (V_c) e a massa específica da madeira (M_e) são as variáveis de maior importância para o processo de furação em madeira maciça. Todavia, em seus estudos, não foi possível computar a influência da velocidade de avanço (V_f), também muito importante nos estudos de usinagem.

2.2.9 Desgastes e avarias das ferramentas

O desgaste mais comum de ser encontrado em uma ferramenta é o desgaste de flanco, ou frontal, que é intensificado com o aumento da Velocidade de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Segundo Amorim (2002), este desgaste provoca aumento nas vibrações, temperaturas e forças envolvidas na usinagem; além de piorar o acabamento superficial da peça. Na Figura 28 observa-se a representação do desgaste de flanco em uma ferramenta de usinagem.

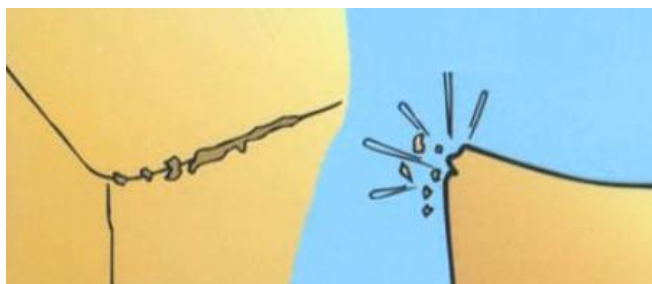
Figura 28 - Desgaste de flanco



Fonte: Amorim (2002).

Segundo Machado et al. (2009), mesmo quando as condições de usinagem não são abusivas ou inadequadas, também é possível que haja o aparecimento do lascamento da superfície da ferramenta, devido à condição de carregamento repetitivo à qual esta está exposta. Na Figura 29 está representado o lascamento da superfície de uma ferramenta.

Figura 29 - Lascamento da superfície



Fonte: Vasques (2018).

2.3 PAINEL DE MDF

2.3.1 Definição e matérias-primas

Um painel de madeira aglomerada é produzido a partir da união de partículas de madeira com resina sintética num prensa quente sob altas pressões e temperaturas, até a obtenção do produto final, matrizes randômicas (IWAKIRI, 2005).

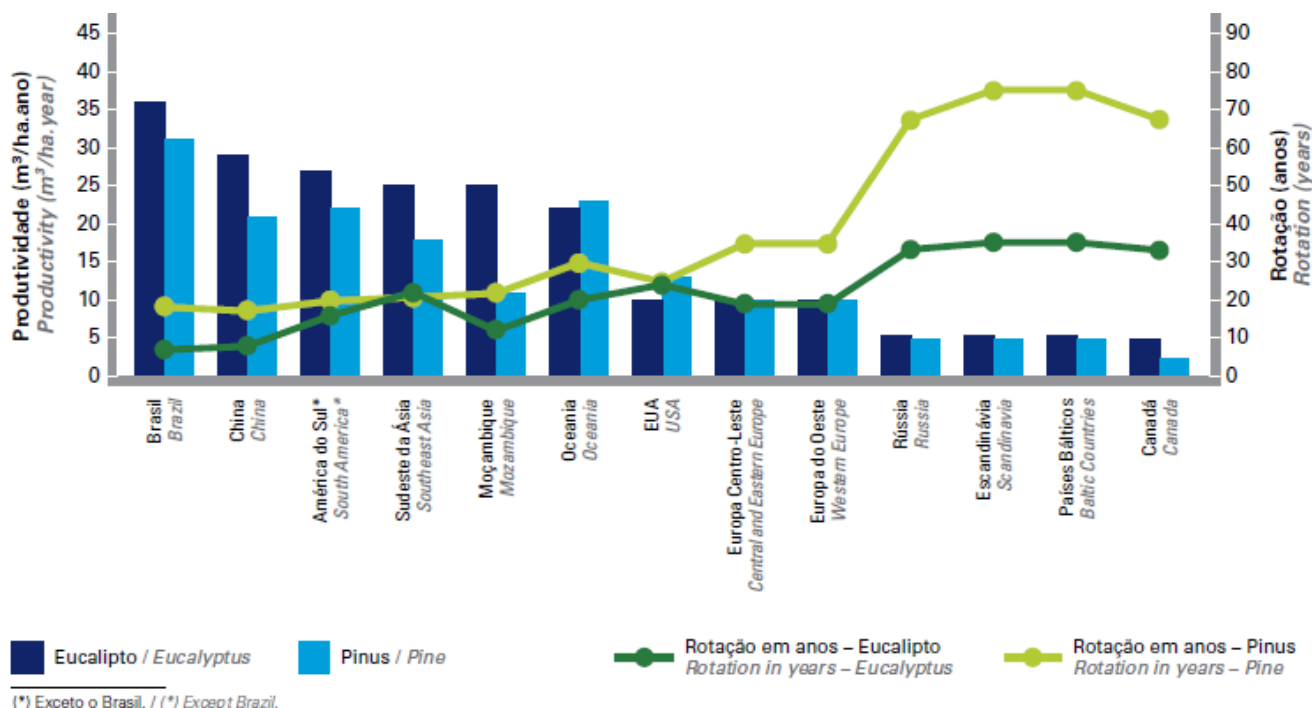
Entre os tipos de painéis aglomerados está o Medium Density Fiberboard (MDF), amplamente utilizado na indústria moveleira. Segundo Roberto, Tomazello e Bortoletto (2000), este painel pode ser definido como um painel fabricado a seco e feito com a união de fibras lignocelulósicas e resina sintética, ou outros ligantes, compactados em uma densidade de 0,50 a 0,80g/cm³ por prensagem a quente, onde a colagem entre estes materiais na prensagem é feita totalmente pela ação do adesivo empregado.

Segundo Castro e Gonçalves (1998), as madeiras mais utilizadas na produção de MDF são coníferas, em virtude de sua maior densidade, maior produtividade e melhor fragmentação, sem o consumo exacerbado de energia. Entretanto, o setor de árvores plantadas do país também detém uma grande parcela desta produção, onde os principais gêneros plantados são o *Eucalyptus sp* e *Pinus sp*. Segundo a ABIMCI - Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (2009), a produção de madeira serrada de coníferas, representou em torno de 30 a 41% da produção de folhosas, cuja produção conjunta esperada para 2008, seria de aproximadamente 25 milhões m³.

Segundo o relatório de 2017 da IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores, houve um aumento de 0,5% na área total de árvores plantadas no país de 2015 para 2016, chegando a 7,84 milhões, onde o *Eucalyptus sp* ocupa 5,7 milhões de hectares, enquanto o *Pinus sp* ocupa 1,6 milhão.

Ainda segundo a organização, o Brasil foi o líder mundial de produtividade e rotação média de plantações no setor em 2016, conforme pode-se verificar na Figura 30. Nos resultados do ano de 2018, no período de janeiro a julho, observa-se um saldo de importações/exportações de painéis de madeira de aproximadamente US\$ 6,8 milhões (norma FOB).

Figura 30 - Produtividade e rotação média do ano de 2016



Fonte: IBÁ; PÖYRY (2016).

Nota-se então a importância dos estudos científicos para as indústrias de painéis de madeira e de árvores plantadas, cuja maior dificuldade, segundo Lucas Filho (2004), é a influência do teor de sílica sobre as ferramentas de usinagem e sobre a produtividade dos processos em geral, sendo o principal fator na seleção e introdução de novas espécies de madeira para a fabricação de móveis.

2.3.2 Resinas e aditivos utilizados

Os tipos de resina mais utilizadas para a produção de MDF são as à base de ureia-formaldeído; melanina-ureia-formaldeído e tanino-formaldeído (CASTRO, 2000).

Iwakiri (2005) comenta que a resina de ureia-formaldeído é a mais utilizada nas indústrias de painéis de madeira, normalmente utilizada para a produção de móveis internos.

Caprara et al. (2005) realizaram estudos com quatro diferentes tipos de resinas (ureia-formaldeído (UF); melamina-ureia-formaldeído (MUF); fenol-melamina-ureia-formaldeído (PMUF); fenol-formaldeído (PF); e em duas densidades diferentes (0,7 e 1 g/cm³) em painéis aglomerados de alta densidade. Dentre suas conclusões, pode-se citar:

- Genericamente, as propriedades físicas e mecânicas dos painéis com resinas PMUF e PF (ambos com 1 g/cm³) foram superiores aos demais;
- Os painéis produzidos com resina PF (com 1 g/cm³) apresentaram módulos de elasticidade e ruptura superiores aos painéis de UF;
- Os painéis de MUF, PMUF e PF (todos com 1 g/cm³) apresentaram ligações internas superiores aos painéis de UF;
- Para o inchamento dos painéis, constatou-se que os de MUF, PMUF e PF (todos com 1 g/cm³) mostraram inchamento e espessuras menores que os painéis de UF (com 1 g/cm³). Isso se deve à presença de melamina e fenol na composição do UF;

Na Figura 31 estão alguns dos resultados encontrados pelos autores. Onde os dados seguidos de mesma letra correspondem à valores estatisticamente iguais em uma probabilidade de 95%.

Figura 31 - Resultados das ligações internas e módulos de elasticidade e ruptura para os painéis aglomerados

Tratamento	Resina	Densidade Nominal (g/cm ³)	Número painéis	Ligação interna (kgf/cm ²)	Módulo de elasticidade (kgf/cm ²)	Módulo de ruptura (kgf/cm ²)
T1	UF	0,70	3	9,99 A	21,393 A	147 A
T2	UF	1,00	3	11,96 AB	28,743 AB	220 AB
T3	MUF	1,00	3	16,76 B	29,694 AB	221 AB
T4	PMUF	1,00	3	16,17 B	28,521 AB	219 AB
T5	PF	1,00	3	15,39 B	35,594 B	282 B

Fonte: Caprara et al. (2005).

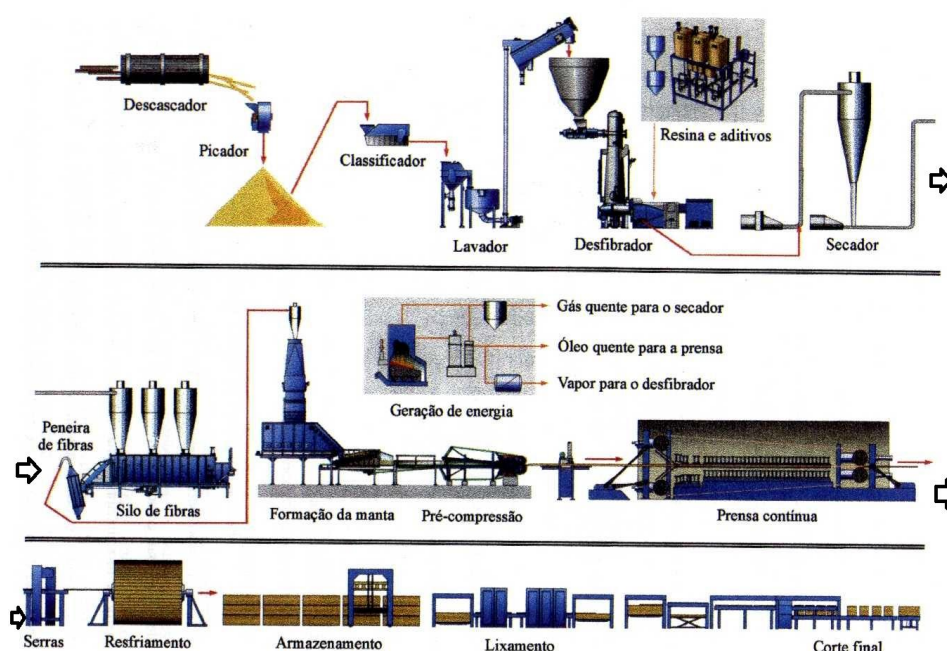
Os autores ainda comentam que a resina UF é restrita ao uso interno devido a sua baixa resistência à umidade, mas é utilizada em larga escala na produção de painéis. A melamina-formaldeído, por sua vez, é muito usada em painéis de alta densidade (HDF),

usados principalmente para pisos, devido à sua alta resistência à umidade. Resinas como isocianato (MDI) e PF são amplamente usadas em estruturas residenciais.

2.3.3 Produção de MDF

O processo produtivo de MDF está ilustrado na Figura 32 e suas etapas serão comentadas nos tópicos a seguir.

Figura 32 - Produção de MDF



Fonte: Dendrus (2018).

2.3.3.1 Descascamento

Esta etapa é responsável pela separação das cascas do restante da madeira no descascador. Na produção do MDF, elas poderão ser queimadas e usadas para geração de energia para as demais etapas, ou podem ser trituradas e incorporadas aos painéis, tudo dependerá da densidade e qualidade superficial esperadas (PEDRO [s.d.]).

O descascamento também é muito importante nas indústrias de manufatura à base de madeira, nela as dimensões das toras não influenciam o produto final (CAMPOS; LAHR, 2000). O processo de descascamento, segundo Iwakiri (2005), é importante também devido à

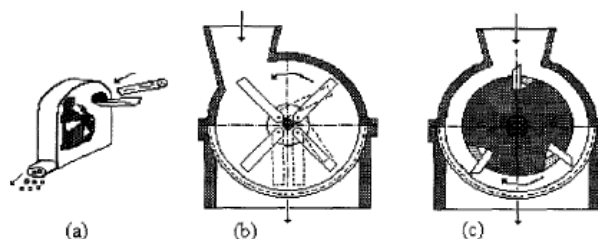
ação de isolante térmico da casca da tora, sua remoção diminui o tempo de aquecimento e a energia utilizada.

2.3.3.2 Fragmentação

Nesta etapa, as toras recém descascadas passam por picadores onde serão trituradas e transformadas em cavacos ou partículas (CAMPOS; LAHR, 2000).

Segundo Castro (2000), são usados picadores primários e secundários nesta etapa, onde os primeiros reduzem as toras em pedaços intermediários ou fragmentam resíduos maiores de madeira, enquanto os segundos já são utilizados para a produção dos resíduos finais. Caso seja necessária a produção de cavaco a partir de partículas mais grossas, pode ser usado o moinho de facas, um outro possível picador secundário. Na Figura 33 estão representados os três tipos de picadores comentados.

Figura 33 - Tipos de picadores do processo de fragmentação



Fonte: Castro (2000).

Onde: (a) é um triturador de facas (picador primário); (b) é um moinho de martelo (picador secundário); (c) é um moinho de facas (picador secundário para partículas grossas).

2.3.3.3 Classificação dos cavacos

Nesta etapa são usados detectores e separadores magnéticos de metais afim de serem reduzidos posteriores problemas operacionais. Também é usado um ciclone, que retira o pó do fluxo de ar e dos cavacos, os quais serão usados para a geração de energia para todo o processo produtivo (CASTRO, 2000).

Segundo Campos e Lahr (2000), nesta etapa também são separados os cavacos maiores através de baterias e peneiras, e estes retornam aos picadores para uma segunda fragmentação.

2.3.3.4 Armazenamento dos cavacos

Na etapa de armazenamento, são usados silos com volume suficiente para manter 24 horas de produção, caso haja problemas operacionais. Como normalmente o cavaco é armazenado a céu aberto, antes da continuação do processo, ele é peneirado novamente (CAMPOS; LAHR, 2000). Castro (2000) explica que esta precaução antes do prosseguimento pode dobrar a vida do desfibrador (ou refinador), aparelho usado na etapa de desfibramento.

2.3.3.5 Tratamento dos cavacos

Pedro (s.d.) comenta que na produção de MDF, esta etapa vem logo após o picador, sendo responsável pela lavagem do cavaco para a retirada de sílica (areia), prejudicial à qualidade final do produto, como já previamente ponderado neste trabalho por Lucas Filho (2004).

