



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Campus de Guaratinguetá

**ESTUDO DA USINAGEM DOS COMPOSTOS PLÁSTICO MADEIRA E MADEIRA
PLÁSTICA**

SARAH DAVID MÜZEL

Guaratinguetá, SP

2017

SARAH DAVID MÜZEL

**ESTUDO DA USINAGEM DOS COMPÓSITOS PLÁSTICO MADEIRA E MADEIRA
PLÁSTICA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia
do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual
Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, para a obtenção
do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área
de Materiais

Orientador:

Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves

Co-orientador:

Prof. Dr. Júlio Cesar Molina

Guaratinguetá, SP

2017

David Müzel, Sarah
D24 Estudo da usinagem dos compósitos plástico madeira e madeira
9e plástica / Sarah David Müzel – Guaratinguetá, 2017.
161 f : il.
Bibliografia: f. 137-146
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade
de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves
Coorientador: Prof. Dr. Júlio Cesar Molina
1. Compósitos poliméricos. 2. Aspereza de superfície.
3. Usinagem. I. Título

CDU 541.6(043)

SARAH DAVID MÜZEL

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


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


Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO
UNESP/FEG


Prof. Dr. FÁBIO MINORU YAMAJI
UFSCar/Sorocaba

Março de 2017

DADOS CURRICULARES

SARAH DAVID MÜZEL

NASCIMENTO	08.09.1988 - ITAPEVA/SP
FILIAÇÃO	Jane Moura Santos Bento Luís Carlos Bento
2005/2006	Curso Técnico Informática - ETEC Centro Paula Souza” Demétrio de Azevedo Junior”
2010/2014	Curso de Graduação Engenharia Industrial Madeireira, na Faculdade de Engenharia do Campus de Itapeva da Universidade Estadual Paulista.
2015/2017	Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

A Jane, Jacyra (In Memoriam) e Euclides (In Memoriam)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe por todo o apoio, paciência e compreensão.

Agradeço aos meus professores: Luiz Rogério de Oliveira Hein, Edson Cocchieri Botelho, José Vitor Candido de Souza, Marcos Valério Ribeiro; aos técnicos Juliano Rodrigo de Brito, José Manoel Bernardes e Domingos Hasmann Neto, sem vocês não seria possível a realização deste trabalho.

Aos meus orientadores Prof. Dr Manoel Cléber de Sampaio Alves e Prof. Dr Júlio Cesar Molina pela amizade, ensinamentos, paciência e principalmente pela oportunidade de realizar este trabalho.

Aos meus colegas Elida Alves, Mauricio Oliveira Filho, Dielly e Cássia Cavalcanti, Yuzo Kondo e Luiza Conejo por me ajudarem e me apoiarem na realização deste trabalho, por dividir as aflições e as vitórias durante todo o mestrado.

As minhas amigas Talita e Roberta, por me aguentarem o tempo todo falando da dissertação, por me apoiarem e me incentivarem durante todo o mestrado.

A minha amiga Larissa Ribas, por me ajudar na realização deste trabalho, pela amizade e companheirismo durante todos esses anos.

Ao Eduardo P. B., amigo e noivo, por me auxiliar nos ensaios, pelas longas horas de discussão e intensivas buscas bibliográficas sobre os temas abordados, pelo companheirismo e suporte para a realização desta dissertação.

As empresas Econs- Ecologia na Construção e Wisewood Soluções Ecológicas S.A pela doação dos materiais de estudo. E a empresa Seco Tools Brasil pela doação das ferramentas utilizadas nesse estudo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de mestrado (Nº do processo: 133198/2015-4).

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro na compra de equipamentos e auxílio para a participação em congresso, respectivamente.

Agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para essa dissertação.

Obrigada!

“São as perguntas que não sabemos responder que mais nos ensinam. Elas nos ensinam a pensar. Se você dá uma resposta a um homem, tudo o que ele ganha é um fato qualquer. Mas, se você lhe der uma pergunta, ele procurará suas próprias respostas”.

(Patrick Rothfuss)

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais retornará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

DAVID MÜZEL, S. **ESTUDO DA USINAGEM DOS COMPÓSITOS PLÁSTICO MADEIRA E MADEIRA PLÁSTICA** 2017. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Guaratinguetá, 2017.

RESUMO

O compósito plástico madeira e a madeira plástica são materiais utilizados em diversos setores como automotivo, movelaria e principalmente na construção civil. Eles se tornaram tendência em construções ecológicas, sendo adequado para a construção de pisos, *decks*, brises, escadas, esquadrias, piores e cercas. Tanto a produção da madeira plástica quanto do plástico madeira, em geral, é realizada via extrusão de perfis pré-definidos, porém, através da usinagem seria possível a produção de peças mais complexas em termos geométricos, dimensionais e superficiais, bem como, ampliar a utilização desses materiais na construção civil e na movelaria. Sendo assim, a presente proposta teve por objetivo o estudo da usinagem destes materiais. Para o estudo da usinagem da madeira plástica e do plástico madeira, foram realizados os processos de furação e de fresamento, nas modalidades tangencial e frontal, utilizando o método de Taguchi, tendo como fatores estudados as velocidades de corte e de avanço, o sentido de corte (concordante e discordante), a profundidade de corte e o tipo de material. As variáveis de saída analisadas foram o consumo de potência, a vibração média, o aquecimento das peças, a rugosidade, o desvio dimensional dos furos, a topografia das superfícies usinadas, o desgaste das ferramentas e os tipos e formas de cavacos gerados. Após os dados serem coletados foi realizada uma análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5%, para testar a existência de diferenças significativas entre as médias. Através dos resultados obtidos pode-se concluir que os materiais estudados apresentaram boa usinagem mediante os processos de fresamento e furação. Em geral o fresamento frontal apresentou melhor acabamento superficial e o tangencial menor consumo de potência, vibração e aquecimento das peças. Os furos realizados sofreram dilatação e ficaram menores que o esperado. Os cavacos gerados foram os mais diversos e nem sempre classificados pela ISO 3685:1993. As ferramentas de corte sofreram desgastes de flanco e a avaria do tipo lascamento. As velocidades de corte e de avanço e a profundidade de corte não apresentaram semelhança entre os entre itens analisados.

Palavras-chave: Compósito polimérico. Potência. Rugosidade. Vibração. Furação. Fresamento.

DAVID MÜZEL, MACHINING STUDY OF WOOD PLASTIC COMPOSITE AND PLASTIC LUMBER 2017. 159f. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) – São Paulo State University (Unesp), School of Engineering, Guaratinguetá, 2016.

ABSTRACT

The wood plastic composite and the plastic lumber are materials used in the several sectors like automotive, furnitures and mainly in the construction. They have become a tendency in ecological constructions, being appropriated for floors, decks, stairs, frames, piers and fences. Both the production of the plastic lumber and the wood plastic composite, in general, is carried out by extrusion of predefined profiles, however, with the machining it would be possible to produce more complex pieces in geometric, dimensional and superficial terms, as well as to extend the use of these materials in construction and furniture. Therefore, the purpose of this proposal was to study the machining of these materials. To the machining study of the plastic lumber and the wood plastic composite, drilling processes and milling, the tangential and front procedures were performed using the Taguchi method, with the factors studied cutting speeds and feed the cutting direction (concordant and discordant), depth of cut and the type of material and as output variable power consumption, the average vibration, heating the parts, the roughness, the dimensional tolerance of the holes, the topography of the machined surface, wear of tool types and shapes of chips generated. After the data is collected was carried out an analysis of variance (ANOVA) with 5% significance level to test the existence of significant differences between the means. The results obtained can be concluded that the materials studied showed good machinability through the milling and drilling processes. In general face milling showed better surface finish and tangential lower power consumption, vibration and heating of the parts. The holes made suffered dilated and were smaller than expected. The chips generated were the most diverse and not always classified by ISO 3685: 1993. The cutting tools suffered flank wear and chipping type failure. The cutting and feed velocities and the depth of cut did not show any similarity between the analyzed items.

Key-words: Polymer composites. Power rating. Roughness. Vibration. Drilling. Milling

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 GERAL	14
2.2 ESPECÍFICOS	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 COMPÓSITOS	15
3.2 COMPÓSITOS PLÁSTICO MADEIRA	16
3.2.1 HISTÓRICO	17
3.2.2 APLICAÇÕES	18
3.2.3 PRODUÇÃO	20
3.2.3.1 Matriz.....	20
3.2.3.2 Reforço	22
3.2.3.3 Aditivos	24
3.2.3.4 Processamento dos materiais	26
3.3 MADEIRA PLÁSTICA	26
3.4 USINAGEM.....	28
3.4.1 USINAGEM DE POLÍMEROS	28
3.4.2 USINAGEM DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS	29
3.4.3 PROCESSOS DE USINAGEM	30
3.4.3.1 Fresamento.....	30
3.4.3.1.1 <i>Fresamento discordante</i>	32
3.4.3.1.2 <i>Fresamento concordante</i>	34
3.4.3.1.3 <i>Fresamento combinado</i>	35
3.4.3.1.4 <i>Fresamento frontal</i>	35
3.4.3.1.5 <i>Fresamento tangencial</i>	36
3.4.3.2 Furação	37
3.4.3.2.1 <i>Movimento</i>	39
3.4.3.2.2 <i>Complicações no processo de furação</i>	40
3.4.4 USINABILIDADE	41
3.4.4.1 Características do cavaco.....	42
3.4.4.1.1 <i>Etapas de formação do cavaco</i>	42
3.4.4.1.2 <i>Tipos de cavacos</i>	45
3.4.4.1.3 <i>Formas de cavacos</i>	48
3.4.4.1 Desgaste e avaria das ferramentas de corte	50
3.4.4.2 Acabamento superficial da peça	57
3.4.4.2.1 <i>Largura média dos elementos do perfil de rugosidade</i>	60
3.4.4.2.2 Rugosidade Média	61
3.4.5 PARÂMETROS DO PROCESSO DE USINAGEM	62
3.4.5.1 Potência de usinagem	62
3.4.5.1.1 <i>Cálculo da potência de corte</i>	63

3.4.5.2	Vibração.....	64
3.4.5.3	Temperatura.....	67
3.5	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	69
3.5.1	MÉTODO TAGUCHI	69
4	MATERIAL E MÉTODOS	72
4.1	PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS.....	72
4.1.1	DENSIDADE	73
4.1.2	CISALHAMENTO	74
4.1.3	DUREZA	75
4.1.4	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	76
4.2	ANÁLISE TÉRMICA.....	76
4.2.1	ANÁLISE TERMOMECÂNICA	76
4.2.2	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA	77
4.3	ESTUDO DA USINAGEM.....	78
4.3.1	PROCESSO DE USINAGEM	78
4.3.1.1	Fresamento.....	79
4.3.1.2	Furação	82
4.3.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	84
4.3.2.1	Fresamento.....	84
4.3.2.2	Furação	85
4.3.2.3	Análise Estatística.....	86
4.3.3	SISTEMA AQUISIÇÃO DE DADOS	87
4.3.3.1	Potência consumida	87
4.3.3.2	Vibração.....	88
4.3.3.3	Aquecimento das peças durante a usinagem	89
4.3.4	DESGASTE E AVARIA DAS FERRAMENTAS DE CORTE	90
4.3.4.1	Comprimento de corte	91
4.3.4.1.1	<i>Fresamento</i>	91
4.3.4.1.2	<i>Furação</i>	93
4.3.5	TIPOS E FORMAS DE CAVACOS	94
4.3.6	INTEGRIDADE SUPERFICIAL	95
4.3.6.1	Rugosidade	95
4.3.6.2	Topografia.....	96
4.3.6.3	Desvio Dimensional.....	97
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	98
5.1	PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS.....	98
5.1.1	DENSIDADE	98
5.1.2	CISALHAMENTO	100
5.1.3	DUREZA	100
5.2	ANÁLISE TÉRMICA.....	101
5.2.1	ANÁLISE TERMOMECÂNICA	101
5.2.2	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA	101
5.3	ESTUDO DA USINAGEM.....	102
5.3.1	POTÊNCIA CONSUMIDA	102