O autor ainda coloca que dentre as consequências da presença de altos teores de sílica no cavaco estão a complicação das posteriores etapas da produção, como a aplicação das resinas e aditivos; corrosão das tubulações de condução das fibras, atrapalhando na aglutinação destas; e também prejudicando a afiação das serras usadas na produção de MDF.

Este processo pode ser hidráulico ou térmico, onde a taxa de teor de umidade estabelecerá o tipo de processo escolhido: Para madeira recém-abatida por exemplo, com o teor de umidade entre 40 e 60%, é utilizado o processo térmico e para teores de umidade abaixo de 35%, é necessária a utilização do processo hidráulico, que ajusta o teor de umidade para facilitar a ação do desfibrador (CASTRO, 2000).

2.3.3.6 Desfibramento

Os desfibradores mecânicos trabalham lançando a mistura de cavaco umedecido para as periferias dos discos, compactando-o (CAMPOS; LAHR, 2000).

Além do teor de resina, a umidade dos cavacos antes desta etapa afeta grande parte das propriedades das fibras e painéis produzidos. No desfibramento é formada uma massa homogênea e fibrosa por força centrípeta, que após, terá sua umidade reduzida devido às grandes taxas de calor geradas (CASTRO, 2000).

2.3.3.7 Mistura da resina

Nesta etapa são adicionadas às resinas catalisadores e outros aditivos utilizados na matéria-prima (CAMPOS; LAHR, 2000). Esta adição é feita nas próprias tubulações de fluxo de fibras através de válvulas injetoras (CASTRO, 2000).

2.3.3.8 Secagem das fibras

Para a redução do teor de umidade, são utilizados secadores nesta etapa. A secagem é feita através da passagem de ar seco e quente em uma tubulação, que possui no final um separador que impedirá a presença deste ar nas posteriores etapas da produção (CASTRO, 2000).

2.3.3.9 Armazenamento das fibras

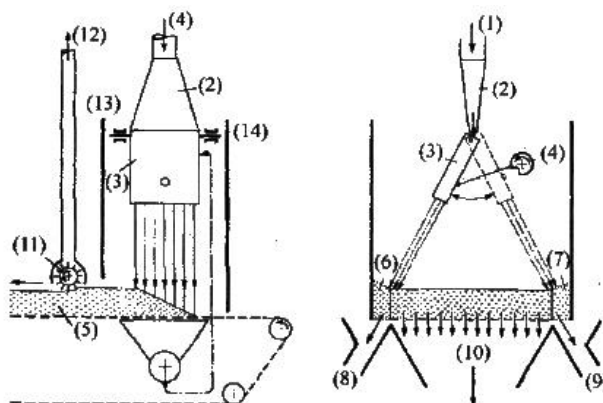
As fibras, já com baixo teor de umidade, são armazenadas em silos para a próxima etapa. Estes silos, também conhecidos como "tanques pulmões" devem conter volume suficiente para prevenir paradas no processo e garantir um fluxo estável de fibras para o processo (CASTRO, 2000).

2.3.3.10 Entrelaçamento das fibras

Para o entrelaçamento das fibras, é usado um equipamento que fabrica um colchão de fibras, através de um processo seco, onde as fibras são distribuídas uniformemente (PEDRO [s.d.]).

Este equipamento, representado na Figura 34, possui um bico de descarga que descarrega as fibras sob uma cinta porosa, que avança continuamente. Ainda está presente no fundo do equipamento, um sistema de sucção a qual as mantêm unidas.

Figura 34 - Esquema de um entrelaçador de fibras



Fonte: Castro (2000).

Onde: (1) é o alimentador; (2) é o funil; (3) é o despejador oscilante; (4) é o acionamento por came; (5) é a cinta de avanço; (6) e (7) são excessos laterais de fibras; (8) e (9) são dutos de sucção; (10) é a caixa principal de sucção; (11) são rolos dentados; (12) representa o retorno dos excessos de fibras; (13) e (14) são estruturas do sistema.

2.3.3.11 Seccionamento

Esta etapa dependerá do tipo de linha de formação do MDF. Caso a secagem seja intermitente, a manta do processo anterior é cortada por lâminas circulares (CAMPOS; LAHR, 2000), nos casos onde o sistema de prensagem é contínuo, as chapas serão cortadas apenas após a prensagem (CASTRO, 2000).

2.3.3.12 Prensagem

Segundo Castro (2000), existem três tipos de sistemas de prensagem e a pré-prensagem, que evita deslizamentos das fibras e desmanchamentos das mantas; a prensagem, por outro lado, é responsável pela cura da resina, enrijecendo o MDF.

Há ainda a injeção de vapor, que aquece a manta e proporciona uma maior eficiência de cura e capacitando a produção de chapas mais espessas (CASTRO, 2000).

2.3.3.13 Resfriamento

Cada linha de formação de MDF exigirá um tempo de resfriamento diferente, mas o resfriamento é sempre realizado à temperatura ambiente, com proteção do mau tempo, para que sejam evitadas variações dimensionais das chapas (CASTRO, 2000).

2.3.3.14 Corte, lixamento e revestimento

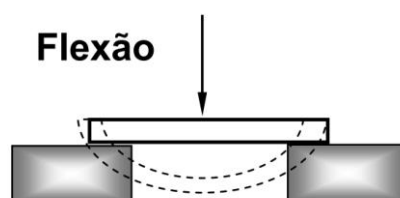
A última etapa do processo produtivo consiste no corte dos painéis, conforme padrões de cada empresa produtora, seguido do lixamento e revestimento, responsáveis em dar o acabamento superficial às chapas (CAMPOS; LAHR, 2000).

2.3.4 Características físicas e mecânicas

O MDF comercial pode ser classificado em standard; HDF; light e ultra-light. Os dois últimos são recomendados para projetos com redução de peso: 15 a 20% e 35 a 40%, respectivamente. O HDF (High Density Fiberboard) é usado em projetos onde elevadas características físico-mecânicas são necessárias, como projetos de pisos e escadas. O tipo standard é o usado na indústria moveleira no geral (CAMPOS; LAHR, 2000).

Como já mencionado, a grande maioria dos furos em processos de usinagem é realizado no processo de furação. Através da resistência à flexão de um corpo, pode-se avaliar a rigidez deste material durante o processo de abertura de um furo. Na Figura 35 têm-se a flexão de um material após a aplicação de um esforço central em sua superfície, ação que pode ser comparada à da broca durante os ensaios de usinagem deste trabalho.

Figura 35 - Flexão de um corpo

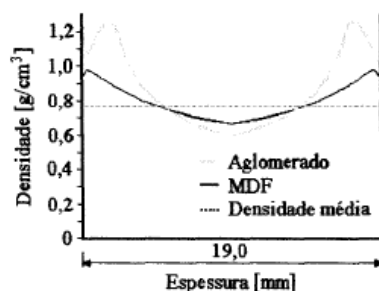


Fonte: Flexão (2018).

Uma outra característica importante dos MDFs é a maior densidade das faces em comparação com o interior, como explicam Roberto, Tomazello e Bortoletto (2000), essas

regiões de maiores densidades são as solicitadas sob esforços de flexão. Na Figura 36, está o comportamento genérico da densidade pela espessura dos painéis de MDF e aglomerado e uma densidade média; e na Figura 37 observam-se as faces superior e inferior, além da região interior dos corpos de prova utilizados.

Figura 36 - Densidade genérica do painel pela espessura



Fonte: Castro (2000).

Figura 37 - Camadas do MDF

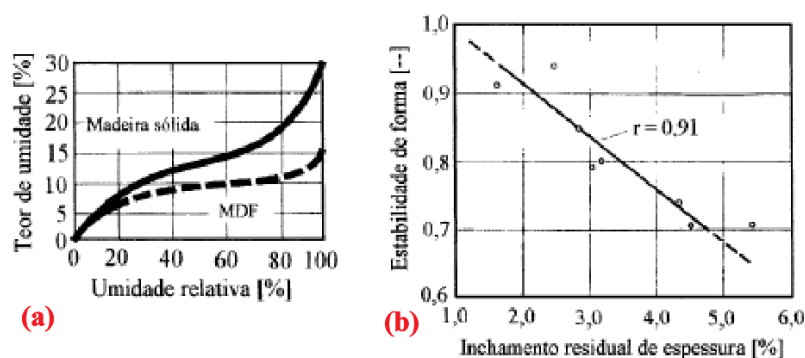


Fonte: Produção do próprio autor.

O inchamento e a umidade do painel são características importantes para o setor moveleiro e estão ligados à variações dimensionais dos painéis. Castro (2000) comenta que há a absorção de umidade do ar por parte dos materiais lignocelulósicos e esta absorção pode resultar no inchamento da superfície e, por fim, na diminuição da estabilidade dimensional (razão entre o volume de água absorvido e a expansão volumétrica do painel).

Na Figura 38 (a) têm-se o gráfico comparativo entre a absorção de umidade do ar pelo MDF e por madeira maciça e em (b) está a relação entre o inchamento na espessura do MDF e sua estabilidade de forma.

Figura 38 - (a) Umidade relativa absorvida entre madeira maciça e MDF (b) relação encontrada entre o inchamento residual da espessura do MDF e estabilidade de forma



Fonte: Castro (2000).

Observa-se da Figura 38 (a) que o MDF mostra-se menos propenso a absorver a umidade do ar do que a madeira, e da Figura 38 (b) que para inchamento de espessuras maiores, a instabilidade de forma do painel de MDF aumenta.

Roberto, Tomazello e Bortoletto (2000) ainda afirmam que as propriedades mecânicas do painel variam expressivamente com a variação de umidade, sendo que seu aumento resulta em reduções de resistência à ruptura; reduções na densidade; e diminuições dos módulos de elasticidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 USINAGEM

3.1.1 Materiais utilizados

Os materiais utilizados neste trabalho foram uma chapa de MDF comercial revestido com *finish foil* do tipo standard com 15,3mm de espessura e com densidade de $0,70\text{g/cm}^3$, cujas propriedades físico-mecânicas e hidrófobas são apresentadas no Quadro 2; e duas brocas de aço rápido de 5mm de diâmetro e sem revestimento, onde uma foi utilizada nos ensaios e a outra foi utilizada para posteriores comparações em microscópio.

Quadro 2 - Propriedades do MDF com 15mm espessura

<i>Variável</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>
<i>Resistência à tração perpendicular mínima</i>	kg/cm^2	5,6
<i>Resistência à flexão estática mínima</i>	kg/cm^2	205
<i>Inchamento máximo</i>	%	12
<i>Densidade mínima</i>	g/cm^3	0,67
<i>Módulo de elasticidade (MOE) mínimo</i>	MPa	~2201,6
<i>Umidade</i>	%	4 a 11

Fonte: Duratex S. A. (2018).

Na Figura 39 está a chapa comercial utilizada e na Figura 40, as brocas utilizadas.

Figura 39 - Chapa comercial de MDF utilizada



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 40 - Brocas de aço rápido sem revestimento



Fonte: Produção do próprio autor.

3.1.2 Produção dos corpos de prova

Para o corte da chapa, o apoio do Departamento de Materiais e Tecnologia do Campus de Guaratinguetá foi indispensável. Foi utilizada uma serra circular de mesa, uma trena e uma régua de mesa para a operação de corte, como pode ser observado na Figura 41.

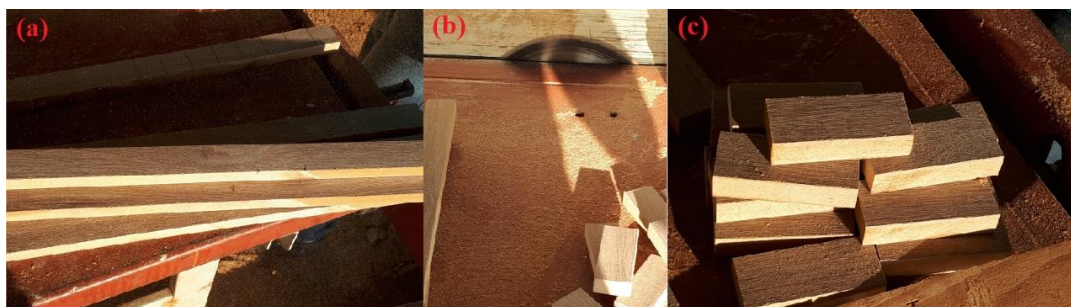
Figura 41 - Operação de corte da chapa de MDF



Fonte: Produção do próprio autor.

Em um primeiro momento, para facilidade da operação, a chapa foi cortada em tiras de mesma altura (a), e após, foi realizado o corte final para a fabricação dos corpos de prova (b). Na Figura 42 têm-se os passos da operação, sendo (c) uma representação dos corpos de prova prontos.

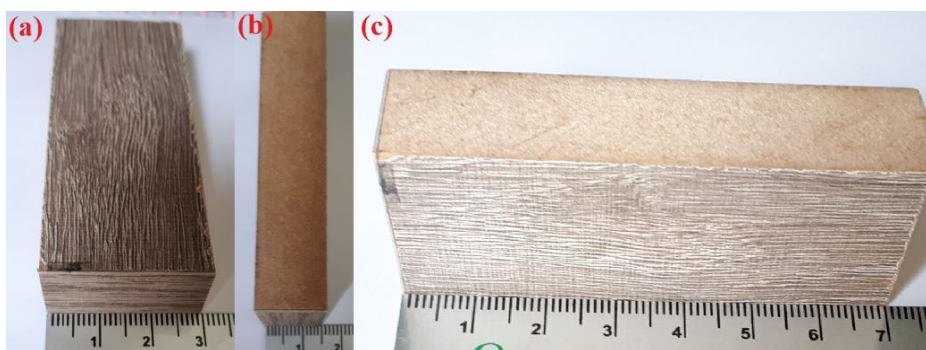
Figura 42 - Passos da operação de corte da chapa de MDF



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 43 pode-se validar as dimensões finais dos corpos de prova para as três dimensões com a ajuda de uma régua.

Figura 43 - Validação das dimensões finais dos corpos de prova



Fonte: Produção do próprio autor.

3.1.3 Equipamentos utilizados na usinagem

Para a usinagem dos corpos de prova foi utilizado o Centro de Usinagem CNC do Departamento de Materiais e Tecnologia do Campus de Guaratinguetá, a Central de Usinagem CNC DMU 50 *ecoline* do fabricante DMG CO. LTD, mostrado na Figura 44.

Figura 44 - CNC DMU 50 *ecoline*



Fonte: Produção do próprio autor.

Esta CNC possui 18kW de potência e rotação máxima de 8500rpm, valores que posteriormente mostrarão que a utilização deste equipamento é válida para a performance dos ensaios.

Para a coleta dos dados de potência axial consumida pelo motor durante o ensaio, foram usados sensores da marca LEM modelo AT 100 B10, conforme têm-se na Figura 45.

Figura 45 - Sensor de potência axial utilizado



Fonte: RS. (2018).

Segundo o fabricante LEM USA INC., o sensor possui desvio de 1,5% e é apropriado para medições da faixa de 50 a 60Hz. Foram desenvolvidos programas no *software* Labview, da National Instruments, para o armazenamento dos dados captados pelos sensores.

Para a coleta dos dados de vibração, utilizou-se um sensor piezelétrico, representado na Figura 46, e um amplificador de sinal de saída RMS da marca Vibro Control, modelo TV10, cujas características técnicas estão no Quadro 3.

Figura 46 - Sensor piezelétrico utilizado



Fonte: Produção do próprio autor.

Quadro 3 - Características técnicas do módulo de vibração RMS TV10

<i>Dimensões</i>	<i>Diâmetro: 35 mm Altura: 85 mm</i>
<i>Tensão de alimentação</i>	<i>24 VCC</i>
<i>Rosca para fixação do parafuso</i>	<i>5/16"</i>
<i>Corrente de saída</i>	<i>0 – 24 mA</i>
<i>Faixa de vibração</i>	<i>0 – 25 mm.s⁻¹ (RMS)</i>
<i>Faixa de frequência</i>	<i>10 – 1000 Hz</i>
<i>Faixa de temperatura nominal</i>	<i>-5 até +70°C</i>
<i>Massa do sensor</i>	<i>300 g</i>
<i>Material do invólucro</i>	<i>Aço inox</i>
<i>Grau de proteção</i>	<i>IP 67</i>

Fonte: VibroControl (2018).

Para a medição da força de avanço da ferramenta foi usada uma célula de carga da marca BERMAN *load cells*® e modelo TBSPL, de capacidade 25kg, representado na Figura

47 (b) abaixo da mesa de usinagem utilizada (a). No Quadro 4 estão dispostas as características técnicas da célula de carga TBSPL.

Quadro 4 - Características técnicas da célula de carga

<i>Capacidade máxima</i>	25 kg
<i>Dimensão máxima da plataforma</i>	350 x 350 mm
<i>Torque de aperto</i>	10 Nm
<i>Sensitividade</i>	$2,0 \pm 0,2 \text{ mV/V}$
<i>Grau de proteção</i>	IP 65
<i>Resistência elétrica de entrada</i>	$410 \pm 2 \text{ }\Omega$
<i>Resistência elétrica de saída</i>	$350 \pm 3 \text{ }\Omega$
<i>Faixa de temperatura nominal</i>	-20 até +60°C
<i>Limite de carga de segurança</i>	Até 150% da capacidade nominal
<i>Tensão recomendada de excitação</i>	10 VCC
<i>Tensão máxima de excitação</i>	15 VCC
<i>Material</i>	Alumínio

Fonte: BERMAN (2018).

Figura 47 - Célula de carga utilizada



Fonte: Produção do próprio autor.

Foi também utilizado um bloco de conectores e cabo de ligação da marca National Instruments, onde o modelo do bloco de conectores é NI BNC 2120 e o do cabo de ligação é SHC68-EPM, de 2m de extensão, 192061-02. A função do bloco é de realizar a interface entre os sinais captados pelos sensores acima descritos além dos sinais digitais dos ensaios e

enviar tais dados para a placa de aquisição de dados, a seguir especificada. O bloco de conectores está representado na Figura 48 e suas especificações técnicas estão no Quadro 5.

Quadro 5 - Características técnicas do bloco de conector NI BNC 2120

<i>Dimensões</i>	<i>267 x 112 x 59,7 mm</i>
<i>Massa aproximada</i>	<i>1 kg</i>
<i>Conector de E/S</i>	<i>68 pinos tipo macho SCSI-II</i>
<i>Nº de conectores tipo BNC</i>	<i>15</i>
<i>Nº de plugs tipo “screw”</i>	<i>31</i>
<i>Temperatura de operação</i>	<i>0 – 50 °C</i>

Fonte: National Instruments (2018).

Figura 48 - Bloco de conector utilizado



Fonte: Produção do próprio autor.

A placa de aquisição de dados utilizada, também da marca National Instruments, de modelo NI PCI 6220, tem a função de receber os sinais e transformá-los em sinais digitais para posterior interpretação do *software* utilizado nos ensaios (LabView[®] 7.1 da National Instruments). Dentro do *software* foi elaborado um programa de aquisição de dados com capacidade de 400 pontos por segundo.

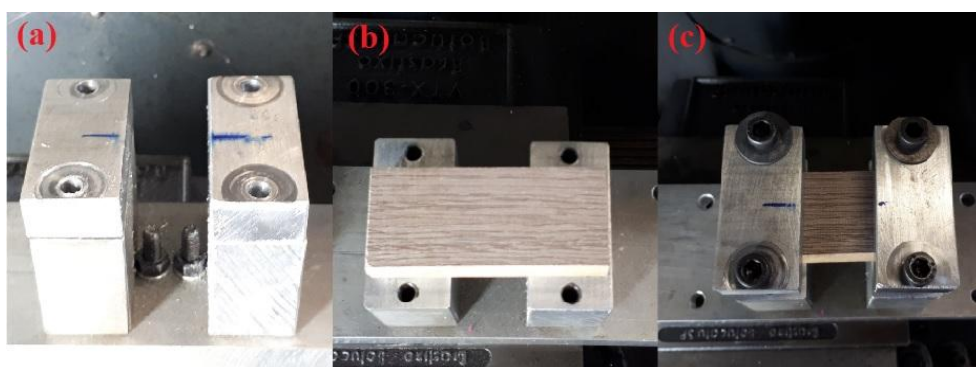
3.1.4 Usinagem dos corpos de prova

Para a usinagem dos corpos de prova, foi utilizada uma base metálica na Central CNC e utilizados parafusos Allen e arruelas superiores e inferiores para sua devida fixação. O tipo

de base utilizada visa a prevenção de flexões durante os ensaios, onde os parafusos foram dispostos com 25mm de distância entre si.

Na Figura 49 é mostrado o procedimento de fixação dos corpos de prova realizado em cada usinagem: em (a) mostra-se a base de fixação utilizada, com a devida marcação de linha média da altura; em (b) mostra-se o corpo de prova colocado em cima da base inferior; em (c) foram colocadas as bases superiores, com arruelas e parafusos Allen, portanto, têm-se o processo de fixação finalizado e pronto para o início da usinagem.

Figura 49 - Procedimento de fixação dos corpos de prova



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 50 têm-se a vista da Central CNC com a broca utilizada devidamente fixada no mandril e o procedimento de fixação do corpo de prova concluído.

Figura 50 - CNC no início das usinagens



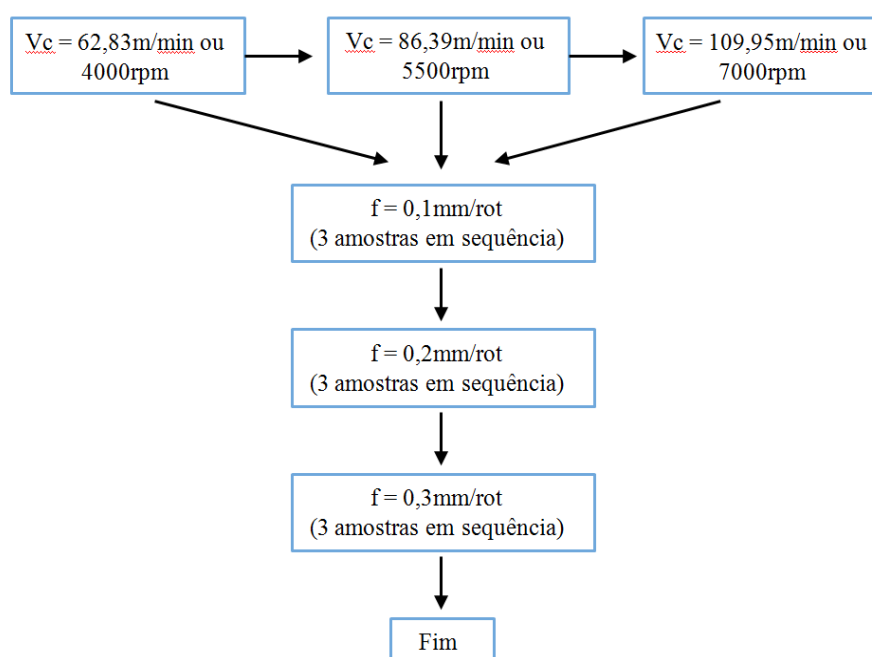
Fonte: Produção do próprio autor.

3.1.5 Metodologia de identificação dos ensaios e fluxograma de usinagem

Com o intuito de manter um padrão, o autor optou por adotar uma metodologia de classificação para os 27 corpos de prova, além de adotar também uma ordem de maior facilidade para a realização dos ensaios.

Por conveniência, ensaiaram-se, nesta ordem, três rotações diferentes 4000; 5500 e 7000 [rpm], as quais correspondem aos valores das velocidades de corte (V_c) da ferramenta de 62,83; 86,39 e 109,95 [m/min]; e variados os avanços (f) da ferramenta, que podiam ser de 0,1; 0,2 e 0,3 [mm/rot]; foram realizadas três amostras para cada caso estudado. A Figura 51 demonstra o fluxograma de usinagem realizado nos ensaios.

Figura 51 - Fluxograma dos ensaios



Fonte: Produção do próprio autor.

Visando uma maior eficiência para o estudo, os corpos de prova foram identificados com números de 1 a 27, respeitando a ordem de usinagem mostrada.

Em cada ensaio realizado, foram coletados os cavacos provenientes da usinagem com a ajuda de um pincel e estes foram armazenados em sacos plásticos com lacre para posterior visualização em microscópio. Porém, devido a sua natureza quebradiça e a formação de muito pó de madeira na usinagem, houve uma grande dificuldade na realização da avaliação microscópica.

3.2 AVALIAÇÃO MICROSCÓPICA DOS CORPOS DE PROVA

3.2.1 Equipamento utilizado

Para a realização da avaliação microscópica, foi usado neste trabalho o microscópio óptico da marca Carl Zeiss modelo Stemi 2000, representado na Figura 52 e seu *software* de computador MARCONNECT MARCOM PROF. 5.2 SOFTWARE INTERFACE.

Figura 54 - Microscópio óptico Carl Zeiss



Fonte: Produção do próprio autor.

Foram analisadas as superfícies internas dos furos e superfícies externas dos 27 corpos de prova ensaiados. Durante esta observação, as medidas dos maiores lascamentos superficiais foram tiradas e serão usadas como parâmetros de estudo deste documento.

3.2.2 Avaliação do arrepimento da superfície interna

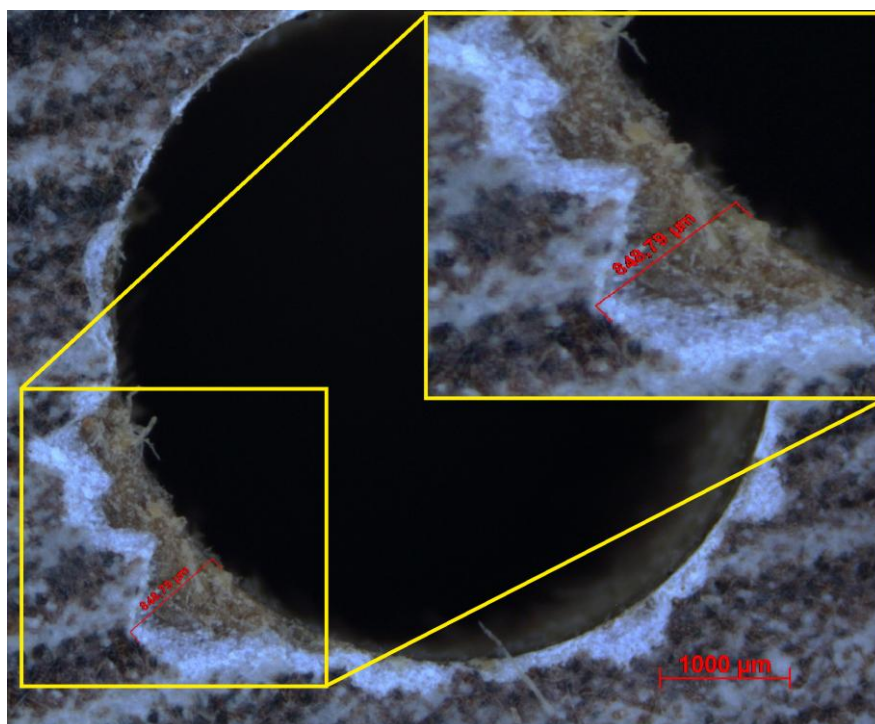
Como já comentado, o arrepimento superficial é um dos maiores defeitos superficiais das peças de madeira e é encontrado na maior parte das operações de usinagem, segundo Lucas Filho (2004).

Em virtude da profundidade dos furos usinados, foi estudado o arrepimento superficial interno das extremidades dos corpos de prova. Neste estudo, deixou-se de lado a análise quantitativa deste fator, sendo os resultados das imagens captadas avaliados a olho nu.

3.2.3 Avaliação do lascamento superficial

Para a medição do lascamento máximo superficial de cada ensaio, foi utilizado o *software* AxioVision e medida a distância em linha reta do início do furo até a extremidade da superfície que apresentou maior lascamento, em uma observação a olho nu, conforme depende-se da Figura 53.

Figura 53 - Medição do lascamento máximo superficial



Fonte: Produção do próprio autor.

3.3 AVALIAÇÃO MICROSCÓPICA DAS BROCAS

3.3.1 Equipamento utilizado

Para a realização da avaliação da vida da ferramenta e desgaste qualitativo das brocas, foi utilizado o Microscópio de medição da marca Mahr modelo MarVision MM200, representado na Figura 54, onde foram medidas ambas as arestas de corte da ferramenta e

tirado um valor médio para o desgaste de flanco após a realização de todas as usinagens deste trabalho.

Figura 54 - Microscópio de medição Mahr



Fonte: Produção do próprio autor.

3.3.2 Medição do desgaste da ferramenta

Para a medição do desgaste qualitativo da broca, mediu-se através do Microscópio de medição o desgaste de flanco encontrado nas duas arestas de corte da ferramenta e feita a média destes valores.

3.4 MEDIÇÃO EXPERIMENTAL DIAMETRAL DOS CORPOS DE PROVA

3.4.1 Instrumentos utilizados

Na medição experimental dos furos usinados, foram utilizados dois estojos com pinos padrões que variavam de 4 até 5mm e de 5mm até 6mm, com precisão de 0,01mm, mostrados na Figura 55.

Figura 55 - Estojos de pinos padrão utilizados



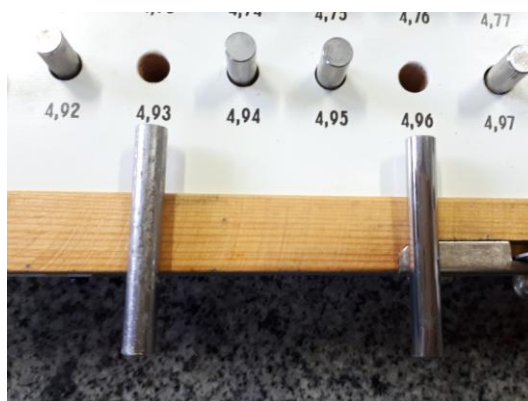
Fonte: Produção do próprio autor.

3.4.2 Limpeza

Para uma precisão maior na avaliação, os pinos utilizados foram limpos com ÁLCOOL ETÍLICO ABSOLUTO P.A. ACS 1L e algodão, pois em seu armazenamento, é necessária a aplicação de substâncias de prevenção à corrosão.

Na Figura 56 está uma comparação entre dois pinos, um já limpo e o outro não. É possível verificar visualmente na figura a presença de uma camada de resíduos na superfície do pino de 4,93mm, enquanto observa-se um maior brilho e menor presença de rugosidade no pino de 4,96mm.

Figura 56 - Limpeza dos pinos utilizados



Fonte: Produção do próprio autor.

3.4.3 Definição da metodologia de medição

Como a medição experimental está disposta à ocorrência de erros de medição e erros subjetivos, adotou-se uma metodologia de medição dos furos, com o intuito de minimizar tais ocorrências.