5.3.2	VIBRAÇÃO	107
5.3.3	AQUECIMENTO DAS PEÇAS DURANTE A USINAGEM	112
5.3.4	DESGASTE E AVARIA DAS FERRAMENTAS DE CORTE	115
5.3.4.1	Fresamento	115
5.3.4.2	Furação	117
5.3.5	TIPOS E FORMAS DE CAVACOS	118
5.3.6	INTEGRIDADE SUPERFICIAL	125
5.3.6.1	Rugosidade	125
5.3.6.2	Desvio Dimensional dos Furos	135
6	CONCLUSÃO	136
	REFERÊNCIAS	137
	APÊNDICE A- ANÁLISE TERMOMECÂNICA	147
	APÊNDICE B- ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA	149
	APÊNDICE C- CONSUMO DE POTÊNCIA	151
	APÊNDICE D-VIBRAÇÃO MÉDIA	153
	APÊNDICE E- AQUECIMENTO DAS PEÇAS DURANTE A USINAGEM	155
	APÊNDICE F- RUGOSIDADE	157

1 INTRODUÇÃO

Os compósitos poliméricos são materiais formados por polímeros distintos ou por um polímero e outra classe de material. Atualmente existem diversos tipos e aplicações para compósitos poliméricos, desde molde de injeção até *decks*, por isso, esses materiais vêm ganhando mais espaço dentro das indústrias. Porém, devido à alta competitividade é determinante que as empresas atuem no desenvolvimento de novos materiais, bem como, na otimização dos métodos de fabricação e dos sistemas de manufatura, a fim de produzirem produtos de melhor qualidade, num menor tempo e com menor custo.

Nessa busca, procuram-se processos que favoreçam uma maior produtividade com menores custos e que atendam aos requisitos de uso final de cada peça, porém os compósitos podem ser aplicados nos mais diversos tipos de componentes e cada qual possui suas especificidades, bem como uma geometria diferente, tornando assim, cada vez mais difícil a sua fabricação. Nesse contexto a usinagem pode ser um processo, que se executado corretamente, se torna um aliado na manufatura dos compósitos (REZENDE, 2007; GAITONDE et al., 2012).

A usinagem de compósitos polímeros vem crescendo devido à necessidade de se produzir peças com alta exatidão, bem como, quando a quantidade de peças produzidas não justifica a utilização de moldes de injeção ou extrusão por matriz, devido ao alto custo monetário. Para se obter sucesso no processo de usinagem de peças poliméricas é necessário que se conheça muito bem o material que está sendo usinado, pois cada um apresenta características bastante particulares, bem como um comportamento diferenciado durante a usinagem. Portanto, os parâmetros de usinagem devem ser adequados para cada tipo de polímero.

Como exemplo, tem-se o compósito plástico madeira e a madeira plástica, produzidos principalmente pelo processo de extrusão, contudo através de um processo de usinagem, seria possível produzir peças mais complexas em termos geométricos, dimensionais e superficiais (BUEHLMANN; SALONI; LEMASTER, 2001; SALONI; BUEHLMANN; LEMASTER, 2011; SOMSAKOVA et al., 2012; HUTYROVÁ et al., 2014).

O termo compósito plástico madeira, refere-se a qualquer compósito produzido com madeira e resina polimérica. Já madeira plástica é um produto fabricado com 100% de polímero virgem ou reciclado, não contendo madeira em sua composição. Esses materiais são utilizados como substitutos da madeira serrada e atualmente no Brasil também são empregados como

substitutos de peças de ferro fundido em aplicações urbanas e sanitárias, sendo que neste caso é adicionado reforço de fibras de vidro na madeira plástica, tornando-a um composto polimérico. No âmbito da construção civil, eles podem ser perfeitamente utilizados como *decks*, *pallets*, batentes, portões, cercas, dormentes, cruzetas, mourões, fachadas, bancos, lixeiras, pergolados, placas, *playgrounds*, entre outros.

Devido ao aumento da utilização desses materiais, haverá também uma maior necessidade de processamento secundário dos mesmos, em virtude de uma variedade de razões. Exemplos para tais processos poderiam ser a necessidade de criar aberturas em superfícies sólidas, de mudar o perfil de uma peça já produzida, de melhorar o acabamento superficial ou até mesmo a modelagem /desbaste e aplainamento de um bloco bruto de material. No entanto, até agora existe pouco conhecimento quanto às propriedades do plástico madeira e da madeira plástica, quando submetidos ao processamento secundário (BUEHLMANN; SALONI; LEMASTER, 2001; HUTYROVÁ et al., 2014).

Contudo, o fato desses materiais serem compostos por constituintes distintos entre si (matriz e reforço) torna sua usinagem bastante complexa, dificultando a obtenção de superfícies de boa qualidade e de tolerâncias dimensionais e geométricas estreitas (GAITONDE et al., 2012). Portanto, há a necessidade de se gerar conhecimento acerca do comportamento dessa categoria de materiais durante operações de usinagem, visando obter um desempenho satisfatório durante o corte, além de produzir componentes que atendam aos requisitos estabelecidos (GUTIÉRREZ et al., 2014).

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Este trabalho teve por objetivo realizar estudo da usinagem dos compósitos plástico madeira e madeira plástica, através dos processos de fresamento e furação, visando um melhor conhecimento do comportamento desses materiais quando usinados.

2.2 ESPECÍFICOS

Analisar as propriedades físico-mecânicas do plástico madeira e da madeira plástica, sendo elas densidade, cisalhamento e dureza;

Determinar as faixas de temperatura de transição vítrea e de degradação dos materiais estudados, bem como a expansão térmica dos mesmos

Analisar o comportamento da rugosidade, da potência de corte, vibração, temperatura, desgaste das ferramentas e formação de cavacos nos processos de usinagem por fresamento e furação do compósito plástico madeira e da madeira plástica;

Verificar a influência das velocidades de corte e de avanço e da profundidade de corte na rugosidade produzida nos processos de usinagem por fresamento e furação destes materiais;

Comparar as diferentes formas de fresamento para os materiais de estudo;

Investigar o consumo de potência necessário para a usinagem dos compósitos plástico madeira e madeira plástica;

Investigar a integridade superficial das peças usinadas através da análise metalográfica.

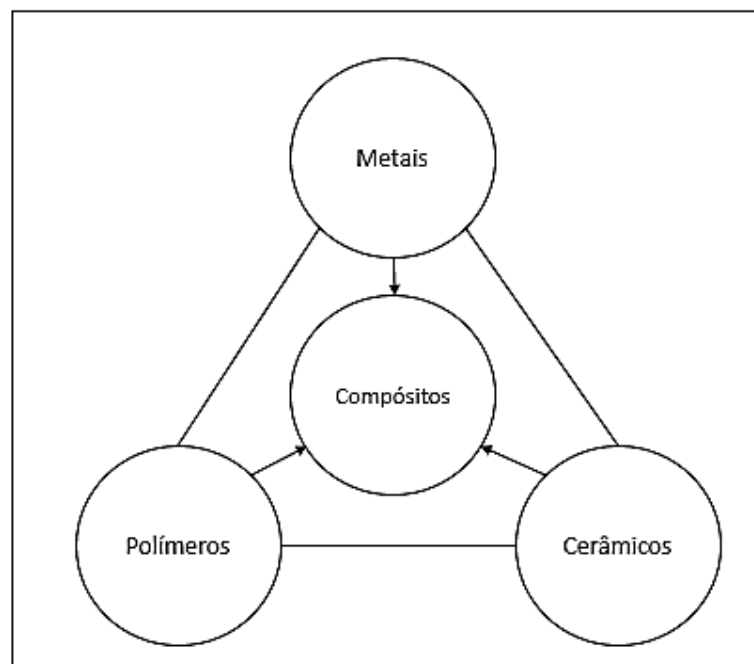
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 COMPÓSITOS

O avanço da tecnologia levou a crescente demanda por materiais com propriedades incomuns, as quais não podem ser atendidas pelos materiais convencionais como as ligas metálicas, cerâmicas e polímeros (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011; CALLISTER Jr; RETHWISCH, 2013).

Como forma de suprir essa necessidade surgiram os compósitos (Figura 1), os quais são constituídos pela combinação de dois ou mais materiais distintos e imiscíveis, que possuem propriedades mecânicas complementares e propriedades físicas e/ou químicas distintas (KAW, 2005; DURAND, 2008; CHUNG, 2010; REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011). Os compósitos são considerados como materiais de engenharia heterogêneos e multifásicos, no qual a fase que confere estrutura ao material e é responsável pela transferência dos esforços é chamada de matriz e a fase responsável pela resistência ao esforço é chamada de reforço (LEVY NETO; PARDINI, 2006; REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011; BERTHELOT, 2012; GAY, 2014).

Figura 1- Classificação dos materiais de engenharia



Fonte: Adaptado de Beaumont¹ (1989 apud Lima, 2009)

¹ BEAUMONT, P.W.R. (1989): The failure of fibre composites: an over view. **Journal of Strain Analysis**. v. 24, n4, p. 189-205 apud LIMA, A C. **Caracterização e propriedades de compósitos de tecido de juta reforçando**

Os compósitos possuem um conjunto de características de desempenho que seus constituintes individualmente, por si só, não podem alcançar (CHUNG, 2010; BERTHELOT, 2012). Como exemplo, Li, Mai e Ye (2000) citam a combinação de polímero e vidro, onde pode-se combinar a facilidade de conformação de um termoplástico com a dureza e resistência do vidro, no formato de fibra, obtendo assim um material mais resistente do que o plástico e menos frágil do que o vidro, podendo esse ser aplicado onde isoladamente nenhum dos dois seria adequado.

Devido às essas combinações é possível obter peças leves com elevada resistência e rigidez. Outras propriedades obtidas com os compósitos são: resistência a altas temperaturas, a corrosão e ao impacto, fato que torna muitas vezes mais interessante o uso dos compósitos ao invés de um único material (KATSOULIS et al., 2012; BOUMBIMBA et al., 2014).

Em virtude dessas características os compósitos são amplamente utilizados nas indústrias automobilística, aeroespacial, petroquímica, naval, eletroeletrônica, construção civil, energética, biomédica, esportiva, entre outras (MOURA; MORAIS; MAGALHÃES, 2005; CHUNG, 2010; REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011; KATSOULIS et al., 2012; BOUMBIMBA et al., 2014). Como resultado, os materiais compósitos constituem a maioria dos materiais de engenharia (CHUNG, 2010).