Após a limpeza adequada dos pinos que seriam utilizados, adotou-se o seguinte critério para a avaliação:

- Escolha do pino de 5mm para uma primeira tentativa de medição;
- Caso o pino não entrasse, ou ficasse folgado, escolher-se-ia o pino logo abaixo, ou logo acima, respectivamente;
- O pino a determinar o diâmetro para o furo seria aquele que pudesse entrar neste com um certo aperto, mas que não demonstrasse grande dificuldade em sua retirada.

Na Figura 57 está uma medição realizada com um pino sob o corpo de prova de número 1, com Velocidade de corte (V_c) de 62,83m/min e avanço (f) de 0,1mm/rot.

Figura 57 - Exemplo de medição



Fonte: Produção do próprio autor.

3.5 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE

3.5.1 Corte dos corpos de prova

Com a finalização da medição experimental dos pinos e término da avaliação microscópica, os corpos de prova foram serrados transversalmente para a medição da rugosidade dos furos.

Foi utilizada uma serra de fita vertical do fabricante ROMARFRA IND. E COM. LTDA modelo RMF.400-S, representado na Figura 58, disponível no Departamento de Materiais e Tecnologia do Campus de Guaratinguetá.

Figura 58 - Serra de fita vertical RMF.400-S



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 59 têm-se a sequência de passos na operação de corte transversal, onde (a) representa a serra de fita; (b) representa o início do corte do corpo de prova, onde optou-se por cortar-se os furos da forma mais centralizada possível; e em (c) têm-se alguns dos corpos de prova finalizados, com marcação de seu número em ambos os lados.

Figura 59 - Procedimento de corte dos corpos de prova



Fonte: Produção do próprio autor.

3.5.2 Instrumento utilizado na medição

Para a medição das rugosidades aritmética média (R_a) e total (R_t) utilizou-se o rugosímetro da marca Mahr modelo MarSurf M300 representado na Figura 60. Onde o *cut-*

off foi ajustado conforme norma AISI NBR4287: 2002 e de acordo com a norma AISI NBR ISO 4288:2008 (0,8mm).

Figura 60 - Rugosímetro Mahr modelo MarSurf M300



Fonte: Produção do próprio autor.

Este rugosímetro faz medições por contato através de um apalpador de diamante, como já explicado. Também possui uma base com *display* para exibição dos resultados e uma outra base, onde está o apalpador, que pode variar sua altura para melhores e mais fáceis medições.

3.5.3 Metodologia de medição

Na medição, foram medidas apenas uma das metades de cada corpo de prova, em linha reta e com o uso de uma morsa para a fixação na mesa.

Na Figura 61 têm-se uma das medições realizadas neste trabalho; onde vê-se a morsa fixando o corpo de prova e a caneta do apalpador posicionada e fazendo a varredura do perfil de rugosidade, e ao lado, a vista superior.

Figura 61 - Medição de rugosidade



Fonte: Produção do próprio autor.

Caso o rugosímetro mostrasse erro, eram repetidas as medições até a obtenção das rugosidades obtidas neste estudo e disponíveis do Apêndice A, na Figura 62 têm-se o *display* após uma medição de rugosidade bem sucedida.

Figura 62 - *Display* com resultados de rugosidade



Fonte: Produção do próprio autor.

3.6 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE E DIMENSÕES MÉDIAS DOS CORPOS DE PROVA

Para a determinação da densidade do painel de MDF tipo *standard* utilizado, utilizaram-se cinco corpos de prova usinados, onde foram medidas suas dimensões, com o uso de um paquímetro e feita sua pesagem, como demonstrado na Figura 63.

Figura 63 - Exemplo de pesagem realizada



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 1 estão dispostos os resultados encontrados para as médias das dimensões usinadas e densidade média da chapa comercial utilizada.

Tabela 1 - Resultados para medição e pesagem das amostras

Número	Massa [g]	Altura [mm]	Largura [mm]	Comprimento [mm]	Volume [mm ³]	Densidade [g/cm ³]
1	22,6	15,4	70,50	30,30	328,967	0,69
2	22,5	15,3	70,50	30,20	325,752	0,69
3	22,5	15,3	70,70	30,00	324,513	0,69
4	23,7	15,3	70,50	30,30	326,831	0,73
5	23,4	15,3	70,70	30,20	326,676	0,72
MÉDIA		15,3	70,6	30,2	326,5	0,70

Fonte: Produção do próprio autor.

3.7 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Os dados coletados nos ensaios foram armazenados em arquivos do tipo texto e usou-se o *software* Matlab para a produção de gráficos da Força de avanço, Vibração e Potência consumida pelo motor para cada ensaio e para os resultados máximos, médios, mínimos e totais de cada caso.

Para o processamento dos dados de lascamento máximo; rugosidades R_t e R_a ; valores máximos de Força de avanço, Vibração e Potência consumida pelo motor; e erros diametral, além das análises estatísticas apresentadas, foram utilizados os *softwares* Microsoft Office Excel e Minitab.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados coletados neste trabalho encontram-se resumidos e já tratados nos tópicos a seguir, a base de dados utilizada encontra-se no Apêndice A para consulta.

4.1 ARREPIAMENTO E LASCAMENTO SUPERFICIAL DOS CORPOS DE PROVA

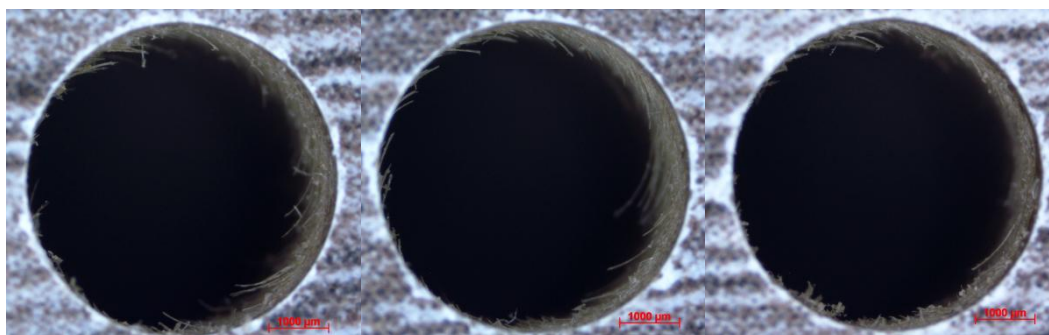
As imagens obtidas pelo microscópio óptico para o arrepiamento e lascamento foram avaliadas e dispostas abaixo em grupos. Cada grupo é definido por três imagens em sequência crescente das velocidades de corte (V_c) para um único avanço da ferramenta (f), logo tanto para arrepiamento e para lascamento existirão três grupos de imagens, uma para cada avanço da ferramenta (f).

Cada combinação de Velocidade de corte (V_c) e avanço (f) possuía três repetições, porém, para comparação das imagens neste trabalho, para o caso do arrepiamento foi escolhida a foto com o pior caso dos três existentes; e para o caso do lascamento superficial, foi escolhida a foto com a maior medição realizada.

4.1.1 Arrepiamento dos corpos de prova

Na Figura 64 estão os casos das velocidades de 62,83; 86,39 e 109,95 [m/min], respectivamente, para o avanço de 0,1mm/rot.

Figura 64 - Arrepiamento para 0,1mm/rot

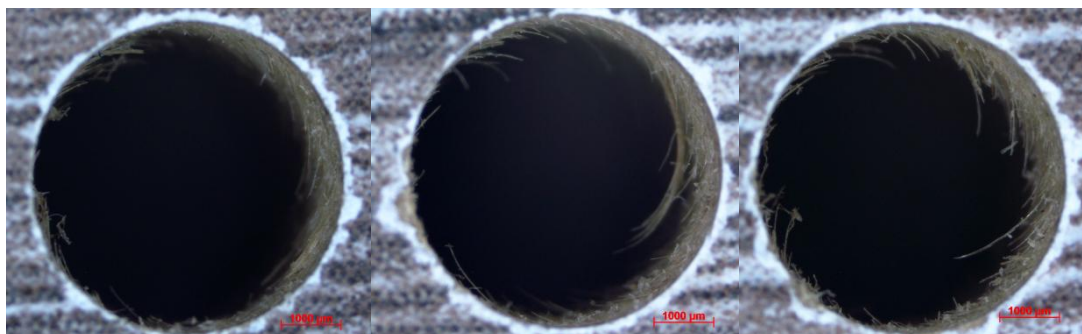


Fonte: Produção do próprio autor.

Depreende-se da Figura 64 que o caso intermediário, da Velocidade de 86,39m/min, aparenta ser o pior dos três casos para o avanço de 0,1mm/rot, enquanto a Velocidade de 109,95m/min é a melhor dos três para o mesmo avanço.

Na Figura 65 estão os casos das velocidades de 62,83; 86,39 e 109,95 [m/min], respectivamente, para o avanço de 0,2mm/rot.

Figura 65 - Arrepiamento para 0,2mm/rot

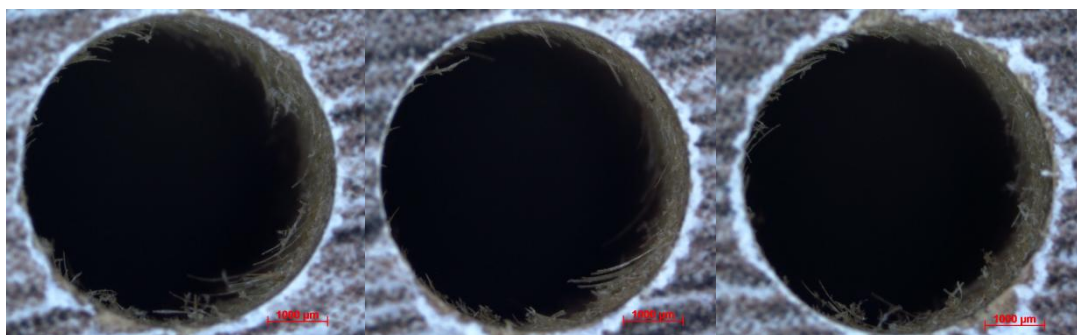


Fonte: Produção do próprio autor.

Da Figura 65 nota-se um maior arrepiamento interno nos dois últimos casos, 86,39 e 109,95 [m/min], quando comparados com o primeiro de 62,83m/min.

Na Figura 66 estão os casos das velocidades de 62,83; 86,39 e 109,95 [m/min], respectivamente, para o avanço de 0,3mm/rot.

Figura 66 - Arrepiamento para 0,3mm/rot



Fonte: Produção do próprio autor.

Da Figura 66, avalia-se que os casos das Velocidades de corte (V_c) de 62,83 e 86,39 [m/min] com avanço de 0,3mm/rot acarretaram em arrepiamentos piores que o caso de 109,95m/min.

4.1.2 Lascamento dos corpos de prova

Os valores dos lascamentos, em μm , a seguir mostrados nas Figuras 67 a 69 encontram-se na Tabela 2.

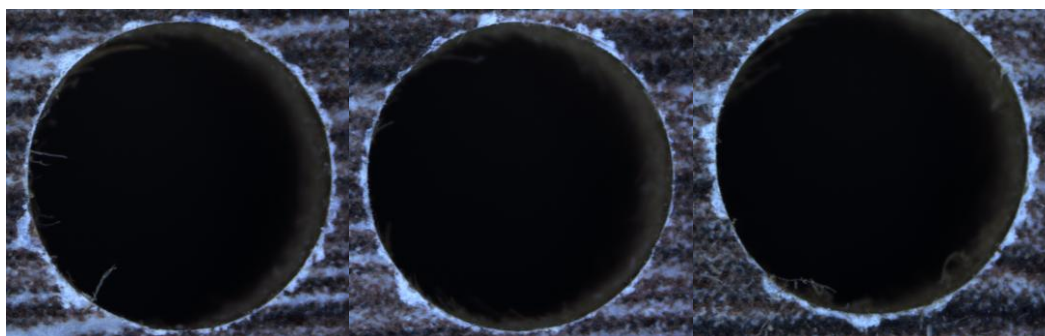
Tabela 2 - Piores lascamentos encontrados

f / V_c	62,83	86,39	109,95
0,1	508,67	307,61	303,18
0,2	609,53	648,28	1238,75
0,3	609,97	578,946	976,18

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 67 estão os casos das velocidades de 62,83; 86,39 e 109,95 [m/min], respectivamente, para o avanço de 0,1mm/rot.

Figura 67 - Lascamento para 0,1mm/rot

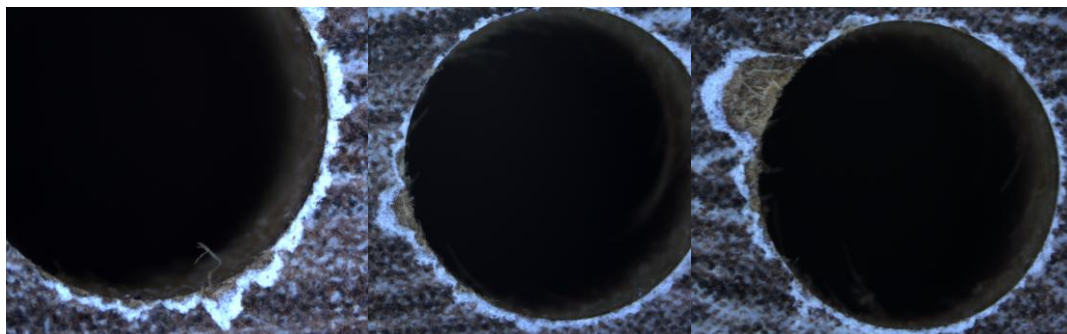


Fonte: Produção do próprio autor.

Da Figura 67 e Tabela 2, observa-se que a Velocidade de corte (V_c) de 62,83m/min representou o pior lascamento superficial encontrado para o avanço de 0,1mm/rot, com diferença de aproximadamente 200 μm das outras velocidades.

Na Figura 68 estão os casos das velocidades de 62,83; 86,39 e 109,95 [m/min], respectivamente, para o avanço de 0,2mm/rot.

Figura 68 - Lascamento para 0,2mm/rot

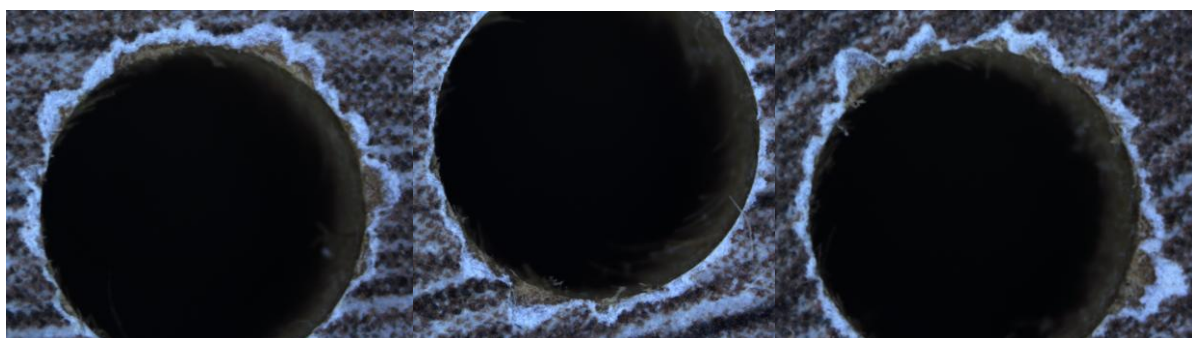


Fonte: Produção do próprio autor.