3.2 COMPÓSITOS PLÁSTICO MADEIRA

Segundo Clemons (2002), Caulfield et al. (2005) e Chindaprasirt et al. (2015) o plástico madeira ou Compósito Plástico Madeira (*Wood Plastic Composite -WPC*) é um material constituído por uma matriz polimérica reforçada com farinha de madeira, a qual consiste em uma mistura de fibras e partículas de madeira (Figura 2). De acordo com Taylor et al. (2009) a composição do WPC varia geralmente entre 30 -70% de madeira, 30-55% de polímero e 0,5-15% de aditivos.

Figura 2- Plástico madeira



Fonte: MADEPLAST (2015)

O WPC se tornou uma tendência em construções ecológicas, cujos proprietários desejam ter o mesmo efeito da madeira, mas preferem utilizar materiais reciclados. É um material adequado para a construção de pisos, *decks*, brises, escadas, esquadrias, píeres, cercas, entre outros. A mistura de plástico com madeira confere ao compósito ótimas características, como resistência mecânica e ao fogo, reciclabilidade, impermeabilidade e visualmente lembra a madeira (MARKARIAN, 2003; PRITCHARD, 2004; JAFARIAN; BEHRAVESH, 2007; WECHSLER; HIZIROGLU, 2007).

3.2.1 Histórico

Inicialmente o compósito plástico madeira foi produzido para atender a indústria automobilística. Por volta de 1900 foi desenvolvido, na Europa, o primeiro produto utilizando farinha de madeira e um polímero termofixo, à base de resina fenólica, esse produto foi denominado de Bakelite e foi utilizado na fabricação de partes do automóvel Rolls Royce (CLEMONS, 2002; CAULFIELD et al., 2005). Na década de 50 as indústrias desse ramo começaram a adicionar a farinha de madeira ao polipropileno para a fabricação de algumas partes internas dos carros, dando-se início as pesquisas do compósito plástico madeira. Somente no final da década de 80 o WPC começou a ser utilizado para a fabricação de *decks* (KOENIG; SYPKENS, 2002).

De acordo com Clemons (2002) em 1971, na Itália, foi patenteado o primeiro compósito plástico madeira produzido pelo processo de extrusão, o qual utilizou 50% de farinha de

madeira e 50% de polipropileno, sendo extrudado em forma de lâminas. Em 2003 foi desenvolvido um processo de produção por injeção, com fibras naturais e polipropileno, por possuir boas propriedades mecânicas, além de menor densidade e peso. Ambos os procedimentos foram desenvolvidos para a indústria automobilística.

Youngquist² (1995 apud Yamaji, 2004) cita que uma das causas que dificultou o desenvolvimento do WPC foi a distância entre as indústrias madeireiras e as plásticas. Pois segundo o autor essas indústrias competem em mercados diferentes e seus produtos possuem poucos materiais e equipamentos em comum, além de os processarem de forma muito diferentes. Clemons (2002) cita que outra dificuldade encontrada pelos fabricantes de plástico foi a falta de conhecimento sobre a madeira, então cada vez que tentavam utiliza-la como carga de materiais poliméricos, as tentativas fracassavam, fazendo com que a combinação de plástico e madeira ficasse desacreditada.

Bowyer et al. (2010), comentam a necessidade de maiores estudos sobre o WPC, pois de acordo com os autores, não em 2010 não havia um banco de dados com todas as características do material. Segundo os autores se comparado a utilização da madeira serrada, não há um histórico de longo prazo de uso do WPC, enquanto que as qualidades da madeira, bem como as dificuldades enfrentadas na sua utilização, já são conhecidas, a exemplo de outros materiais que o compósito plástico madeira vêm substituindo. Nos últimos anos o WPC vêm sendo produzido com diferentes traços e formas, através dos processos de extrusão e injeção, porém Najafi (2013) cita que haviam poucas e limitadas pesquisas a respeito do compósito, principalmente sobre as propriedades físicas e mecânicas do compósito produzidos com polímeros reciclados.

3.2.2 Aplicações

Inicialmente o WPC foi utilizado como substituto da madeira serrada e atualmente no Brasil também é empregado como substituto de peças de ferro fundido em aplicações urbanas e sanitárias, como nas tampas de instalações subterrâneas conhecidas como tampas de bueiros ou bocas de lobo de esgotos pluviais, reduzindo assim, seu custo tanto de fabricação, quanto de manutenção e evitando o furto para a refundição (TRIGUEIRO; BOCARDI, 2012). Como

² YOUNGQUIST, J.A. The marriage of wood and nonwood materials. **Forest Products Journal**, v.45, n.10, p.25-30, 1995 apud YAMAJI, F. M. **Produção de compósito plástico-madeira a partir de resíduos da indústria madeireira**. 2004. 182 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

substituto do ferro fundido ainda são fabricados cruzetas, mourões, entre outros (WISEWOOD, 2014).

No âmbito da construção civil, o plástico madeira pode ser perfeitamente utilizado como elemento de sustentação, como em *decks*, *pallets*, pisos, batentes, portões, cercas, dormentes de linhas férreas, entre outros. O WPC ainda pode ser utilizado na fabricação de móveis, janelas e portas (KLYOSOV, 2007; MOLINA; CARREIRA; CALLIL JR, 2007).

De acordo com a literatura o maior produtor e consumidor do WPC é o Estados Unidos, pois apesar do WPC ter começado a ser desenvolvido na Europa, teve um grande avanço de produção no EUA, onde é produzido desde a década de 50, porém teve um maior crescimento no mercado a partir dos anos 90, sendo utilizado pelos norte-americanos principalmente em ambientes externos (CLEMONS, 2002; YAMAJI; BONDUELLE, 2004; MARKETS AND MARKETS, 2014).

Segundo Trigueiro e Bocardi (2012) os norte-americanos preferem o WPC, pois requer menor manutenção e também por ser considerado como resistente ao mofo, ao apodrecimento e ao desgaste provocado pelo sol e pela maresia. Cerca de 35% das varandas e pátios dos Estados Unidos eram feitos com plástico madeira. Para os empresários a grande aceitação e procura por esse compósito está relacionada às diversas vantagens sobre outros materiais, como a resistência a corrosão, o que o torna mais vantajoso do que o ferro fundido em algumas aplicações. Além disso é um material menos higroscópico do que a madeira e, portanto, dimensionalmente mais estável, podendo ainda ser serrado, furado, parafusado, pregado e aplainado como uma peça de madeira (YOUNGQUIST, 2013). O WPC não solta farpas e nem atrai fungos ou cupim, não racha, não requer elementos de proteção como vernizes e seladores e pode ser limpo com água e sabão (MOLINA et al., 2007).

De acordo com Deligio (2004) outra razão para o crescimento da demanda desta nova classe de materiais deve-se à eliminação voluntária iniciada em 2003 nos EUA de produtos em madeira tratados com preservativos baseados em Cromo Cobre Arsênio (CCA), pois o descarte incorreto de resíduos de madeira tratada com CCA, pode acarretar na lixiviação de metais tóxicos para o ambiente, ou mesmo emissões para a atmosfera no caso de combustão (HELSEN; VAN DEN BULCK, 2005).

No Quadro 1 são apresentas as principais aplicações do WPC dentro de cada setor.

Quadro 1- Lista dos principais setores e a aplicações do WPC

Construção	Interiores/ Acabamento Interno	Automotivo	Áreas externas/Jardins	Industrial/Infra estrutura	Outros
Recobrimento (vertical e horizontal)	Balaustradas ³	Portas e foro	<i>Decks</i>	Corrimão e grades	Teclas de piano
Batente de portas e componentes	Acabamento para forro e rodapés	Dutos	Cercas e mourões	Embalagens industriais	Banheiras quentes (<i>ofurôs</i> e <i>jacuzzis</i>)
Dutos	Janelas Venezianas	Painéis interiores	Móveis de jardins	Anteparas e tabiques de marinas	
Placas e faixas de barco	Prateleiras e bancadas	Pisos de caminhões	<i>Outhouses</i> (galpões, etc)	<i>Palletes</i> e caixotes	
Rodapé	Perfis decorativos	Suporte de recobrimento de estepes	Bancos de jardim	Piers e docas	
Telhas e produtos de telhado	Painel interior		Equipamentos e superfícies de <i>playground</i>	Placas de sinalização	
Escadas	Armários de cozinha			Dormentes	
Tabuas	Piso			Latas de lixo	
Moldura de janelas e componentes	Isolamento acústico				

Fonte: Adaptado de Optimat Ltd and Merl Ltd (2003)

3.2.3 Produção

3.2.3.1 Matriz

O plástico madeira é um compósito de matriz polimérica, sendo empregado tanto polímeros termoplásticos quanto termorrígidos, entretanto os termoplásticos são os mais utilizados para a fabricação do WPC (CLEMONS, 2002; LIUKKO *et al.*, 2007).

Os polímeros termorrígidos se tornam permanentemente duros quando submetidos a aplicação de calor e não amolecem com um aquecimento subsequente, pois suas moléculas

³ Elementos de ornamentação (pilastras) usado em construção que serve como uma divisória de duas áreas, como exemplo em varandas e navios, podendo ser utilizada como um apoio ou um meio de segurança.

formam estruturas tridimensionais bem rígidas e que não podem ser reprocessadas (CLEMONS, 2002; MOURA, MORAIS e MAGALHÃES, 2005; REZENDE, COSTA e BOTELHO, 2011; GUTIÉRREZ et al., 2014). Esse polímero apresenta características como elevada rigidez e dureza, como exemplo tem-se as resinas epóxi e fenólicas (CLEMONS, 2002; CALLISTER Jr; RETHWISCH, 2013; GUTIÉRREZ et al., 2014).

Já os polímeros termoplásticos, se caracterizam por permitirem serem fundidos na presença de calor e endurecidos por resfriamento diversas vezes pois, são processos totalmente reversíveis e que podem ser repetidos, o que facilita sua reciclagem (CLEMONS, 2002; CALLISTER Jr; RETHWISCH, 2013; GUTIÉRREZ et al., 2014). Segundo Rezende, Costa e Botelho (2011) esses polímeros apresentam características como elevada resistência ao impacto e ao fogo, temperaturas de serviço mais elevadas que os termorrígidos e uma maior versatilidade na produção em série, além disso, possuem propriedades mecânicas iguais ou superiores às dos compósitos termorrígidos, como exemplo tem-se o polietileno (PE) e policloreto de vinila (PVC).

A escolha do polímero a ser utilizado irá depender das propriedades finais desejadas (MONDARDO, 2006). Porém, segundo English⁴ (2002a *apud* Yamaji, 2004), Mondardo, (2006) e Clemons (2002), é necessário tomar cuidado com a temperatura de degradação das fibras naturais, a qual gira em torno de 200°C, então os polímeros devem ser limitados aqueles com pontos de fusão abaixo deste valor. Segundo Mondardo (2006) e Koenig e Sypkens (2002) os termoplásticos mais utilizados para a produção de WPC são: polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) e policloreto de vinila (PVC). De acordo com Clemons (2002) entre estes polímeros o PE (virgem e reciclado) era responsável por 83% da quota de mercado, seguida de PVC (9%) e PP (7%). O PE era utilizado em componentes de construção exterior, como *deck*, cerca, tapume, entre outros. O PP era utilizado normalmente em automóveis. O PVC era utilizado principalmente na fabricação de janela, bem como algumas aplicações de *decks*.