Da Tabela 2 e Figura 68 nota-se que o lascamento encontrado para a maior velocidade (109,95m/min), no avanço de 0,2mm/rot, foi o pior, com diferença de aproximadamente 600 μ m das outras velocidades.

Na Figura 69 estão os casos das velocidades de 62,83; 86,39 e 109,95 [m/min], respectivamente, para o avanço de 0,3mm/rot.

Figura 69 - Lascamento para 0,3mm/rot



Fonte: Produção do próprio autor.

De acordo com a Tabela 2, a maior velocidade (109,95m/min), no avanço de 0,3mm/rot, acarretou o pior caso de lascamento, com valor de 976,18 μ m seguido da velocidade de 62,83m/min com 609,97 μ m. Porém, nota-se da Figura 69, que estas duas velocidades apresentaram lascamento por quase toda a volta do furo, enquanto o caso intermediário (86,39m/min) apresentou a menor distribuição de lascamento ao redor do furo.

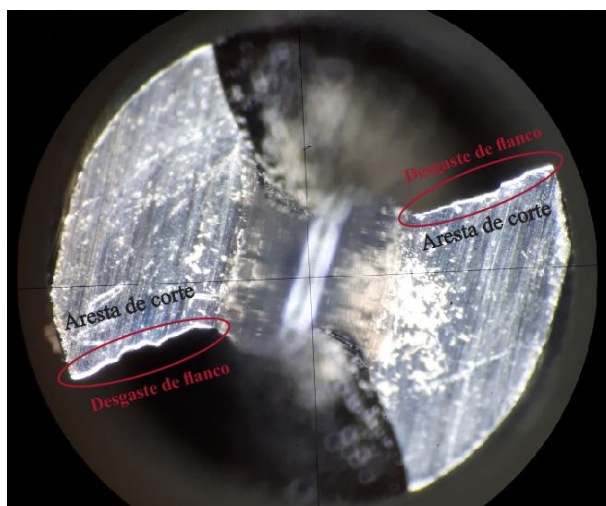
4.2 DESGASTES E AVARIAS DA BROCA

Ao final da usinagem de todos os corpos de prova foi feita a medição dos desgastes de flanco de ambas as arestas de corte, com o uso de um Microscópio de medição da marca Mahr

modelo MarVision MM200, onde chegou-se a um valor médio de desgaste de flanco de 0,032mm.

Na Figura 70 observa-se a presença do desgaste de flanco nas arestas de corte da broca utilizada nos ensaios deste trabalho.

Figura 70 - Desgaste de flanco na broca dos ensaios



Fonte: Produção do próprio autor.

Segundo a norma ISO 3685 (1993), o desgaste de flanco médio para ferramentas de metal duro e aço rápido que indica o final da vida da ferramenta é de 0,3mm, quase 10 vezes acima da média obtida nos ensaios. Portanto, conclui-se que o desgaste da ferramenta não influenciou significativamente nos resultados encontrados para as variáveis de saída deste trabalho.

Além do desgaste de flanco, observa-se também o lascamento da superfície da broca na Figura 70, que pode induzir à presença de um maior desgaste de flanco, e pode ser evitado através da escolha de um material mais tenaz para a ferramenta.

4.3 FORÇA DE AVANÇO DA FERRAMENTA EM RELAÇÃO À VELOCIDADE DE CORTE E O AVANÇO

De acordo com os resultados da Tabela 3, pode-se verificar na coluna "P" que os valores encontrados para o avanço da ferramenta (f) e Velocidade de corte (V_c) são estatisticamente significativos para os resultados de Força de avanço encontrados ($P_f = 0,000 < 5\%$ e $P_{V_c} = 0,001 < 5\%$, respectivamente), portanto depreende-se que a Força de avanço possui dependência destes dois termos.

A interação entre ambos ($V_c * f$) não apresenta resultados que garantam influência estatística confirmada (com $P_{V_c * f} = 0,253 > 5\%$). Ainda observa-se que o Modelo de usinagem estudado (com $P_{\text{Modelo}} = 0,001 < 5\%$) estatisticamente explica as variações nas respostas, mas pelo resultados dos Blocos (com $P_{\text{Blocos}} = 0,492 > 5\%$) não se pode estatisticamente validar que as diferentes condições mudaram as respostas encontradas, indicando portanto a necessidade do estudo de outros fatores no Modelo de usinagem e suas respostas.

Além disso, o índice de significância (F), se for maior que dois, também representa resultados de interesse, estatisticamente falando, logo, para o caso, apenas os valores obtidos para $V_c * f$ e os Blocos não podem ser considerados de significância.

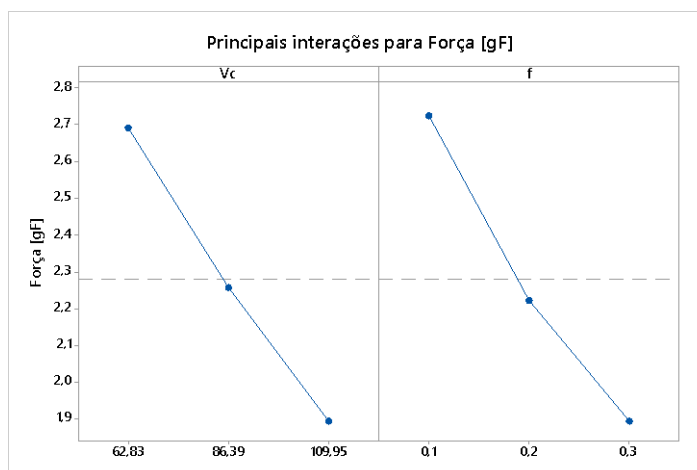
Tabela 3 - Resultados para a Força de avanço da ferramenta

Dado	F	P
Modelo	5,81	0,001
Blocos	0,74	0,492
V_c	12,08	0,001
f	13,27	0,000
$V_c * f$	1,49	0,253
R^2	78,41%	
s	0,3454gF	

Fonte: Produção do próprio autor.

Visualizando as Figuras 71 e 72 e tendo em consideração a estatisticamente confirmada dependência da Força de avanço com os termos estudados (V_c e f), pode-se dizer que a Força de avanço diminui com o aumento das Velocidades de corte (V_c) e avanço da ferramenta (f), como nota-se na Figura 71.

Figura 71 - Interações para a Força de avanço



Fonte: Produção do próprio autor.

Foi realizado o Teste de Tukey para as variáveis V_c e f . Os resultados estão dispostos nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Teste de Tukey para V_c e força de avanço

V_c	Valor	Grupo
62,83	2,691	A
86,39	2,257	AB
109,95	1,892	B

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 4 observa-se que os valores mínimos e máximos encontrados na Figura 71 são valores estatisticamente diferentes, sendo representados na Tabela 4 por grupos diferentes (A e B). Já a velocidade de 86,39m/min encontra-se compreendida na faixa de tolerância das outras velocidades estudadas, sendo denotada na coluna "Grupo" por AB; portanto, esta velocidade tem valores estatisticamente iguais às outras duas estudadas.

Tabela 5 - Teste de Tukey para f e força de avanço

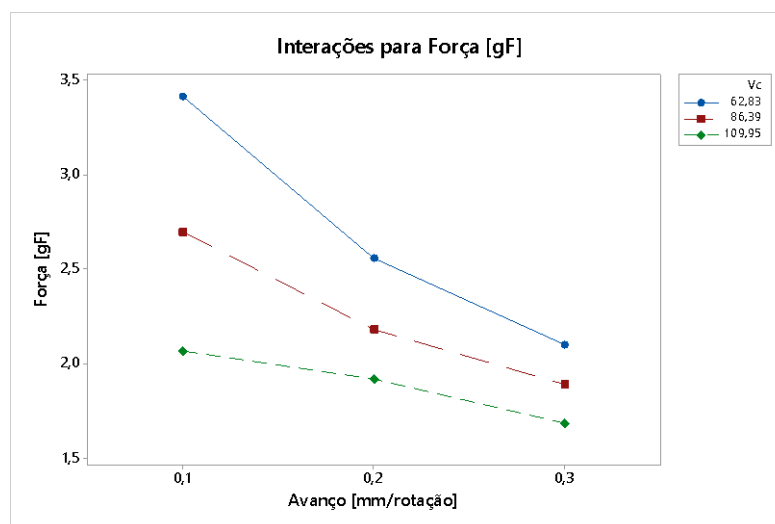
f	Valor	Grupo
0,1	2,726	A
0,2	2,221	AB
0,3	1,893	B

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 5 têm-se resultados semelhantes aos discutidos anteriormente. É possível verificar que os valores da Figura 71 para os avanços de 0,1 e 0,3 [mm/rot] são estatisticamente diferentes (A e B), enquanto que os resultados para 0,2mm/rot estão compreendidos no intervalo de variação dos dois primeiros (AB).

Na Figura 72 têm-se que, embora a correlação entre os fatores ($V_c \cdot f$) não tenha dependência estatisticamente confirmada, quando há o aumento das variáveis estudadas, a Força de avanço diminui.

Figura 72 - Correlações interativas para a Força de avanço



Fonte: Produção do próprio autor.

4.4 POTÊNCIA CONSUMIDA PELO MOTOR EM RELAÇÃO À VELOCIDADE DE CORTE E O AVANÇO

Para os resultados da Potência consumida pelo motor, na Tabela 6, os fatores estudados (f e V_c) não possuem dependência estatística confirmada ($P_f = 0,368 > 5\%$ e $P_{V_c} =$

0,227 > 5%, respectivamente). A correlação entre eles, $V_c * f$, também não apresentou validação estatística (com $P_{V_c * f} = 0,328 > 5\%$).

Observa-se ainda que, para este caso, o Modelo de usinagem não explica estatisticamente as variações nas respostas, sendo então necessário outro Modelo para o estudo da Potência consumida pelo motor (com $P_{\text{Modelo}} = 0,204 > 5\%$). O valor de P para os Blocos estudados, que demonstra os efeitos de outras variáveis além das estudadas no Modelo, também confirma a necessidade de um outro estudo para esta variável de saída (com $P_{\text{Blocos}} = 0,103 > 5\%$).

Além disso, valores de $F > 2$ foram obtidos apenas para os Blocos, demonstrando pouca significância estatística dos demais resultados.

Tabela 6 - Resultados para a potência consumida pelo motor

Dado	F	P
Modelo	1,57	0,204
Blocos	2,63	0,103
V_c	1,63	0,227
f	1,07	0,368
$V_c * f$	1,26	0,328
R^2	49,50%	
s	77,445W	

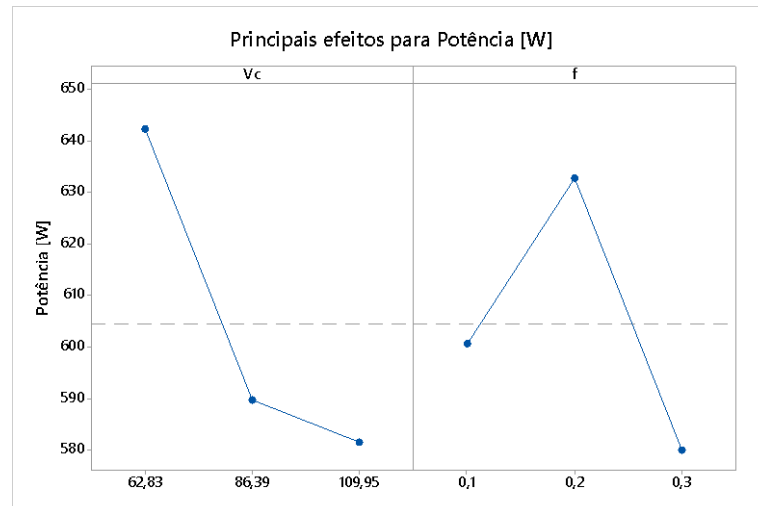
Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 73 têm-se as diferentes respostas da potência com relação ao aumento da Velocidade de corte (V_c) e avanço da ferramenta (f). Nota-se que é necessária uma maior potência para a velocidade de 62,83m/min, com uma diminuição desta após o aumento da velocidade, notando-se uma inclinação significativa na curva de resultados.

Nos resultados do avanço (f), a velocidade de 0,2mm/rot possui os maiores resultados, observa-se também uma não tendência nos resultados, com um pico de consumo nessa velocidade e resultados menores que a linha média nas duas extremidades.

Ao se comparar as inclinações de ambas as curvas, nota-se uma maior significância dos resultados encontrados para a Velocidade de corte (V_c), pois mostram uma variação maior dos resultados de potência.

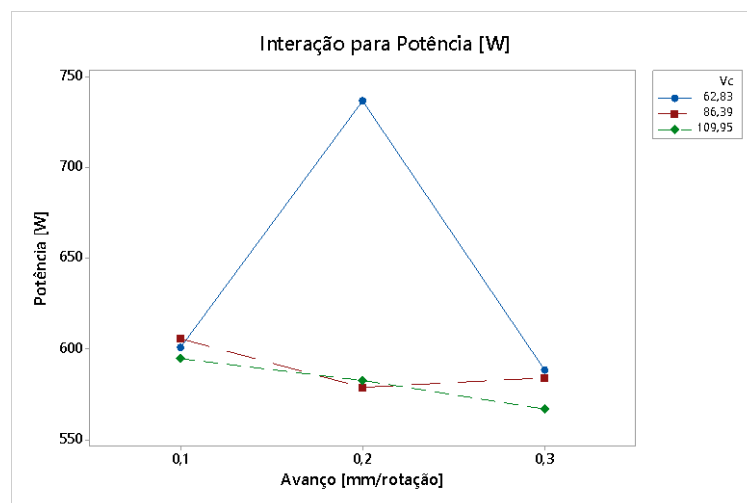
Figura 73 - Interações para a potência do motor



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 74 a correlação de V_c e f indica a não recomendação da Velocidade de 62,83m/min para a furação de painéis de MDF, já que nota-se um pico considerável de potência para o avanço de 0,2mm/rot e, nas extremidades, valores próximos aos outros avanços. A velocidade de 109,95m/min é a que apresenta uma leve diminuição do consumo de energia, quando comparada às demais.

Figura 74 - Correlações interativas para a potência do motor



Fonte: Produção do próprio autor.

4.5 VIBRAÇÃO EM RELAÇÃO À VELOCIDADE DE CORTE E O AVANÇO

Na análise da Tabela 7, avalia-se que não houveram dependências estatisticamente confirmadas nos resultados para as variáveis de entrada f e V_c (com $P_f = 0,792 > 5\%$ e $P_{V_c} = 0,108 > 5\%$, respectivamente) com a variável de estudo Vibração, e a correlação entre estes fatores ($V_c * f$) também não apresenta validação estatística (com $P_{V_c * f} = 0,318 > 5\%$).

Da análise dos resultados para o Modelo e os Blocos de resultados, depreende-se que o Modelo não apresenta valores que confirmam segurança nas variações encontradas nas respostas, sugerindo o desenvolvimento de um novo Modelo de usinagem para o estudo da vibração (com $P_{\text{Modelo}} = 0,318 > 5\%$). O valor de P para os Blocos de resultados também indica a necessidade da criação de outro Modelo de usinagem, com diferentes parâmetros de estudo, além dos aqui apresentados, V_c e f , (com $P_{\text{Blocos}} = 0,380 > 5\%$).

Além disso, valores de $F > 2$ foram obtidos apenas para a Velocidade de corte (V_c), demonstrando alta significância deste resultado, embora tendo $P_{V_c} > 5\%$.

Tabela 7 - Resultados para vibração

Dado	F	P
Modelo	1,28	0,318
Blocos	1,03	0,380
V_c	2,57	0,108
f	0,24	0,792
$V_c * f$	1,28	0,318
R^2	44,44%	
s	0,16162mm/s	

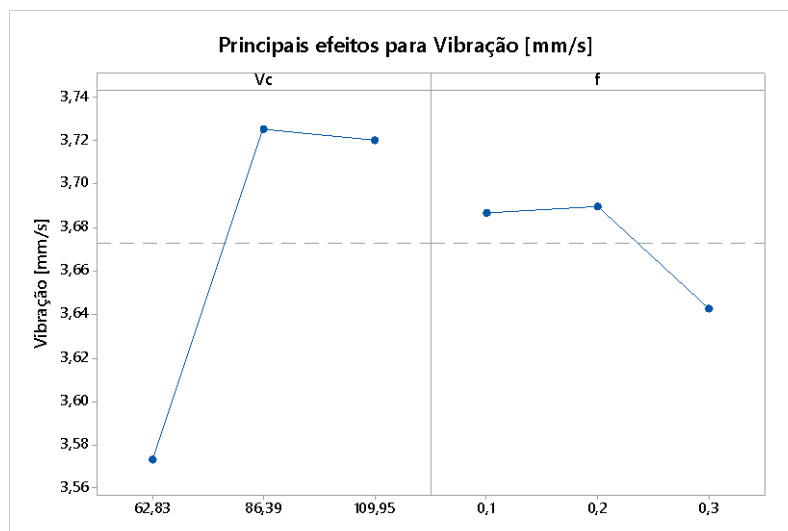
Fonte: Produção do próprio autor.

A análise da Figura 75 indica que com o aumento da Velocidade de corte (V_c), a vibração tende a aumentar consideravelmente entre os valores de 62,83 e 86,39 [m/min] e decresce minimamente quando chega-se à 109,95m/min.

Para o avanço (f), a vibração tem um leve aumento entre os valores de 0,1 e 0,2 [mm/rot] e decresce para aproximadamente 3,64mm/s no avanço de 0,3mm/rot. Ao se comparar as inclinações de ambas as curvas, nota-se uma maior significância dos resultados

encontrados para a Velocidade de corte (V_c), pois mostram uma variação maior dos resultados de vibração.

Figura 75 - Interações para a vibração



Fonte: Produção do próprio autor.

Foi realizado o Teste de Tukey para a variável V_c . Os resultados estão dispostos nas Tabela 8.

Tabela 8 - Teste de Tukey para V_c e vibração

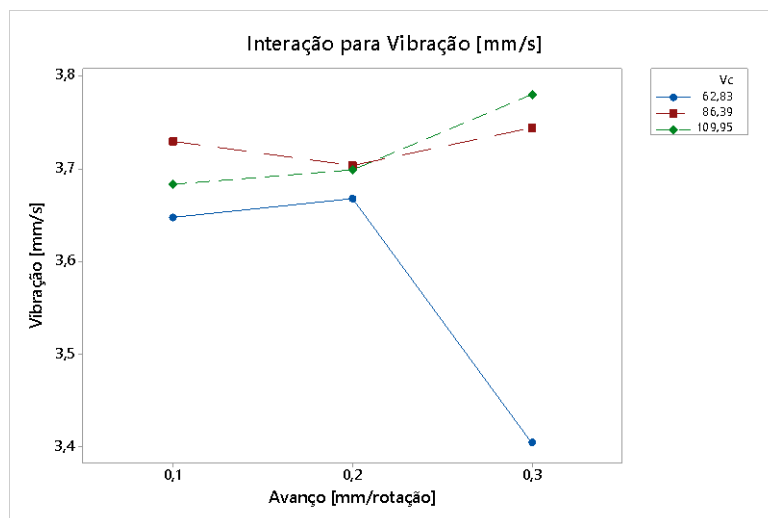
V_c	Valor	Grupo
86,39	3,7253	A
109,95	3,7201	A
62,83	3,5732	A

Fonte: Produção do próprio autor.

Conclui-se da Tabela 8 que os valores de V_c encontrados na Figura 75 são considerados estatisticamente iguais, embora note-se uma grande inclinação da curva da velocidade.

Na Figura 76 têm-se que a velocidade de 62,83m/min, para todos os avanços, é a que resulta em menores valores de vibração da broca. Entretanto, nos avanços de 0,1 e 0,2 [mm/rot], os resultados encontrados para as três velocidades de corte estão muito próximos. Nesta situação, é preferível utilizar a maior velocidade de corte (109,95m/min) pois ela acarretará em uma produção maior sem provocar um aumento considerável da vibração.

Figura 76 - Correlações interativas para a vibração



Fonte: Produção do próprio autor.

4.6 RUGOSIDADE MÉDIA ARITMÉTICA EM RELAÇÃO À VELOCIDADE DE CORTE E O AVANÇO

A Tabela 9 indica os resultados para a Rugosidade média aritmética (R_a). Nela constata-se a dependência entre o avanço da ferramenta e essa variável (com $P_f = 0,000 < 5\%$), mas não observa-se o mesmo para a Velocidade de corte, V_c , (com $P_{Vc} = 0,200 > 5\%$). A correlação entre as duas variáveis ($V_c \cdot f$) também não demonstra dependência estatística (com $P_{Vc \cdot f} = 0,307 > 5\%$).

O valor de P para o Modelo confirma as variações nas respostas para o método de usinagem utilizado (com $P_{\text{Modelo}} = 0,003 < 5\%$); enquanto o valor para Blocos demonstra que é importante a consideração de outros parâmetros no estudo da rugosidade R_a (com $P_{\text{Blocos}} = 0,121 > 5\%$).

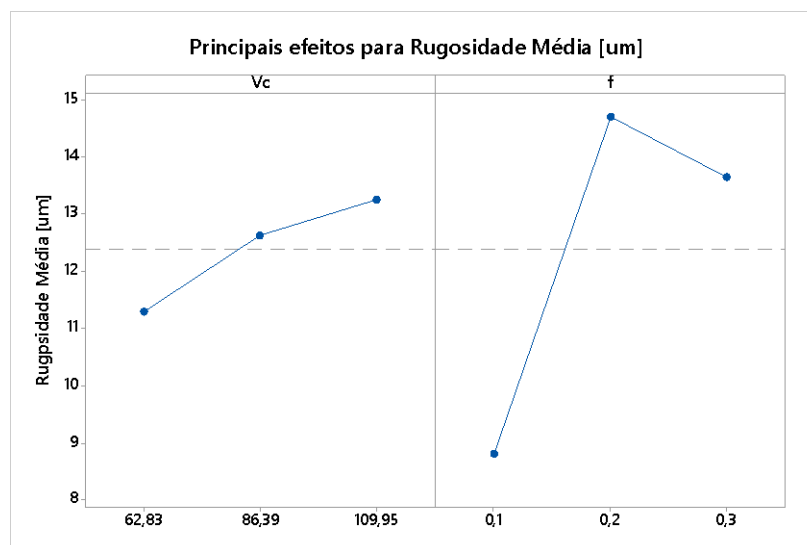
Além disso, valores de $F < 2$ foram obtidos apenas para a Velocidade de corte (V_c) e a correlação das variáveis ($V_c \cdot f$), demonstrando baixa significância destes resultados. Ainda observa-se a alta relevância da variável de entrada avanço (f), com $F_f = 17,57$.

Tabela 9 - Resultados para R_a

Dado	F	P
Modelo	4,88	0,003
Blocos	2,42	0,121
V_c	1,78	0,200
f	17,57	0,000
$V_c * f$	1,31	0,307
R^2	75,31%	
s	2,2506 μm	

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 77 é demonstrado que, para a Velocidade de corte (V_c), há um crescimento de R_a conforme há o aumento da velocidade, relação que não é confirmada na validação estatística. Para o caso do avanço (f), há um grande aumento de R_a com o aumento do avanço de 0,1 para 0,2 [mm/rot], e após, um decréscimo de R_a no avanço de 0,3mm/rot. Ao se comparar as inclinações de ambas as curvas, nota-se uma maior significância dos resultados encontrados para o avanço da ferramenta (f), pois mostram uma variação maior dos resultados de R_a .

Figura 77 - Interações para a R_a 

Fonte: Produção do próprio autor.

Foi realizado o Teste de Tukey para a variável f , conforme a Tabela 10.

Tabela 10 - Teste de Tukey para f e R_a

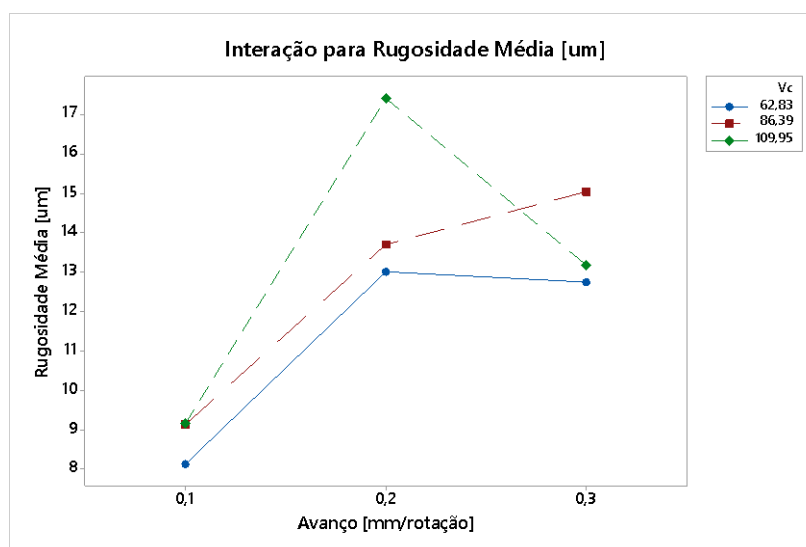
f	Valor	Grupo
0,1	8,809	B
0,2	14,7	A
0,3	13,656	A

Fonte: Produção do próprio autor.

Conclui-se da Tabela 10 que os valores de f encontrados na Figura 77 são considerados estatisticamente iguais para os valores de avanço de 0,2 e 0,3 [mm/rot] (Grupo A), enquanto que o valor de 8,809 μ m, em 0,1mm/rot, é diferente dos demais (Grupo B).

Da Figura 78 percebe-se que, para os avanços de 0,1 e 0,2 [mm/rot], as velocidades de 62,83 e 86,39 [m/min] possuem valores próximos de R_a , tornando mais vantajosa a utilização da maior velocidade (86,39m/min) na indústria, a qual tornará a produção maior sem uma grande influência nos valores de rugosidade R_a ; o mesmo acontece para o avanço de 0,3mm/rot em conjunto com as velocidades de 62,83 e 109,95 [m/min], onde a variação dos resultados de rugosidade é menor de 1 μ m. Neste caso, para uma produção mais vantajosa, é indicado o uso da velocidade de 109,95m/min com o avanço de 0,3mm/min.

Figura 78 - Correlações interativas para a R_a



Fonte: Produção do próprio autor.

4.7 RUGOSIDADE TOTAL EM RELAÇÃO À VELOCIDADE DE CORTE E O AVANÇO

Os resultados da Tabela 11, para a rugosidade total (R_t) demonstram-se similares aos encontrados no tópico anterior:

- R_t e avanço da ferramenta (f) mostrando dependência estatística (com $P_f = 0,000 < 5\%$);
- R_t e Velocidade de corte (V_c) não demonstrando a mesma dependência ($P_{V_c} = 0,634 > 5\%$);
- A dependência da correlação entre estes valores ($V_c * f$) e R_t não sendo comprovada estatisticamente (com $P_{V_c * f} = 0,725 > 5\%$);
- Modelo comprovado estatisticamente (com $P_{Modelo} = 0,014 < 5\%$ e $F_{Modelo} > 2$);
- Valor de P para Blocos demonstrando a necessidade do estudo de outros parâmetros além dos mostrados neste trabalho (com $P_{Blocos} = 0,565 > 5\%$).
- Alta relevância da variável de entrada avanço (f), com $F_f = 15,06$.

Tabela 11 - Resultados para R_t

Dado	F	P
Modelo	3,43	0,014
Blocos	0,59	0,565
V_c	0,47	0,634
f	15,06	0,000
$V_c * f$	0,52	0,725
R^2	68,19%	
s	19,3025μm	

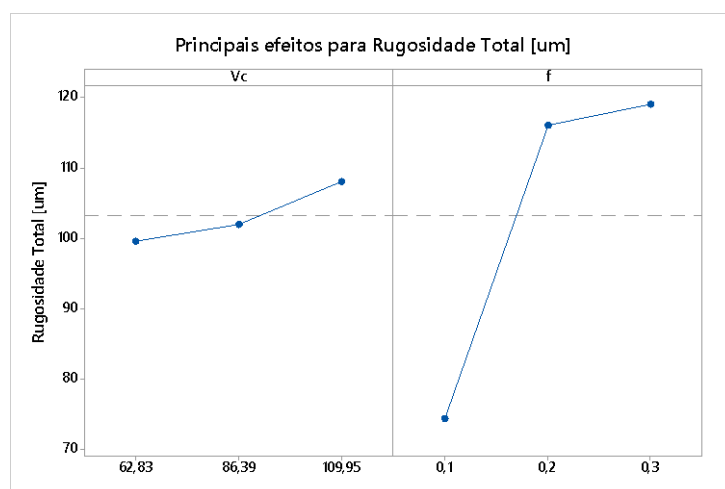
Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 79 têm-se um incremento de R_t conforme aumenta-se a velocidade, porém observa-se que a inclinação da curva não é alta, confirmando a não significância da variável.

Para o avanço (f), há um notável aumento de R_t ao se aumentar o avanço de 0,1 para 0,2 [mm/rot], e após, um leve aumento para aproximadamente 120 μ m, com avanço de 0,3mm/rot.

Ao se comparar as inclinações de ambas as curvas, nota-se uma maior significância dos resultados encontrados para o avanço da ferramenta (f), pois mostram uma variação maior dos resultados de R_a .

Figura 79 - Interações para a R_t



Fonte: Produção do próprio autor.

Foi realizado o Teste de Tukey para a variável f , conforme a Tabela 12.

Tabela 12 - Teste de Tukey para f e R_t

f	Valor	Grupo
0,1	74,42	B
0,2	116,12	A
0,3	119,06	A

Fonte: Produção do próprio autor.

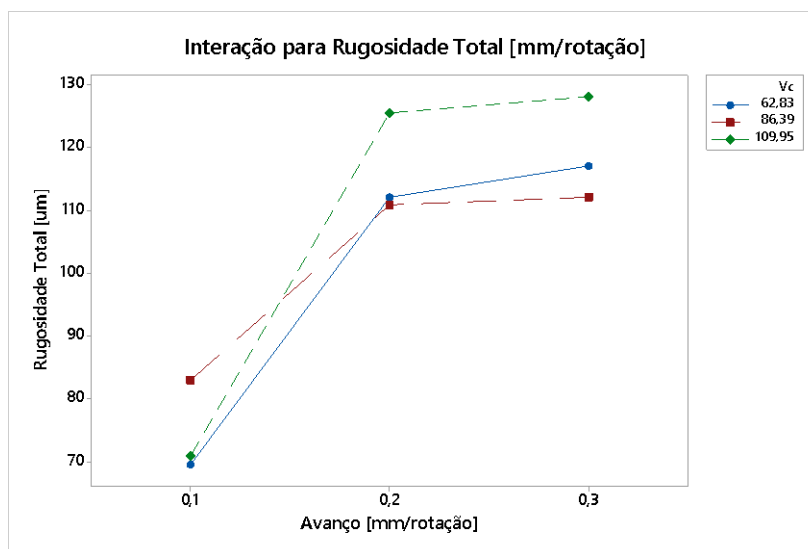
Na Tabela 12, os valores encontrados se mostram parecidos com os encontrados anteriormente para R_a . Os avanços de 0,2 e 0,3 [mm/rot] são estatisticamente iguais (Grupo A), enquanto que o valor para 0,1mm/rot é diferente dos demais (Grupo B).