As funções do polímero neste compósito que se destacam são: a resistência ao impacto, facilidade de fabricação do compósito, melhoria na resistência à umidade e ao ataque de xilófagos (YAMAJI, 2004; NISKA; SAIN, 2008; CATTO et al., 2016).

⁴ ENGLISH, B. Wood-filled plastics: an introduction. In: Annual meeting of Window and Door Manufacturers Association, 2000, USA. **Summaries...** Arizona, 2000 (a) *apud* YAMAJI, F. M. **Produção de compósito plástico-madeira a partir de resíduos da indústria madeireira.** 2004. 182 f. Tese (Doutorado)- UFPR, Curitiba, 2004.

3.2.3.2 Reforço

O compósito plástico madeira refere-se a quaisquer compósitos que contenha fibras naturais compostas por celulose (ASHORI, 2008). Segundo Youngquist⁵ (1995 apud Yamaji 2004); Joseph et al. (1996); Mattoso (1999); Joseph et al. (2002); Colom et al. (2003); Rozman⁶ (1998 apud Yamaji, 2004) e Sahebe e Jog (1999), a utilização de fibras naturais em compósitos poliméricos traz vantagens como a melhoria do desempenho mecânico dos plásticos convencionais, a diminuição do impacto ambiental, a reciclabilidade, menor custo, baixa densidade e a baixa abrasividade aos moldes e aos equipamentos de fabricação.

Dentre as fibras naturais as mais utilizadas são as fibras lignocelulósicas, pois são recursos abundantes e renováveis, além de serem reutilizáveis e biodegradáveis (CANTERO⁷ et al., 2003 apud YAMAJI, 2004). A farinha de madeira é a fibra lignocelulósicas mais utilizada para a produção do compósito plástico madeira (CLEMONS, 2002; YAMAJI, 2004; KLYOSOV, 2007; IRLE; BARBU, 2010).

A escolha da espécie de madeira e da granulometria ideal para a produção de WPC já rendeu diversos estudos. Em sua tese, Wang (2007) cita algumas dessas pesquisas. Para a escolha da espécie de madeira os resultados se mostram controversos, já que a utilização de conífera proporcionou melhor resistência mecânica ao compósito, porém as folhosas são as espécies mais utilizadas. Alguns autores explicam que a baixa utilização das coníferas é devido aos compostos aromáticos que elas possuem, os quais podem ser inflamáveis (KOENIG; SYPKENS, 2002).

Com relação à granulometria Wang (2007) concluiu que os estudos avaliados foram conflitantes, quando analisado o *mesh*⁸ das partículas, ou seja, sua granulometria. Se comparado o uso das fibras com as partículas, observou-se que os compósitos reforçados com fibras têm propriedades mecânicas superiores. Porém segundo o autor são necessárias mais pesquisas para

⁵ YOUNGQUIST, J.A. The marriage of wood and nonwood materials. **Forest Products Journal**, v.45, n.10, p.25-30, 1995 apud YAMAJI, F. M. **Produção de compósito plástico-madeira a partir de resíduos da indústria madeireira**. 2004. 182 f. Tese (Doutorado) – UFPR, Curitiba, 2004.

⁶ ROZMAN, H.D. The effect of lignin and surface activation on the mechanical properties of rubberwood-polypropylene composites. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, v.18, n.4, p.471-490, 1998 apud YAMAJI, F. M. **Produção de compósito plástico-madeira a partir de resíduos da indústria madeireira**. 2004. 182 f. Tese (Doutorado) –UFPR, Curitiba, 2004.

⁷ CANTERO, G.; ARBELAIZ, A.; MUGIKA F.; VALEA, A.; MONDRAGON, I. Mechanical behavior of wood/polypropylene composites: effects of fibre treatments and ageing process. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v.22, n.1, p.37-50, 2003 apud YAMAJI, F. M. **Produção de compósito plástico-madeira a partir de resíduos da indústria madeireira**. 2004. 182 f. Tese (Doutorado) , UFPR, Curitiba, 2004.

⁸ *Mesh*: número de furos em uma tela por polegada linear, portanto quanto maior o valor do *mesh* menor o tamanho da abertura.

se entender os mecanismos associados aos efeitos da geometria da bio-partícula na micromecânica dos compostos.

Segundo Wolcott e Englund (1999) na indústria de plásticos, a madeira pode ser classificada como partículas ou fibras. A diferença básica entre a fibra e a partícula de madeira está na razão de aspecto “comprimento : diâmetro”, onde as fibras possuem uma razão de 10:1 a 20:1, podendo chegar à 100:1 para algumas madeiras macias, possuindo um formato acicular. Já as partículas possuem uma razão de 1:1 a 4:1, ou seja, possuem uma geometria arredondada (PATTERSON⁹, 2001 apud WANG, 2007).

De um modo geral, as partículas de madeira são utilizadas como carga ou agente de enchimento, caso possuam a interface de adesão elevada, ajudando a aumentar a rigidez, porém nem sempre auxiliam na melhora da resistência do compósito (WOLCOTT; ENGLUND, 1999; WANG, 2007), mas comumente são utilizadas como extensores para diminuir o uso de polímeros. Já as fibras de madeira, assim como as naturais, podem ser usadas como reforço, ou seja, para aumentar a rigidez e resistência do compósito, pois seu comprimento é muito maior que sua secção transversal, o que faz com que as fibras suportem uma maior carga. (WOLCOTT; ENGLUND, 1999; WANG, 2007).

Para a produção de WPC em geral são utilizadas fibras curtas e partículas (WOLCOTT; ENGLUND, 1999). A madeira comercializada para esta finalidade é encontrada com granulometria entre 10 e 100 *mesh* (SCHUT, 1999; CLEMONS, 2002). Isto porque as partículas mais finas aumentam a rigidez, mas perdem na resistência ao impacto e as fibras longas contribuem para a resistência e diminuição do peso, além da uniformidade e do tamanho das partículas (SCHUT, 1999).

Para produtos que requerem alta rigidez a carga de madeira deve ser da ordem de 50% a 70% da mistura. Para produtos que requerem maior flexibilidade ou maleabilidade, a concentração de madeira deve ser menor (KOENIG; SYPKENS, 2002; WANG, 2007).

De acordo com Schut (1999) e Catto et al. (2016) a função da madeira nos compósitos é de aumentar a rigidez do material final, melhorar as propriedades de usinabilidade além de ter um custo menor que a resina. A madeira incorpora uma resistência natural contra os raios UV

⁹ PATTERSON, J. (2001) New opportunities with wood-flour-foamed PVC. J. Vinyl Addit. Technol. 7:138-141 apud WANG, Y. **Morphological Characterization of Wood plastic Composite (WPC) with Advanced imaging Tools: Developing Methodologies for Reliable Phase and Internal Damage Characterization**. PhD Thesis. Oregon State University. Corvallis, OR. p.123, 2007

e causa menor abrasão na extrusora do que as outras fibras, como a fibra de vidro. O aspecto negativo é que quanto menor o tamanho da partícula de madeira, maior será o risco de incêndio e explosão.

Stokke e Gardner¹⁰ (2003 apud Yamaji, 2004), ressaltam que para se utilizar partículas ou fibras de madeira como carga de enchimento ou reforço em compósitos, é fundamental entender as características químicas e estruturais da madeira. A madeira é constituída basicamente por celulose, hemicelulose, lignina e extrativos. Sua composição química e estrutura anatômica varia de acordo com a espécie, a qual é dividida em duas grandes classes: coníferas e folhosas.

3.2.3.3 Aditivos

Como forma de melhorar as propriedades de produção e desempenho do WPC são adicionados alguns aditivos a mistura. De acordo com a literatura, o WPC tem algumas restrições de uso, porém com os aditivos, problemas como a inflamabilidade e degradação por raios ultravioleta (UV) podem ser solucionados.

Embora a formulação da mistura seja segredo industrial, os aditivos normalmente utilizados são agentes compatibilizantes, pigmentos, lubrificantes, fungicidas, biocidas, estabilizantes, entre outros (WANG, 2007).

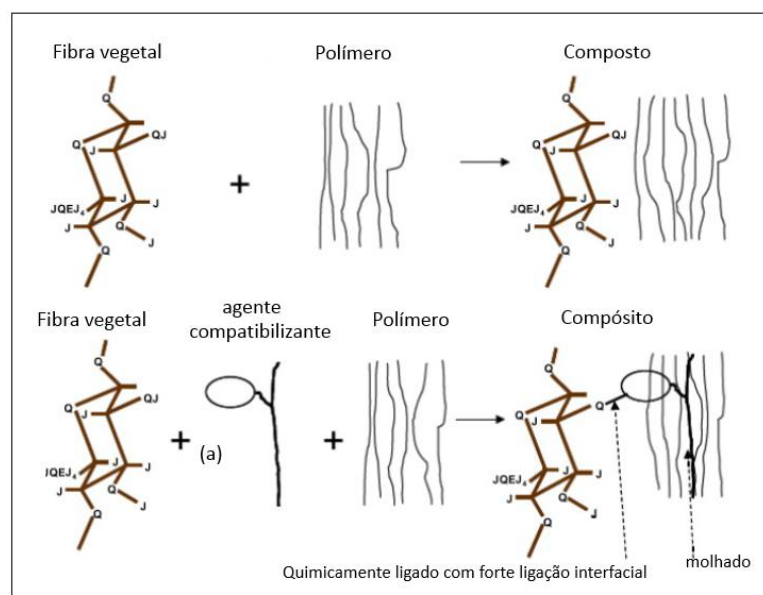
Segundo Wang (2007) pode-se descrever os principais aditivos como:

- **Agentes compatibilizantes ou agente de acoplamento:** são os aditivos utilizados como forma de aumentar as propriedades mecânicas, pois a madeira é hidrofílica o que a torna incompatível com os polímeros termoplásticos hidrofóbicos, podendo assim ocorrer a delaminação das fibras na matriz polimérica. Compatibilizantes são adicionados para influenciar a ligação interna entre a madeira e matriz de polímero. Isso ajuda a melhorar a dispersão, fluxo, e as propriedades mecânicas do compósito. Para isso o agente de acoplamento deve interagir com as fibras através de ligações covalentes fortes ou ligações de hidrogênio (interações secundárias), para isso uma grande quantidade de grupos funcionais deve estar presente no compatibilizante, para

¹⁰ STOKKE, D.D.; GARDNER, D.J. Fundamental Aspects of Wood as a Component of Thermoplastic Composites. **Journal of Vinyl & Additive Technology**, v.jun., p.112-16, 2003 apud YAMAJI, F. M. **Produção de compósito plástico-madeira a partir de resíduos da indústria madeireira**. 2004. 182 f. Tese (Doutorado), UFPR, Curitiba, 2004.

que ocorra a reação com as hidroxilas da celulose. O compatibilizante também deve possuir cadeias suficientemente longas de alta massa molecular que permitam a formação de emaranhados moleculares com a matriz polimérica, na interface, através de ancoramento mecânico (CORREA et al., 2003). Os agentes compatibilizantes mais utilizados são polipropileno-anidrido maleico (PPMA) e polietileno- anidrido maleico (MAPE). Na Figura 3 é apresentado o esquema do agente de acoplamento ligado quimicamente com a fibra hidrófila e misturados por meio de molhagem na cadeia do polímero hidrofóbico (YANG et al., 2007).