Na Figura 80 observa-se as interações entre a Velocidade de corte (V_c), o avanço (f) e R_t . Nota-se que, visando menores valores de R_t , no avanço de 0,1mm/rot as velocidades mais

eficientes seriam a de 62,83 e a de 109,95 [m/min], enquanto que para os avanços de 0,2 e 0,3 [mm/rot], as velocidades de 62,83 e 86,39 [m/min] produzem menores faixas de rugosidade, sendo as mais adequadas.

Considerando fatores de produção, é recomendado o uso dos conjuntos de variáveis de entrada 0,1mm/rot com velocidade de corte de 109,95m/min; e 86,39m/min com os avanços de 0,2 e 0,3 [mm/rot].

Figura 80 - Correlações interativas para a R_t



Fonte: Produção do próprio autor.

4.8 ERRO DIAMETRAL EM RELAÇÃO À VELOCIDADE DE CORTE E O AVANÇO

Na Tabela 13 têm-se os resultados encontrados para a variação entre o diâmetro medido experimentalmente e o diâmetro da broca utilizada nos ensaios (5mm). Não há confirmação estatística para a dependência do avanço (f) e da Velocidade de corte (V_c) com o erro diametral (com $P_f = 0,078 > 5\%$ e $P_{V_c} = 0,092 > 5\%$, respectivamente), entretanto os valores de P mostram-se próximos ao índice de significância (α). Observando ainda que o R^2 está abaixo de 50%, pode-se afirmar que em futuros estudos, esta relação pode variar.

A correlação entre a Velocidade de corte (V_c) e o avanço (f), $V_c * f$, também não teve dependência validada estatisticamente (com $P_{V_c * f} = 0,718 > 5\%$).

Os valores de P para o Modelo e para os Blocos de resultados indicam que o Modelo de usinagem adotado não cobre todos os parâmetros adequados para a variável de saída (com $P_{\text{Blocos}} = 0,833 > 5\%$) e que um novo Modelo de usinagem mais abrangente pode ser proposto para o estudo deste fator (com $P_{\text{Modelo}} = 0,263 > 5\%$).

Além disso, valores de $F > 2$ foram obtidos apenas para a Velocidade de corte (V_c) e o avanço (f), demonstrando alta significância destes resultados.

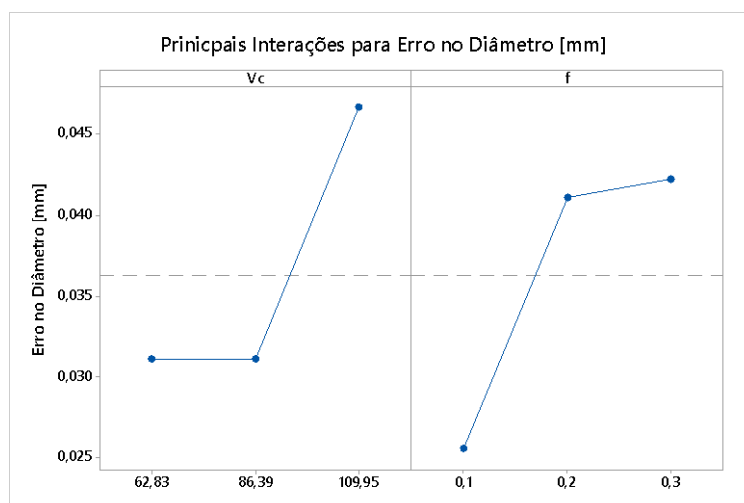
Tabela 13 - Resultados para erro diametral

Dado	F	P
Modelo	1,4	0,263
Blocos	0,18	0,833
V_c	2,79	0,092
f	3	0,078
$V_c * f$	0,53	0,718
R^2	46,74	
s	0,016146mm	

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 81 verifica-se que um aumento no erro diametral acontece quando há a mudança de Velocidade de corte (V_c) de 86,39 para 109,95 [m/min] e, também, na mudança do avanço de 0,1 para 0,2 [mm/rot]. Nota-se que ambos os intervalos de estudo são importantes, já que a variável de saída (Erro diametral) aumenta significativamente.

Figura 81 - Interações para o erro diametral



Fonte: Produção do próprio autor.

Foi realizado o Teste de Tukey para as variáveis V_c e f , conforme as Tabelas 14 e 15.

Tabela 14 - Teste de Tukey para V_c e erro diametral

V_c	Valor	Grupo
62,83	0,03111	A
86,39	0,03111	A
109,95	0,04667	A

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 15 - Teste de Tukey para f e erro diametral

f	Valor	Grupo
0,1	0,02556	A
0,2	0,04111	A
0,3	0,04222	A

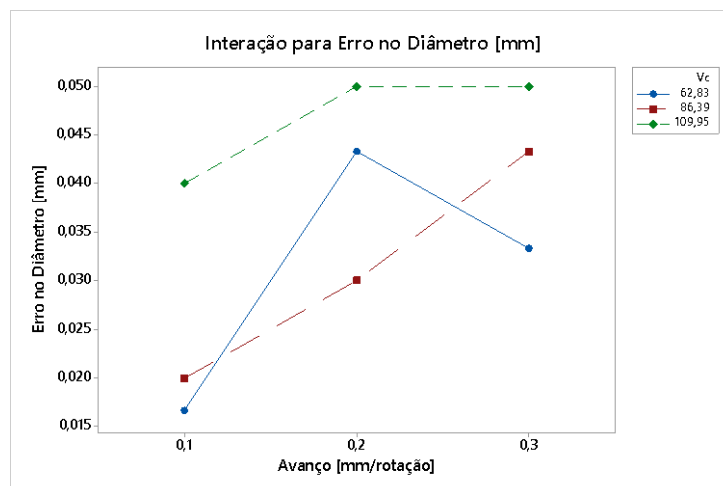
Fonte: Produção do próprio autor.

Conclui-se das Tabelas 14 e 15 que os valores de V_c e f encontrados na Figura 81 são considerados estatisticamente iguais (todos no Grupo A), embora note-se uma grande inclinação das curvas da velocidade e avanços.

Na Figura 82 nota-se um padrão de crescimento entre as curvas de Velocidade de corte (V_c) de 86,39 e 109,95 [m/min] com o aumento do avanço. Entretanto também observa-se um pico para o avanço de 0,2mm/rot na curva de 62,83m/min.

Conclui-se que a velocidade de 62,83m/min é a mais apropriada para a usinagem em conjunto com o avanço de 0,3 [mm/rot]; a velocidade intermediária (86,39m/min) é a mais adequada para a usinagem com o avanço de 0,2 mm/rot; as velocidades de corte de 62,83 e 86,39 [m/min], em conjunto com o avanço de 0,1mm/rot, possuem valores próximos, sendo recomendada a maior velocidade por fatores de aumento de produção.

Figura 82 - Correlações interativas para o erro diametral



Fonte: Produção do próprio autor.

4.9 LASCAMENTO MÁXIMO EM RELAÇÃO À VELOCIDADE DE CORTE E O AVANÇO

Os dados para a variável de saída lascamento máximo superficial, obtidos em μm , estão dispostos na Tabela 16. Observa-se uma dependência da variável de saída com o avanço (f) (com $P_f = 0,006 < 5\%$), mas a mesma dependência não é notada para a Velocidade de corte (V_c) (com $P_{V_c} = 0,402 > 5\%$). A correlação entre estas variáveis ($V_c * f$) também não mostrou dependência estatisticamente validada (com $P_{V_c * f} = 0,414 > 5\%$).

Do Modelo usado, não constata-se uma validação estatística para as variações nas respostas e o método de usinagem utilizado. Porém, o valor de P mostra-se próximo ao índice de significância (α) (com $P_{\text{Modelo}} = 0,068 > 5\%$), constando que, para R^2 maiores, podem ser obtidos outros resultados.

Avaliando os Blocos de resultados utilizados, nota-se que a adição de outros parâmetros ao estudo desta variável de saída tornará o Modelo mais fiel à realidade de usinagem (com $P_{\text{Blocos}} = 0,357 > 5\%$).

Foram ainda encontrados valores de $F > 2$ para o avanço e Modelo, indicando relevância dos resultados de avanço, como pode ser observado na Figura 77.

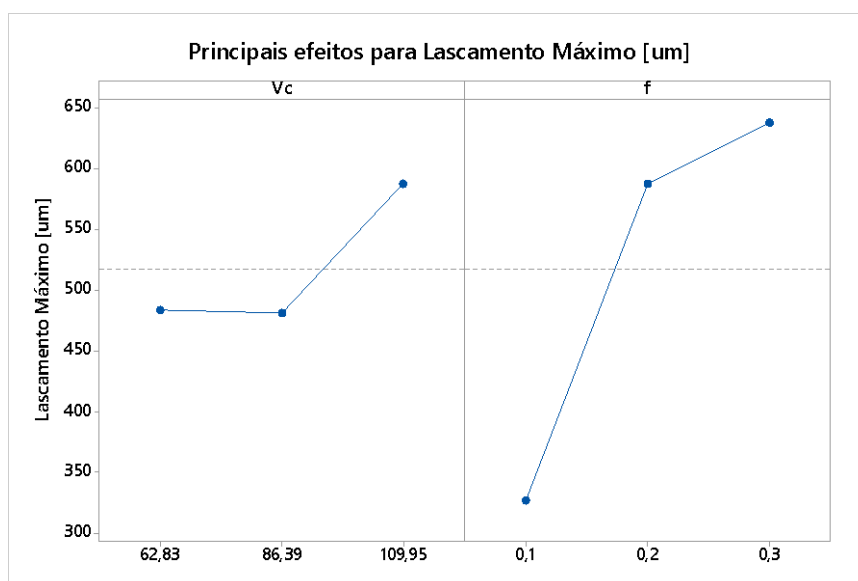
Tabela 16 - Resultados para lascamento máximo superficial

Dado	F	P
Modelo	2,28	0,068
Blocos	1,1	0,357
V_c	0,96	0,402
f	7,26	0,006
$V_c * f$	1,05	0,414
R^2	58,80%	
s	186,326 μ m	

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 83 é possível observar a relação de dependência entre o lascamento máximo e o avanço (f) através do padrão de crescimento da curva. Para a Velocidade de corte (V_c), nota-se um crescimento considerável do lascamento no aumento da velocidade de 86,39 para 109,95 [m/min].

Figura 83 - Interações para a lascamento máximo superficial



Fonte: Produção do próprio autor.

Foi realizado o Teste de Tukey para a variável f , conforme a Tabela 17.

Tabela 17 - Teste de Tukey para f e lascamento máximo superficial

f	Valor	Grupo
0,1	326,4	B
0,2	587,8	A
0,3	638,2	A

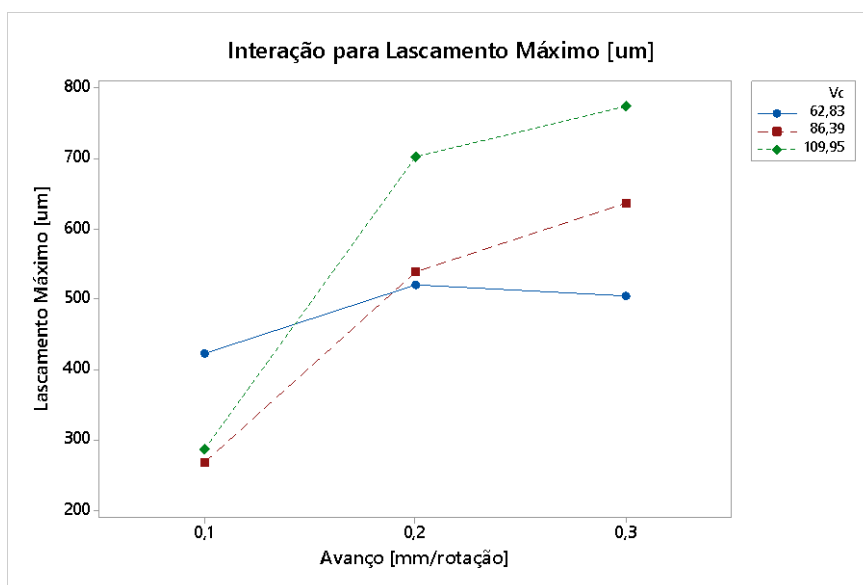
Fonte: Produção do próprio autor.

Conclui-se da Tabela 17 que os valores de f para 0,2 e 0,3 [mm/rot] são considerados estatisticamente iguais (Grupo A), enquanto o valor de 326,4 μ m, encontrado para 0,1mm/rot, é diferente dos demais (Grupo B).

Observando a Figura 84, nota-se um padrão de crescimento, das curvas das velocidades 86,39 e 109,95 [m/min] com o aumento dos avanços. No caso da primeira velocidade estudada, há uma diminuição entre os avanços de 0,2 e 0,3 [mm/rot].

Constata-se que para a rotação de 0,1mm/rot, os valores de lascamento para as velocidades de 86,39 e 109,95 [m/min] estão muito próximos; da mesma forma que os valores das velocidades de 62,83 e 86,39 [m/min], para a rotação de 0,2mm/rot, são próximos. Para estes casos, recomenda-se a utilização das maiores velocidades de corte (V_c), com as quais haverá uma produção maior sem um aumento considerável do lascamento.

Figura 84 - Correlações interativas para lascamento máximo superficial



Fonte: Produção do próprio autor.

5 CONCLUSÃO

Pode-se concluir deste trabalho que, para todas as variáveis de saída estudadas, podem ser aplicados Modelos de usinagem mais fiéis à realidade, através do estudo de outras variáveis de entrada além das apresentadas. Nos resultados gerais do Modelo de usinagem aplicado, os valores de R^2 encontrados estão abaixo de 80% devido à alta rugosidade própria das fibras do MDF.

Nos resultados da Força de avanço, encontrou-se dependência entre o avanço da ferramenta (f), a velocidade de corte (V_c) e a variável. Através de teste de Tukey, para ambos os casos, as menores e maiores velocidades foram classificadas em grupos diferentes, enquanto as intermediárias ficaram dentro da faixa de valores das demais.

Através dos Gráficos de correlação interativa, conclui-se que as maiores velocidade de corte (109,95m/min) e de avanço (0,3mm/rot) resultam em valores de força de avanço menores. É indicado, portanto, o uso conjunto destes parâmetros para melhores resultados deste parâmetro de saída.

Nos resultados encontrados para a Potência consumida pelo motor, não foi encontrada dependência estatística entre as variáveis. Porém, através da análise dos Gráficos de interação, nota-se uma influência maior da Velocidade de corte (V_c), já que seus resultados acompanham uma maior variação da Potência. Além disso, observa-se que as maiores velocidades de corte acarretam em menores valores de energia consumida.

Para a Vibração, não foi encontrada dependência estatística e a Velocidade de corte também mostrou-se mais significativa para os resultados obtidos da variável em um primeiro momento, porém, através do teste de Tukey, observou-se a equivalência estatística entre os valores encontrados. No Gráfico de correlação interativa, a menor Velocidade de corte (V_c) acarretou em menores resultados de vibração.