Figura 3- Esquemática da ligação do agente compatibilizante entre a fibra hidrofílica e da matriz polimérica hidrofóbica



Fonte: Adaptado de Yang et al. (2007)

- **Lubrificantes:** são utilizados para reduzir o atrito no processo de conformação e assim aumentar o rendimento e melhorar a aparência da superfície do WPC;
- **Pigmentos ou corantes:** são utilizados para fornecer tanto uma aparência de madeira como resistência aos raios UV. Devem ser adicionados de 1% a 3% de pigmentos, ou superior, para compensar a coloração da madeira;
- **Agentes espumantes:** são utilizados para evitar a formação de espuma química, melhorar a aparência da superfície, a velocidade de processamento, a trabalhabilidade e a facilidade de acabamento de superfície dos produtos;

- **Biocidas e antifúngicos:** servem para proteger tanto a matriz polimérica e manter sua aparência superficial, como preservar a madeira, além de reduzir a taxa de absorção de umidade.

3.2.3.4 Processamento dos materiais

A produção do compósito plástico madeira normalmente é realizado em duas etapas de produção, sendo elas a mistura das matérias-primas já secas e a moldagem do produto final. De acordo com Clemons (2002) inicialmente as matérias-primas são misturadas, processo que consiste basicamente na dispersão das fibras vegetais no polímero fundido, seja via processo em batelada (lotes) ou em misturadores contínuos. Na sequência, a mistura pode ser imediatamente injetada no molde do produto final (processo em linha) ou ser transformada em grãos para posterior processamento (CLEMONS, 2002; KALPAKJIAN; SCHMID, 2009).

Embora o processo de extrusão (extrusoras monorosca ou de rosca dupla) seja o mais utilizado, outras tecnologias de processamento, tais como moldagem por injeção e por compressão são também utilizados para produzir WPCs, porém em menor escala (MONDARDO, 2006; WANG, 2007; KALPAKJIAN e SCHMID, 2009).

Uma das etapas mais importantes do processo de produção do WPC é a pré-secagem das matérias primas, principalmente das fibras naturais, visando o controle da umidade residual. Entretanto, alguns processos tecnologicamente mais avançados dispensam esta etapa preparatória, pois possuem uma zona específica para desgaseificação da mistura fundida. Estas alternativas são comuns em extrusoras de dupla rosca (MONDARDO, 2006).

3.3 MADEIRA PLÁSTICA

Diferente do compósito plástico madeira a Madeira Plástica (MP) ou *Plastic Lumber*, é um produto fabricado com 100% de polímero virgem ou reciclado, não contendo madeira em sua composição. Portanto não deve ser confundida com o plástico madeira.

De acordo com Blass¹¹ (1988 apud Yamaji, 2004) os perfis extrudados a partir da reciclagem de plásticos misturados, realizada pelo processo mecânico, podem substituir a

¹¹ BLASS, A. **Processamento de polímeros**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1988 apud YAMAJI, F. M. **Produção de compósito plástico-madeira a partir de resíduos da indústria madeireira**. 2004. 182 f. Tese (Doutorado), UFPR, Curitiba, 2004.

madeira natural, os quais são denominados de madeiras plásticas. A madeira plástica acaba tendo quase que as mesmas aplicações do WPC, podendo ser utilizada como *decks*, fachadas, bancos, lixeiras, pergolados, placas, chapas, cercas, mourões, *playgrounds*, entre outros.

Os fabricantes da MP afirmam que esse material é ecologicamente correto e requer menos manutenção do que de madeira ou do que o WPC, além de não ser suscetível a ataques de xilófagos. Ao contrário do plástico madeira a madeira plástica é um produto 100% reciclado e reciclável (WISEWOOD, 2014; ECOPEX-MATERIAIS ECOLÓGICOS, 2015).

No Brasil a produção de MP iniciou na Universidade Federal do Rio de Janeiro- UFRJ, onde foi desenvolvido um projeto de materiais alternativos a partir da reciclagem de plásticos recolhidos do lixo urbano (GUAMÁ et al., 2008).

A madeira plástica possui uma coloração acinzentada, por isso, são adicionados alguns pigmentos amarelos e vermelhos para que o produto adquira cor de madeira. Além desses pigmentos são adicionadas cargas dando ao material propriedades semelhantes a da madeira natural. Pesquisas mostram que apenas alguns tipos de madeira plástica liberam substâncias tóxicas (GUAMÁ et al., 2008).

Segundo a empresa Ecopex-Materiais Ecológicos (2015), a qual desenvolve projetos e comercializa produtos dos mais variados para construções ecológicas, a diferença entre a madeira plástica e o plástico madeira está basicamente na composição de cada um, pois eles possuem vida útil parecida e aquecem da mesma maneira. Portanto, para a empresa, resumidamente a diferença entre os produtos fica por conta dos valores e do gosto pessoal quanto ao acabamento.

Porém segundo a *Plastics Technology*¹² (1993 apud Yamaji, 2004) se comparado com a madeira *in natura*, o WPC é mais parecido do que a MP, pois as fibras da madeira adicionadas ao compósito proporcionam uma superfície não escorregadia e o compósito ainda pode ser pintado com tinta óleo ou a base de água. As fibras da madeira são também um estabilizador natural contra os raios UV.

¹² PLASTICS TECHNOLOGY. Plastic wood makes good. *Plastic Technology*, v.39, n.3, p.94, 1993. YAMAJI, F. M. **Produção de compósito plástico-madeira a partir de resíduos da indústria madeireira**. 2004. 182 f. Tese (Doutorado), UFPR, Curitiba, 2004.

3.4 USINAGEM

Para a fabricação de qualquer tipo de objeto, independente do material, é necessário dar forma e dimensão. Muitas empresas ao redor do mundo realizam esse tipo de serviço, podendo ele ser efetuado de diversas formas como fundição, forjamento, extrusão, conformação mecânica e usinagem. Dentre todos os processos de fabricação aplicados, a usinagem é o mais flexível em termos de formatos e dimensões e é o que garante maior precisão das dimensões das peças e melhor acabamento (MACHADO et al., 2009; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Mesmo após o forjamento ou fundição de uma peça, muitas vezes é necessário melhorar suas características e nesse caso é realizada uma usinagem, justamente para garantir os parâmetros dimensionais e melhorar o seu acabamento.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), a usinagem é uma operação que tem como objetivo dar forma e acabamento a diversos materiais e a combinação dessas características gera o cavaco, que é a uma porção de material retirada durante o processo de usinagem por uma ferramenta de corte. O processo de usinagem é realizado pelo homem desde a idade da pedra lascada, cujo objetivo era de apenas conferir uma forma grosseira aos utensílios. Atualmente é empregado com o objetivo de conferir não somente forma, mas também dimensão e acabamento planejado a uma peça.

3.4.1 Usinagem de polímeros

A usinagem de polímeros vem crescendo devido à necessidade de se produzir peças com alta exatidão dimensional, como por exemplo, lentes poliméricas (XIAO; ZHANG, 2002). Ou ainda, quando a quantidade de peças produzidas não justifica a utilização de moldes de injeção ou extrusão por matriz, devido ao alto custo monetário (SCHNEIDER et al., 2008).

Para se obter sucesso no processo de usinagem de peças poliméricas é necessário que se conheça muito bem o material que está sendo usinado, pois cada um apresenta características bastante particulares, bem como um comportamento diferenciado durante a usinagem. Portanto, os parâmetros de usinagem devem ser adequados para cada tipo de polímero (FERNANDES et al., 2007).

Os princípios básicos da usinagem de plásticos são basicamente os mesmos dos metais, entretanto, a geometria da ferramenta, as velocidades de corte de avanço devem ser ajustadas

adequadamente, já que há o risco de aquecer demasiadamente o material, devido à baixa condutividade térmica dos polímeros. Outro fator que deve ser considerado é o tipo do fluido de corte, o qual não pode reagir quimicamente com o material sob processamento (FERNANDES et al., 2007).

Os polímeros permitem a utilização de altas velocidades de corte e de avanço, mas a profundidade de corte deve ser pequena. A ferramenta de corte utilizada deve ser dura e afiada, pois os plásticos, geralmente, são materiais abrasivos, acarretando em um rápido desgaste das ferramentas. Quando a alta produção justifica o custo, são empregadas ferramentas de diamante, nas quais o desgaste da aresta de corte é mais demorado, conseqüentemente, produz um melhor acabamento superficial. As ferramentas de diamante são particularmente vantajosas quando o plástico é mais abrasivo, como no caso dos reforçados (KALPAKJIAN, 2006).

Um dos grandes problemas na usinagem de polímeros, está na qualidade superficial, pois devido ao excesso de calor gerado pelo processo, pode ocorrer a “queima” da superfície usinada, demandando um processo de acabamento posterior (WESTRUPP, 2008). Esse problema também pode ser ocasionado por desgaste na aresta de corte da ferramenta. Em geral, esse problema ocorre quando não são consideradas características reológicas e térmicas dos polímeros como: calor específico, condutividade térmica e coeficiente de expansão térmica (LEE; KIM; CHOI, 2000; WEIDENFELLER; SCHILLING, 2004).

3.4.2 Usinagem de compósitos poliméricos

Existem diversos tipos e aplicações para compósitos poliméricos, desde molde de injeção até *decks*, por isso, esses materiais têm ganhando mais espaço dentro das indústrias. Além disso, a alta competitividade é determinante para que as empresas atuem no desenvolvimento de novos materiais, bem como na otimização dos métodos de fabricação e dos sistemas de manufatura, a fim de entregar um produto de melhor qualidade, num menor tempo e com menor custo (WESTRUPP, 2008).

Nessa busca, procura-se processos que favoreçam uma maior produtividade com menores custos e que atendam aos requisitos de uso final de cada peça, porém os compósitos podem ser aplicado nos mais diversos tipos de componentes e cada qual possui suas especificidades, bem como uma geometria diferente, tornando assim cada vez mais difícil a sua fabricação. Nesse

contexto a usinagem pode ser um processo, que se executado corretamente, se torna um aliado na manufatura dos compósitos (REZENDE, 2007; GAITONDE *et al.*, 2012).

Como exemplo tem-se o compósito plástico madeira e a madeira plástica, que são produzidos principalmente pelo processo de extrusão, porém através de um processo de usinagem, seria possível produzir peças mais complexas em termos geométricos, dimensionais e superficiais (BUEHLMANN; SALONI; LEMASTER, 2001; SALONI; BUEHLMANN; LEMASTER, 2011; SOMSAKOVA *et al.*, 2012; HUTYROVÁ *et al.*, 2014).

Além disso, com o aumento da utilização desses materiais, haverá também uma maior necessidade de processamento secundário dos mesmos, devido à uma variedade de razões. Exemplos para tais processos poderiam ser a necessidade de criar aberturas em superfícies sólidas, de mudar o perfil de uma peça já produzida, de melhorar o acabamento superficial para certas aplicações ou até a modelagem /desbaste e aplainamento de um bloco bruto de material. No entanto, existe até agora muito pouco conhecimento quanto às propriedades do WPC e da MP sujeitos ao processamento secundário (BUEHLMANN; SALONI; LEMASTER, 2001; HUTYROVÁ *et al.*, 2014).

Contudo, o fato desses materiais serem compostos por constituintes distintos entre si (matriz e reforço) torna sua usinagem bastante complexa, dificultando a obtenção de superfícies de boa qualidade e de tolerâncias dimensionais e geométricas estreitas (GAITONDE *et al.*, 2012). Portanto, há a necessidade de se gerar conhecimento acerca do comportamento dessa categoria de materiais durante operações de usinagem, visando se obter um desempenho satisfatório durante o corte, além de produzir componentes que atendam aos requisitos estabelecidos (GUTIÉRREZ *et al.*, 2014).