Nos resultados das rugosidades média aritmética (R_a) e total (R_t), foram obtidas similaridades nas respostas, tais quais:

- Dependência estatística do avanço da ferramenta (f) com as variáveis de saída;
- Resultados do teste de Tukey indicando que os avanços maiores (0,2 e 0,3 [mm/rot]) encontram-se em grupos de resultados iguais estatisticamente, sendo diferentes apenas dos valores do avanço de 0,1mm/rot;

- Nos Gráficos de correlação interativa dos parâmetros, as menores Velocidade de corte (V_c) e avanço (f) resultaram nos menores valores encontrados para as rugosidades.

Ainda observa-se que o resultado de rugosidade total máximo encontrado (aproximadamente 120 μ m), é elevado devido à característica de compactação de fibras lignocelulósicas na produção dos painéis de MDF.

Para o erro diametral da usinagem, os valores de P obtidos estavam muito próximos do índice de significância (α), fator que somado ao baixo R^2 podem gerar resultados diferentes em futuros ensaios.

Aplicando o teste de Tukey para ambas as variáveis de entrada, todos os valores foram classificados no mesmo grupo de resultados, visto que não havia uma amplitude tão grande do erro diametral e a variância dos resultados (s^2) era relativamente alta.

Por último, os resultados do Lascamento máximo superficial obtidos mostraram dependência entre a variável e o avanço da ferramenta (f), confirmada pela inclinação obtida no Gráfico de interação destas variáveis.

Aplicando o teste de Tukey, os maiores valores de avanço, 0,2 e 0,3 [mm/rot], eram estatisticamente iguais e diferentes do avanço de 0,1mm/rot. No Gráfico de correlação interativa dos resultados, observou-se que a união das maiores Velocidades de corte (V_c) (62,83 e 86,39 [m/min]) com o avanço de 0,1mm/rot produziam os menores valores de lascamento.

Da análise das fotos feitas no microscópio óptico, observa-se que a velocidade de corte (V_c) de 86,39m/min acarretou em piores arrepiamentos da superfície interna do furo pra os três casos de avanço da ferramenta (f), enquanto que a velocidade de 109,95m/min apresentou as melhores fotos para os casos de 0,1 e 0,3 [mm/rot].

Para o lascamento máximo superficial, a velocidade de corte (V_c) de 109,95m/min apresentou os piores valores de lascamento para os avanços da ferramenta (f) de 0,2 e 0,3 [mm/rot], enquanto que a velocidade de 86,39m/min, de acordo com as fotos, apresentou menores lascamentos ao redor dos furos usinados nos três casos de avanço.

Avaliando-se que nos resultados encontrados para a Potência do motor, a velocidade de 62,83m/min apresentou um pico de consumo no avanço de 0,2mm/rot e também constatou-se como uma das velocidades com maior força de avanço da ferramenta, no presente estudo, não se recomenda às indústrias moveleiras o uso desta velocidade, a qual pode danificar as centrais CNCs utilizadas por elas, além de promover um consumo maior de energia.

O avanço (f), nos resultados do estudo, originou dependência estatística com a força de avanço da ferramenta; as rugosidades média aritmética (R_a) e total (R_t) e o lascamento máximo superficial. Os valores de avanço de 0,2 e 0,3 [mm/rot] originaram resultados próximos para as variáveis de R_t , força de avanço e lascamento, o autor, portanto, recomenda ambos para o uso similar à estas condições estudadas.

Embora a indústria sempre opte pela eficiência na produção, a escolha da Velocidade de corte (V_c) pode ser baseada nas condições esperadas para a qualidade superficial e interna do furo: a velocidade intermediária, de 86,39m/min, resultará em rugosidades (R_a e R_t) e lascamentos menores dos que os encontrados com a velocidade de 109,95m/min.

REFERÊNCIAS

ABIMCI - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE. **Estudo setorial 2009**: ano base 2008. Indústria de Madeira Processada Mecanicamente, 2009. p. 43.

BLACK, T.; KOSHER, R. **Materials and processing in manufacturing**. Nova Jersey: John Wiley and Sons, 2008.

BERMAN. **Características técnicas da célula de carga**. Disponível em: < <http://www.weightech.com.br/> >. Acesso em: 20 ago. 2018

CAMPOS, C. I.; LAHR, F. A. R. MDF: processo de produção, propriedades e aplicações., In: CBECIMAT, 1., 2000, Natal. **Anais...** São Carlos: CBECIMAT, 2002.

CASTRO, E. M. **Estudo da usinabilidade de chapas de MDF (Medium Density Fiberboard) para usinagem de desbaste e acabamento**. 2000. 139 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2000.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia de usinagem dos materiais**. São Paulo: MM, 2013.

DENDRUS. **Produção de MDF**. Disponível em: < <http://www.dendrus.com.br/projeto-localizacao-de-industria-de-mdf-no-brasil/> >. Acesso em: 18 set. 2018.

DURATEX S. A. **Propriedades do MDF com 15mm espessura**. Disponível em: < <https://www.duratexmadeira.com.br/paineis/paineis-mdf/> >. Acesso em: 30 set. 2018.

FLEXÃO de um corpo. Disponível em: < <http://dicioilustradoestruturas.blogspot.com/2012/05/> >. Acesso em 06 out. 2018.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

FUNCHAL, M. Evolução dos empregos no Brasil e no setor florestal. **O papel**, São Paulo, v. 50, n. 12, p. 11-19, dez. 2017.

GEOCITIES. **Componentes da força de usinagem.** Disponível em: < http://www.geocities.ws/cmovbr73/ProcFabr_Cap1_Introducao.pdf >. Acesso em: 01 set. 2018.

GEOCITIES. **Movimentos de corte e avanço.** Disponível em: < http://www.geocities.ws/cmovbr73/ProcFabr_Cap1_Introducao.pdf >. Acesso em: 01 set. 2018.

HALLITE. **Rugosidade total.** Disponível em: < <https://hallite.com/br/suporte/informacoes-do-projeto/rugosidade-da-superficie/> >. Acesso em: 04 set. 2018.

HMS. **Alguns tipos de brocas.** Disponível em: <<http://www.hmsproin.com/producto/brocas/>>. Acesso em: 05 ago. 2018.

GONÇALVES, M.T.T. **Processamento da madeira.** Bauru: Document Center Xerox –USC, 2000.

IBÁ; PÖYRY. **Produtividade de rotação média do ano de 2016.** Disponível em: <https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf >. Acesso em: 05 maio 2018.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída.** Curitiba: FUPEF, 2005.

LACERDA, S. **Furadeira e seus componentes principais.** Disponível em: <<https://docplayer.com.br/11165849-7-furacao-7-1-furadeira.html>>. Acesso em: 11 ago. 2018.

LEMASTER, R. L.; BEALL, F. C. The use of an optical profilometer to measure surface roughness in medium density fiberboard. **ForestProducts Journal**, LaGrange, v.46, n. 11/12, p. 73-8, 1996.

LUCAS FILHO, F. C. **Análise da usinagem da madeira visando a melhoria de processos em indústrias de móveis.** 2004. 176 f. Tese (Doutorado em Concentração de Gestão de Design e do Produto) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2004.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais.** São Paulo: Edgard Blücher, 2009.

MARCIANO, J. P. **Introdução ao controle numérico.** São Paulo. Disponível em: < <http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/cnc.pdf> > Acesso em: 20 ago. 2018.

MÉTODO para a produção de chapas MDF. **Revista da Madeira**, Porto Alegre, v.3, n. 67, p.25-28, 1982.

MISTUBISHI MATERIALS CORP. **Cavacos da furação**. Disponível em: < <http://www.mnbr-carbide.com.br/download> >. Acesso em: 15 jun. 2018a.

MISTUBISHI MATERIALS CORP. **Denominação das partes da broca e ponta de corte**. Disponível em: < <http://www.mnbr-carbide.com.br/download> >. Acesso em: 15 jun. 2018b.

MISTUBISHI MATERIALS CORP. **Formatos da ponta de corte da broca**. Disponível em: < <http://www.mnbr-carbide.com.br/download> >. Acesso em: 15 jun. 2018c.

MISTUBISHI MATERIALS CORP. **Principais materiais de ferramentas**. Disponível em: < <http://www.mnbr-carbide.com.br/download> >. Acesso em 15 jun. 2018d.

MISTUBISHI MATERIALS CORP. **Rugosidade média aritmética**. Disponível em: < <http://www.mnbr-carbide.com.br/download> >. Acesso em: 15 jun 2018e.

MITSUBISHI MATERIALS CORP. **Terminologia das brocas**. Disponível em: < <http://www.mnbr-carbide.com.br/download> > Acesso em: 15 jul. 2018f.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Características técnicas do bloco de conector NI BNC 2120**. Disponível em: < <http://www.ni.com/en-us.html> >. Acesso em: 13 agosto 2018.

PEDRO, R. **Processo produtivo de painéis MDF**. UNIUV, 2008. Disponível em : <http://engmadeira.yolasite.com/resources/Apostila_MDF.pdf> Acesso em: 10 jul. 2018.

PEIXOTO, D. **Influência dos elementos de ligas de aço rápido**. Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/10277568/>>. Acesso em: 13 ago. 2018.

ROBERTO ELEOTÉRIO, J.; TOMAZELLO FILHO, M.; BORTOLETTO JÚNIOR, G. **Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes massas específicas e teores de resina**. 2000. 122 f. Dissertação (Ciências e Tecnologia de Madeiras) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

RS. **Sensor de potência axial utilizado**. Disponível em: < <https://mt.rsdelivers.com/product/lem/at-100-b10/lem-at-series-current-sensor/0497356> >. Acesso em: 04 out. 2018.

SANDVIK COROMANT. **Classe de metal duro e suas características**. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/downloads/pages/default.aspx>>. Acesso em: 13 ago. 2018.

SANDVIK COROMANT. **Velocidades, rotação e avanço da broca na furação**. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/downloads/pages/default.aspx>>. Acesso em: 13 ago. 2018.

SETSUO, I. et al. Produção de painéis de madeira aglomerada de alta densificação com diferentes tipos de resinas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.1, n. 68, p. 39–43, 2005.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**. 4. ed. Boston: Butterworth–Heinemann, 2000.

VASQUES, D. **Lascamento da superfície**. Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/3693295/>>. Acesso em: 16 dez. 2018

VIBROCONTROL. **Características técnicas do módulo de vibração RMS TV10**. Disponível em: <<https://vibrocontrol.com.br/>>. Acesso em: 14 agos. 2018.

VINET, L.; ZHEDANOV, A. A “missing” family of classical orthogonal polynomials. **Indústria Brasileira de Árvores**, São Paulo, v.1, p. 20, 2017.

WRUBLAK, O. et al. Parâmetros e métodos de usinagem e sua relação com os custos do processo e o acabamento final do produto. In: ENCONTRO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA DOS CAMPOS GERAIS, 4., 2008, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UTFPR, 2008.

ZHANG, F. L.; WANG C. Y.; ZHUM, M. Nanostructured WC/Co composite powder prepared by high energy ball milling. **Scripta Materialia**, Amsterdã, v.49, p. 1123-1128, 2003.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 1666-11**: standard test methods for conducting machining tests of wood and wood-base panel materials. Philadelpia, 2011. p.226 – 245.

AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15316-3**: chapas de fibras de média densidade – parte 3 – métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 513**: classificação e aplicação de metais duros para usinagem com arestas de corte definidas – designação dos grupos principais e grupos de aplicação. Rio de Janeiro, 2013. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 3002-1**: grandezas básicas em usinagem e retificação. parte 1: geometria da parte cortante das ferramentas de corte – termos gerais, sistemas de referência, ângulos da ferramenta e de trabalho e quebra-cavacos. Rio de Janeiro, 2013. 70p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6162**: conceito da técnica de usinagem, movimentos e relações geométricas – terminologia. Rio de Janeiro, 1988.

BARROS, V.R. **Fresamento de madeiras de média densidade: MDF**. 2013. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Estadual Paulista, Campus Experimental de Itapeva, Itapeva, 2013.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **European Standard EN 317**: particleboards and fiberboards – determination of swelling in thickness after immersion in water. Bruxelas, 1993.

HALVARSSON, S.; EDLUND, H.; NORGREN, M. Properties of medium-density fiberboard (MDF) based on wheat straw and melamine modified urea formaldehyde (UMF) resin. **Industrial Crops And Products**, Amsterdã, v.28, p.37-46, 2008.

APÊNDICE A – BASE DE DADOS UTILIZADA

Sequência de usinagem	Rotação [rpm]	Velocidade de corte (V _c)	Avanço (f)	Lascamento máximo [μm]	Potência [W]	Força [gF]	Vibração [mm/s]	Ra [μm]	Rt [μm]	Diâmetro usinado [mm]	Erro diametral [mm]
1	4000	62,83	0,1	329,29	598,477	3,5262	3,63125	10,4	82,85	4,99	0,01
2	4000	62,83	0,1	508,67	624,737	3,1321	3,6937	7,68	69,52	4,99	0,01
3	4000	62,83	0,1	433,62	608,163	2,0085	3,678125	6,3	56,19	4,97	0,03
4	4000	62,83	0,2	609,53	617,779	3,5514	3,63125	10,7	106,3	4,95	0,05
5	4000	62,83	0,2	379,7	607,685	2,4571	3,8	12,6	104,9	4,95	0,05
6	4000	62,83	0,2	574,56	591,33	2,2097	3,6937	15,7	125	4,97	0,03
7	4000	62,83	0,3	609,97	587,417	3,1615	3,6781	11,1	110	4,99	0,01
8	4000	62,83	0,3	469,13	584,946	2,499	3,6937	13	100,3	4,93	0,07
9	4000	62,83	0,3	434,9	584,946	1,9875	3,6781	14,1	140,8	4,98	0,02
10	5500	86,39	0,1	244,27	1013,9	2,7925	3,709375	7,87	60,74	4,98	0,02
11	5500	86,39	0,1	254,4	590,156	1,4886	3,69375	10,9	107,9	4,99	0,01
12	5500	86,39	0,1	307,61	607,685	1,9121	3,69375	8,63	80,17	4,97	0,03
13	5500	86,39	0,2	487,22	617,779	2,3774	3,6625	14,4	109,9	4,96	0,04
14	5500	86,39	0,2	480,8	573,105	2,4152	3,7375	10,3	76,22	4,97	0,03
15	5500	86,39	0,2	648,28	567,417	2,0169	3,7219	16,4	146,5	4,98	0,02
16	5500	86,39	0,3	692,42	578,946	2,5074	3,6312	14,7	124,2	4,96	0,04
17	5500	86,39	0,3	639,21	573,417	2,65	3,6781	15,4	118,5	4,96	0,04
18	5500	86,39	0,3	576,76	573,182	1,8324	3,6781	15,1	93,65	4,95	0,05
19	7000	109,95	0,1	294,13	580,948	2,4655	3,615625	7	59,22	4,98	0,02
20	7000	109,95	0,1	262,74	607,208	2,1217	3,709375	7,88	68,68	4,95	0,05
21	7000	109,95	0,1	303,18	624,736	1,715	3,75312	12,6	84,53	4,95	0,05
22	7000	109,95	0,2	1238,75	623,031	1,824	3,7375	19,6	135,6	4,95	0,05
23	7000	109,95	0,2	406,15	590,156	2,2726	3,7219	15,3	127,5	4,95	0,05
24	7000	109,95	0,2	464,5	555,653	1,7779	3,7687	17,3	113,2	4,95	0,05
25	7000	109,95	0,3	824,6	562,006	2,0169	2,8622	12,6	122,6	4,93	0,07
26	7000	109,95	0,3	976,18	555,653	1,279	3,8	9,81	122,1	4,96	0,04
27	7000	109,95	0,3	520,7	520,36	1,5683	3,8156	17,1	139,4	4,96	0,04