3.4.3 Processos de usinagem

Existe diversos tipos de processos de usinagem que podem ser empregados, aos mais diversos tipos de materiais, tais como torneamento, fresamento, furação, dentre outros.

3.4.3.1 Fresamento

A operação de fresamento é uma das mais importantes dentre os processos de usinagem com remoção de cavaco através de energia mecânica. De acordo com Shaw (2005), Kalpakjian

(2006), Trent e Wright (2000), Diniz, Marcondes e Coppini (2013) e De Vos; Ståhl (2014) fresamento é uma operação de usinagem intermitente, caracterizada pela utilização de uma ferramenta rotativa multicortante (múltiplas arestas de corte dispostas simetricamente em torno de um eixo) denominada fresa, gerando superfícies das mais variadas formas geométricas. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam segundo uma trajetória qualquer (ABNT NBR 6175:2015).

No fresamento, a remoção do cavaco é realizada pela combinação de dois movimentos efetuados simultaneamente, sendo eles a rotação da ferramenta ao redor do seu eixo (velocidade de corte) e o movimento da mesa da máquina-ferramenta (velocidade de avanço), onde é fixada a peça a ser usinada, o qual é o movimento de avanço que leva a peça até a ferramenta de corte e torna possível a operação de usinagem. Porém em situações especiais, a peça pode ficar estática enquanto a ferramenta realiza todos os movimentos (FERRARESI, 2006).

As vantagens do processo de fresamento residem na variedade de formas que podem ser produzidas, na qualidade dos acabamentos superficiais, nas altas taxas de remoção de material (alta produtividade) e na disponibilidade de ampla variedade de ferramentas, que podem ser construídas ou associadas para produzir superfícies bastante complexas (ROHLOFF, 2012).

Segundo Kalpakjian (2006), para o fresamento de polímeros a geometria da ferramenta de corte deve possuir ângulo de folga de 8° a 12° e ângulo de inclinação zero ou ligeiramente negativo. Os materiais de ferramentas recomendados são os aços de alta velocidade M2 e M7 (AISI / ASTM A600-92a:2004) e as de metal duro da classe K20 (ISO 513:2015). No Quadro 2 são apresentadas recomendações para o fresamento de polímeros, termoplásticos ou termorrígidos.

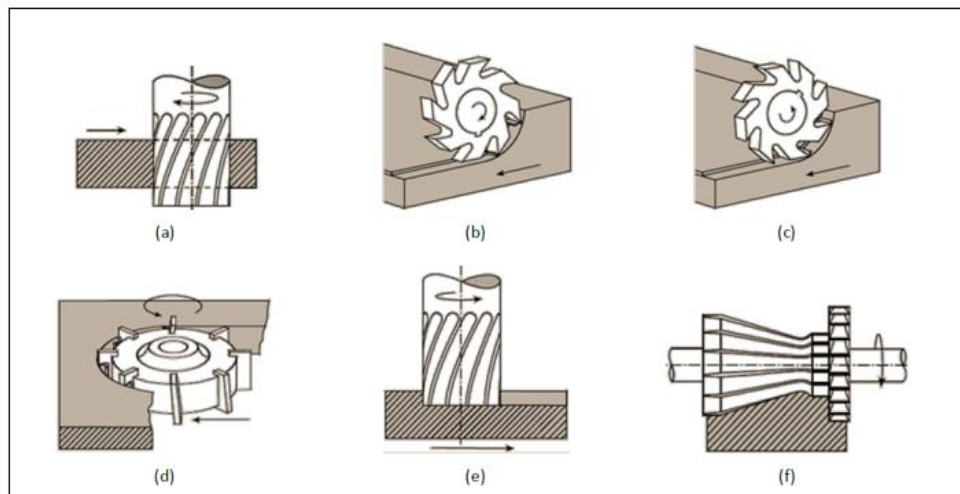
Quadro 2- Recomendações gerais para operações de fresamento

Ferramenta de corte	Condições de partida			Condições gerais	
	Profundidade de corte (mm)	Avanço (mm/dente)	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/dente)	Velocidade de corte (m/min)
Sem revestimento	1,0 - 8,0	0,13 - 0,23	270 - 460	0,08 - 0,46	90 - 1.370
Com revestimento					
Diamante policristalino					

Fonte: Adaptado de Kennametal Inc [?] apud Kalpakjian (2006)

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), Kratochvil (2004) e Klocke (2011) o processo de fresamento pode ser dividido basicamente em relação ao movimento relativo entre a peça e a ferramenta (fresamento discordante, concordante ou combinado), segundo a posição do eixo-árvore da máquina-ferramenta (fresamento horizontal, vertical ou inclinado) e quanto aos métodos de fresar superfícies segundo a disposição dos dentes ativos da fresa (fresamento tangencial ou periférico e fresamento frontal). Na Figura 4 são apresentados alguns tipos de processos de fresamento.

Figura 4- Alguns processos de fresamento (a) cilíndrico tangencial; (b) cilíndrico tangencial concordante; (c) cilíndrico tangencial discordante. (d) frontal: (e) frontal de canal com fresa de topo; (f) composto fresamento cilíndrico tangencial

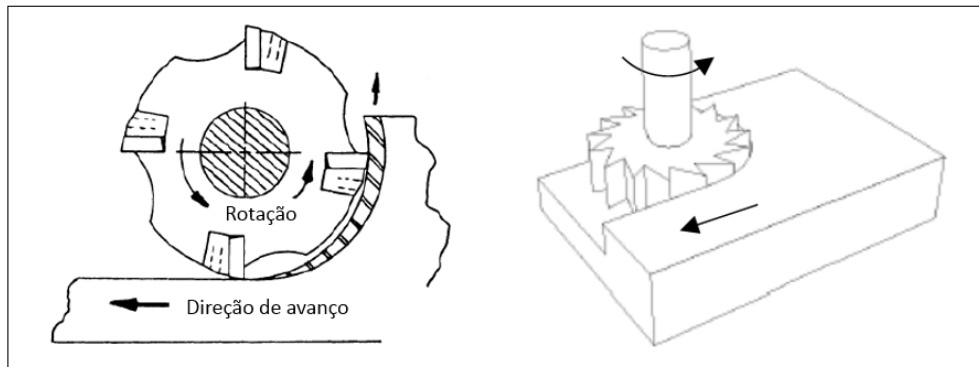


Fonte: Souza (2011)

3.4.3.1.1 Fresamento discordante

No fresamento discordante o sentido de rotação da fresa é contrário ao sentido de avanço da peça, no ponto de contato. Isto faz com que o corte do cavaco se inicie com a espessura mínima e o ângulo de contato do dente cresça de zero a um valor máximo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Na Figura 5 é apresentado um esquema do fresamento discordante.

Figura 5- Fresamento discordante

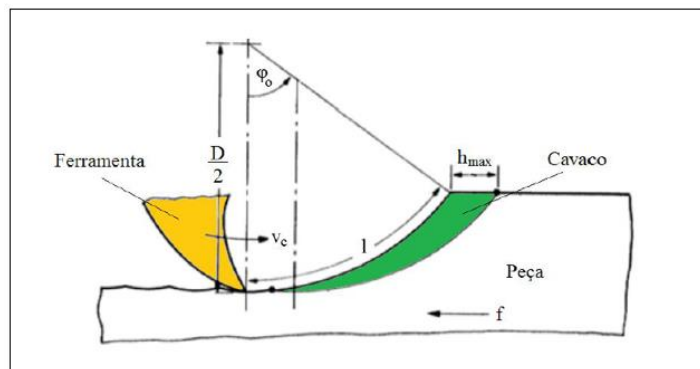


Fonte: Adaptado de Souza (2016a)

No fresamento discordante o corte inicia-se com pouca espessura, o que causa dificuldade e acarreta em um maior desgaste da ferramenta de corte. Quando a aresta de corte toca a peça ela é forçada para dentro da peça (deformação plástica), criando um excessivo atrito e altas temperaturas, conseqüentemente, menor vida das ferramentas nesse tipo de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Quando a pressão da aresta cortante atinge um valor capaz de vencer a tensão de ruptura do material da peça, a ferramenta penetra na peça e, com os movimentos de usinagem, retira uma porção de cavaco em forma de vírgula (Figura 6), o qual escorrega sobre a peça, provocando desgaste abrasivo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Figura 6- Geometria do cavaco de fresamento - sentido discordante



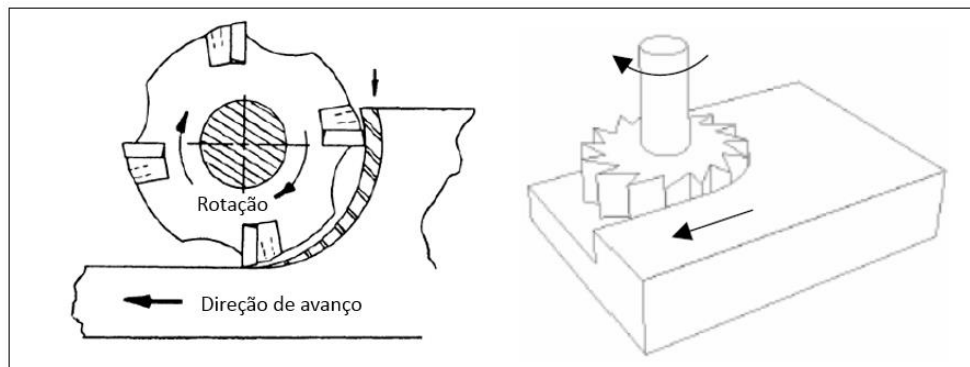
Fonte: Souza (2016a)

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013) outro problema deste tipo de fresamento, ocorre no início da operação de cada dente, onde a componente vertical da força de usinagem tende a afastar a ferramenta da peça e empurra a peça contra a mesa da fresadora, enquanto que no fim da operação de um dente, a aresta cortante tende a arrancar a peça da mesa. Esta alternância produz vibrações indesejáveis, que prejudicam o acabamento superficial e a tolerância da peça fresada (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). O fresamento discordante é o mais indicado para a usinagem em máquinas convencionais, já que não há a possibilidade de folga no sistema de avanço por fuso/porca no deslocamento da mesa. Com isso, o movimento torna-se mais uniforme, gerando melhor acabamento nessas máquinas.

3.4.3.1.2 Fresamento concordante

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), no fresamento concordante o sentido de rotação da fresa é o mesmo do avanço da peça no ponto de contato. Isto faz com que o corte do cavaco se inicie com a espessura máxima e o ângulo de contato do dente decresça de um valor máximo a zero (Figura 7).

Figura 7- Fresamento concordante



Fonte: Adaptado de Souza (2016a)

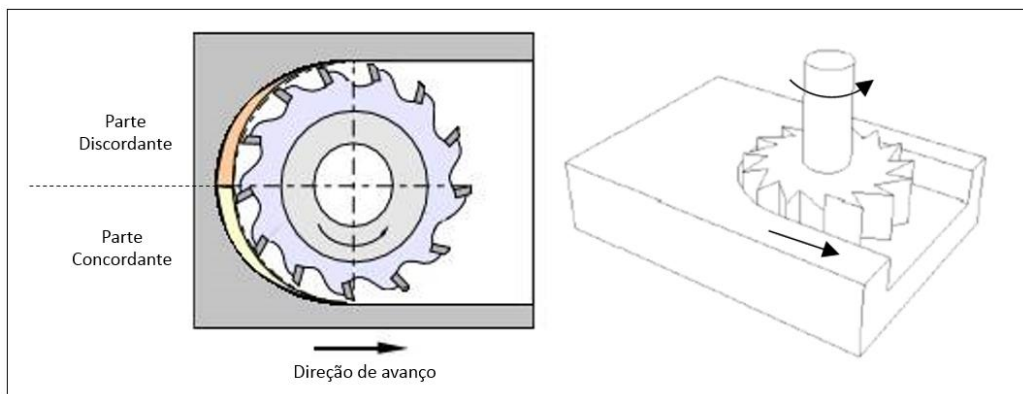
Segundo Stemmer (1995) e Diniz, Marcondes e Coppini (2013), diferente do fresamento discordante, no concordante os efeitos de vibração da mesa são sanados, pois a componente vertical da força de usinagem sempre tem o mesmo sentido, isto é, sempre empurra a peça em direção da mesa. Em geral o fresamento no sentido concordante proporciona uma melhor qualidade superficial as peças, quando utilizado máquina CNC (Comando Numérico

Computadorizado). Além disso, a ferramenta utilizada no fresamento concordante terá menor desgaste nas arestas cortantes, devido ao início do corte (STEMMER, 1995).

3.4.3.1.3 Fresamento combinado

De acordo com Ferraresi (2006) o fresamento apesar de ser realizado nos sentidos concordante ou discordante, em algumas ocasiões podem ocorrer simultaneamente, o qual ocorre quando a fresa tem seu eixo dentro do campo de corte da peça. Desta forma, parte do corte ocorre através do fresamento concordante e parte através do discordante (Figura 8). Este corte combinado ocorre na maioria dos processos de fresamento frontal com fresa de topo.

Figura 8- Fresamento combinado

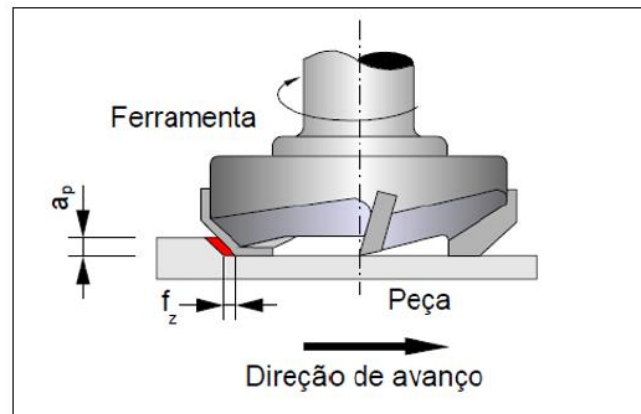


Fonte: Adaptado de Souza (2016a)

3.4.3.1.4 Fresamento frontal

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013) o fresamento frontal é uma operação na qual as arestas de corte estão na superfície frontal da ferramenta e o eixo da fresa é perpendicular ao da peça. De acordo Kalpakjian e Schmid (2009) e Diniz, Marcondes e Coppini (2013) esse método é caracterizado pelos riscos deixados pelos dentes das fresas usadas no processo de usinagem por toda a profundidade de corte (a_p), de acordo com o avanço por volta (f) e por dente (f_z) (Figura 9). Esse método é muito utilizado devido à sua alta produtividade e em geral, o fresamento frontal é realizado em fresadoras verticais. As ferramentas de corte são chamadas de fresas de topo ou fresas frontais.

Figura 9- Fresamento frontal

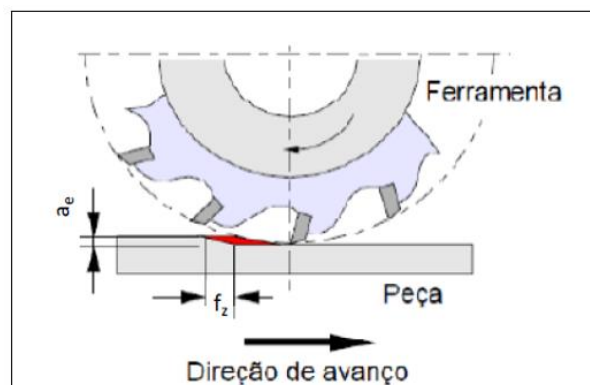


Fonte: Souza (2016a)

3.4.3.1.5 Fresamento tangencial

Segundo Kalpakjian e Schmid (2009) e Diniz, Marcondes e Coppini (2013) o fresamento tangencial ou periférico é uma operação na qual as arestas de corte estão na superfície cilíndrica da ferramenta e o eixo da fresa é paralelo ao eixo da peça. A seção transversal da superfície fresada corresponde ao contorno da fresa ou à combinação das fresas e, a superfície usinada é gerada pela aresta principal de corte (Figura 10). Usualmente, o fresamento tangencial é realizado em fresadoras horizontais e as ferramentas de corte são chamadas de fresas de disco, fresas cilíndricas ou fresas tangenciais.

Figura 10- Fresamento tangencial

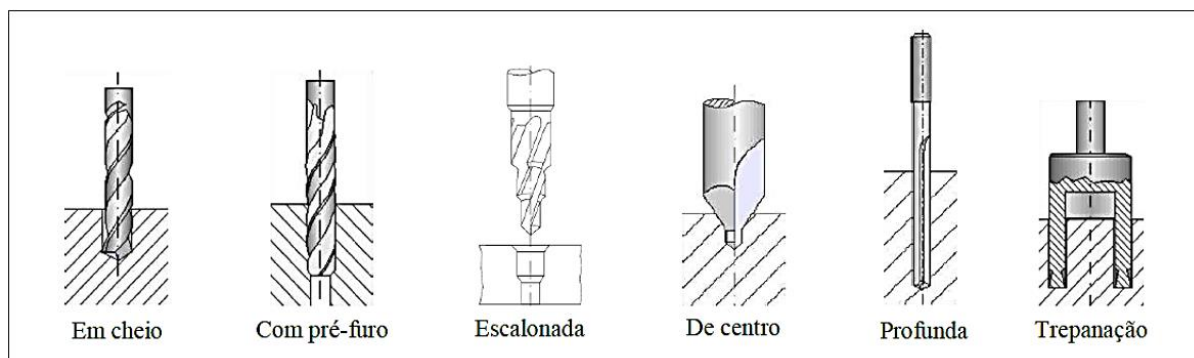


Fonte: Souza (2016a)

3.4.3.2 Furação

Segundo Shaw (2005), Stephenson e Agapiou (2006) e Ferraresi (2006) a furação é um processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de um furo geralmente cilíndrico em numa peça, com o auxílio de uma ferramenta multicortante. Segundo Klocke (2011) e Tsao (2012), na furação o movimento de corte é circular e o movimento de avanço é linear na direção do eixo de rotação da ferramenta de corte (broca). O processo de furação pode ser classificado de acordo com as características requeridas no furo realizado (Figura 14).

Figura 11- Alguns processos de de furação



Fonte: Adaptado de Souza (2011)

Segundo Kalpakjian e Schmid (2009) e Klocke (2011) os processos de furação podem ser definidos como:

- **Furação em cheio:** processo destinado à abertura de um furo cilíndrico numa peça, removendo todo o material compreendido no volume do furo final, na forma de cavaco. No caso de furos de grande profundidade há necessidade de ferramenta especial;
- **Pré-furo ou Escareamento:** processo destinado à abertura de um furo cilíndrico numa peça pré-furada, o qual é realizado para que a broca não realize um corte excêntrico já a partir do início do furo;
- **Furação escalonada:** processo destinado à obtenção de um furo com dois ou mais diâmetros simultaneamente;

- **Furação de centros:** processo destinado à obtenção de furos de centro, visando uma operação posterior na peça;
- **Furação profunda:** processo onde o furo possui uma faixa de profundidade de diâmetro relativamente grande. Qualquer furo mais profundo que dez vezes o diâmetro ($L/D > 10$) deve ser considerado um furo profundo;
- **Trepanação:** processo de furação em que apenas uma parte de material compreendido no volume do furo final e reduzida a cavaco, permanecendo um núcleo maciço.

De acordo com Stemmer (1995), Eberhardt (2009) e Diniz, Marcondes e Coppini (2013) a furação é um processo muito utilizado na indústria manufatureira, visto que a maioria das peças, tem ao menos um furo e somente uma pequena parcela já vem com o furo pronto do processo de obtenção da peça bruta (fundição, forjamento, etc.). A furação é um processo normalmente realizado para permitir a montagem de vários componentes em uma estrutura, por isso qualquer defeito resultante dela pode implicar na rejeição da peça, tendo grande impacto no custo de produção (ABRATE; WALTON, 1992; KALPAKJIAN; SCHMID, 2009; KLOCKE, 2011).

A furação com broca é uma operação de desbaste, havendo necessidade de outra operação para o acabamento como a retificação, o mandrilamento, o alargamento, entre outros. Na furação devem ser observados fatores como diâmetro do furo, profundidade do furo, volume de produção e tolerâncias de forma e de medidas (STEMMER, 1995; EBERHARDT, 2009; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013) apesar da sua importância, o processo de furação foi pouco modernizado até alguns anos atrás em comparação com os processos de torneamento e fresamento, por exemplo, os quais tiveram grande avanço com a introdução de novos materiais para ferramentas (metal duro, cerâmica, CBN e diamante), porém na furação a ferramenta mais usada é ainda a broca helicoidal de aço-rápido.

Segundo Kalpakjian (2006) para a furação de polímeros, são recomendadas brocas M1, M7 e M10 de aço-rápido (AISI / ASTM A600-92a:2004). O autor cita que para a usinagem de polímeros, independentemente do tipo de ferramentas recomendada, devesse utilizar um ângulo

de ponta entre 60° e 90° , ângulo de folga da aresta principal de corte de 7° , ângulo de aresta entre 120° e 135° e ângulo de hélice 29° .

Kalpakjian (2006) ainda cita que, de forma geral, pode-se utilizar velocidades entre 45 e 120 m/min. E ressalta que a medida que a profundidade do furo aumenta, as velocidades de corte e de avanço devem ser reduzidas. E que a escolha das velocidades de corte e de avanço depende do acabamento superficial desejado. No Quadro 3 são apresentados valores de partida para a furação de polímeros.

Quadro 3- Condições de partida para operações de furação de polímeros

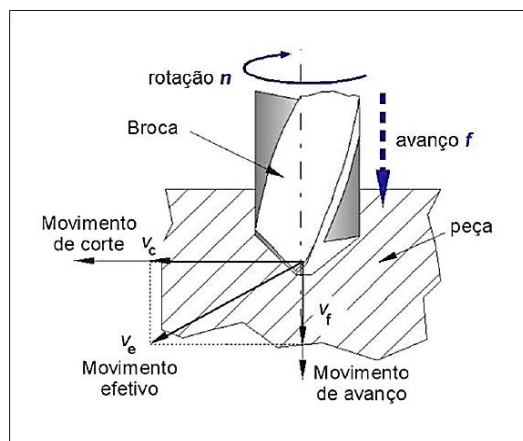
Material	Velocidade de corte (m/min)	Rotações (rpm)		Avanço (mm/r)	
		1,5 mm	12,5 mm	1,5 mm	12,5 mm
Termoplástico	30-60	6.400-12.000	800-1.500	0,025	0,13
Termorrígido	20-60	4.300-12.000	500- 1.500	0,025	0,10

Fonte: Adaptado Kalpakjian (2006)

3.4.3.2.1 Movimento

Os movimentos envolvidos na operação de furação, são movimentos relativos entre a peça e um ou mais arestas de corte da ferramenta. Estes movimentos são referentes à peça considerando-a como parada (STEMMER, 1993, 1995). Segundo Stephenson e Agapiou (2006), Eberhardt (2009) e Klocke (2011) o processo de furação têm-se os seguintes movimentos (Figura 12):

Figura 12- Movimentos na furação com brocas helicoidais



Fonte: Stoeterau (2004)

- **Movimento (principal) de corte:** é o movimento entre a peça e a ferramenta em contato, o qual sem o movimento de avanço origina somente uma única remoção de cavaco durante uma volta;
- **Movimento de avanço:** é definido como sendo o movimento da ferramenta, segundo seu eixo de rotação, no sentido do avanço durante a usinagem. O movimento de avanço é especificado em unidades de comprimento por rotação ou por tempo;
- **Movimento efetivo de corte:** é o movimento resultante dos movimentos de corte e de avanço, realizados no mesmo tempo.

3.4.3.2 Complicações no processo de furação

Segundo Trent e Wright (2000) e Diniz, Marcondes e Coppini (2013) um dos problemas do processo de furação é a saída dos cavacos de dentro do furo pois, se os cavacos não forem formados de maneira que propicie uma fácil retirada, podem provocar o entupimento do furo, aumento do torque (momento de torção) necessário e conseqüentemente a quebra da broca.

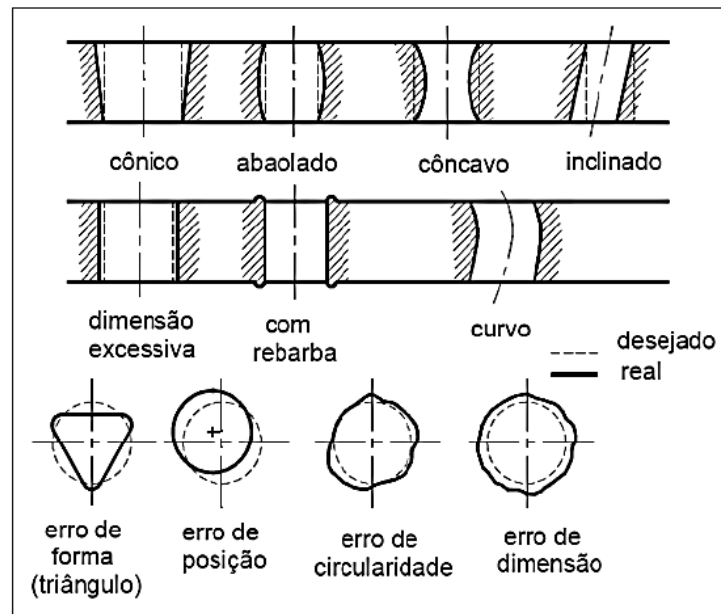
De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013) a quebra de uma broca dentro de um furo é um problema grave, pois além da perda da ferramenta, a sua retirada do interior do furo é uma tarefa cara e demorada que, muitas vezes, ocasiona na rejeição da peça e, considerando que um furo é normalmente um pequeno detalhe de uma peça bem maior, tal rejeição pode representar uma perda substancial.

De acordo com Dallas (1976), Krishnaraj, Zitoune e Davim (2013) e Khashaba (2013) outro problema nesse processo é a qualidade das peças furadas, pois pode ocorrer um erro na geometria desejada dos furos. Analisar o acabamento obtido em processos de furação normalmente é uma tarefa complexa, pois se trata de um processo de desbaste no qual o acabamento é obtido por outro processo.

Todas as operações de acabamento em furos são utilizadas para produzir características exclusivas na peça, visando satisfazer as exigências específicas de tolerâncias. Por exemplo, o alargamento produz uma melhor retilidade, enquanto o torneamento interno (mandrilamento) resulta num melhor paralelismo (DALLAS, 1976; STEPHENSON; AGAPIOU, 2006).

Tem-se na Figura 13 o esquema dos erros de forma (diâmetro não uniforme), de posição (deslocamento do centro do furo), de circularidade (seção circular distorcida), dimensional (diâmetro resultante diferente da broca) e de rebarbação (rebarbas na entrada ou saída do furo).

Figura 13- Erros comuns na geometria do furo.



Fonte: Stoeterau (2004)

3.4.4 Usinabilidade

A usinabilidade é o grau de dificuldade de se usinar um determinado material (SANTOS; SALES, 2007). De um modo geral a usinabilidade pode ser definida como uma grandeza tecnológica, que expressa por meio de valores numéricos comparativos (índice de usinabilidade), um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013) através do estudo da usinabilidade de um material é possível determinar variáveis inerentes ao processo, como vida da ferramenta, acabamento superficial da peça, esforços de corte, produtividade e características do cavaco. A usinabilidade não depende somente das propriedades do material, mas também das condições de usinagem e da ferramenta de corte.

Segundo Jesus (1998)

A usinabilidade tem grande influência na produtividade e nos custos finais de fabricação do produto de uma empresa. Se o índice de usinabilidade é muito baixo, por exemplo, leva a necessidade da utilização de velocidades de corte menores para que não ocorra um desgaste acentuado e prematuro da ferramenta, isto implica em maior tempo de produção e conseqüentemente maior custo. Uma opção seria a utilização de uma ferramenta mais resistente ao desgaste com aumento simultâneo da velocidade de corte. Esta alternativa diminuiria o tempo de produção, mas aumentaria o custo. Restaria saber qual alternativa seria a mais vantajosa e ainda assim o acréscimo no custo final de produção seria evidente. É sabido, que o ideal é que se trabalhe com altas velocidades de corte e que para isso, não seja necessário a utilização de ferramentas especiais e mais caras, somente um material com alto índice de usinabilidade pode oferecer estas condições e é neste sentido que fabricantes de materiais, cientistas e pesquisadores da área de materiais têm se empenhado (Jesus, 1998, p18)

3.4.4.1 Características do cavaco

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013) a formação do cavaco influencia em diversos fatores ligados à usinagem, tais como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado na usinagem o acabamento superficial, etc. Pois estão envolvidos diversos fatores na formação do cavaco, como a qualidade da peça, aspectos econômicos, segurança do operador, dentre outros.

O cavaco formado vai depender de algumas razões inerentes do material, como a sua ductilidade, tenacidade, resistência, composição química, entre outros, bem como das condições de corte empregadas no processo, como a geometria da ferramenta, utilização de fluido de corte, velocidades, ângulos, dentre outros (TRENT; WRIGHT, 2000; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

3.4.4.1.1 Etapas de formação do cavaco

De acordo com Machado et al. (2009), a formação do cavaco ocorre em altíssimas velocidades de deformação seguidas de ruptura do material da peça. Segundo o autor em um estudo mais detalhado pode-se dividir o processo em quatro etapas:

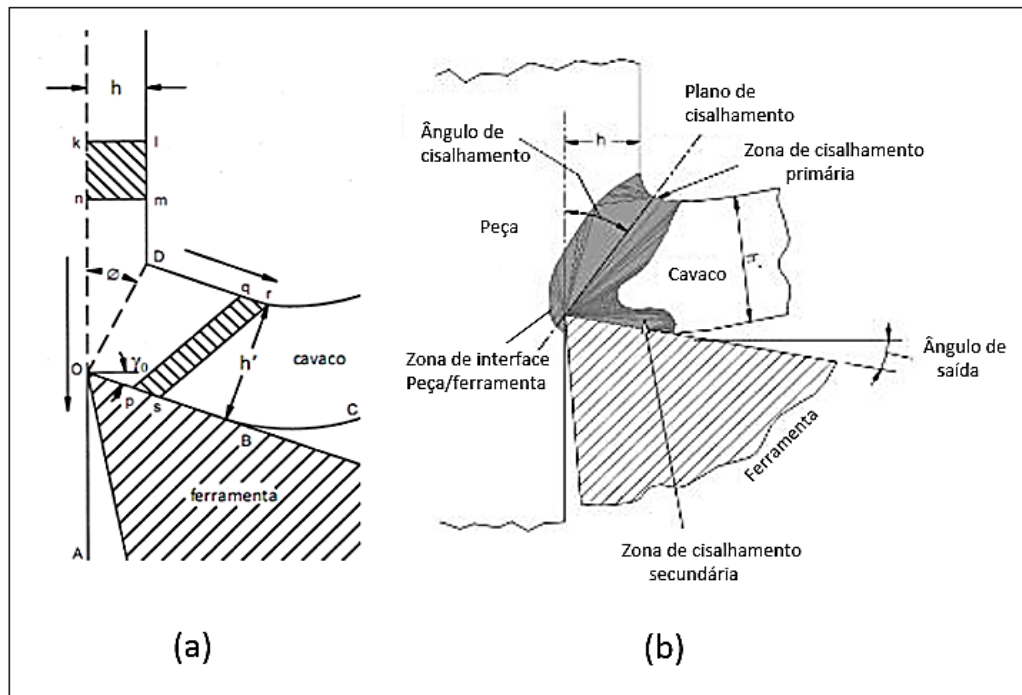
- **Recalque inicial:** devido à a penetração da cunha cortante na peça, uma pequena porção do material é pressionada contra a superfície de saída da ferramenta;
- **Deformação e ruptura:** o material pressionado sofre inicialmente uma deformação elástica e em seguida uma deformação plástica, que aumenta progressivamente até o

estado de tensões provocar a ruptura. Normalmente a ruptura se dá por cisalhamento, porém existe estados de tensão que combinam tensões de compressão, tração e de cisalhamento e leva o material à ruptura, segundo algum critério próprio de sua natureza frágil ou dúctil. Após a ruptura, há a formação de uma trinca que se propaga seguindo também um critério de propagação de trincas próprio de cada material. A formação do cavaco ocorre de forma dinâmica e no plano de cisalhamento;

- **Deslizamento das lamelas:** dependendo da extensão da propagação da trinca, a continuidade da penetração da ferramenta de corte na peça, acarreta no rompimento parcial ou completo do material na região de cisalhamento. As propriedades do material e os parâmetros de usinagem como a velocidade de corte e de avanço, irão determinar quanto o segmento de material rompido permanecerá unido ao cavaco recém-formado, dando origem a cavacos contínuos ou descontínuos, conforme a extensão e a resistência da união entre as lamelas de material rompido;
- **Saída do cavaco:** devido ao movimento entre a ferramenta e a peça, inicia-se o escorregamento do cavaco (porção de material deformado e rompido) sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto este evento ocorre uma nova lamela de material (adjacente à porção anterior) está se formando e passando pelos mesmos processos. Essa nova porção de material também escorregará sobre a superfície de saída da ferramenta, repetindo mais uma vez o fenômeno.

Na Figura 14 é apresentado um diagrama esquemático do processo segundo Tancret et al. (2003).

Figura 14- Formação do cavaco e zonas de cisalhamento



Fonte: Adaptado de (a) Tancret et al. (2003) e (b) Drozda e Wick (1983)

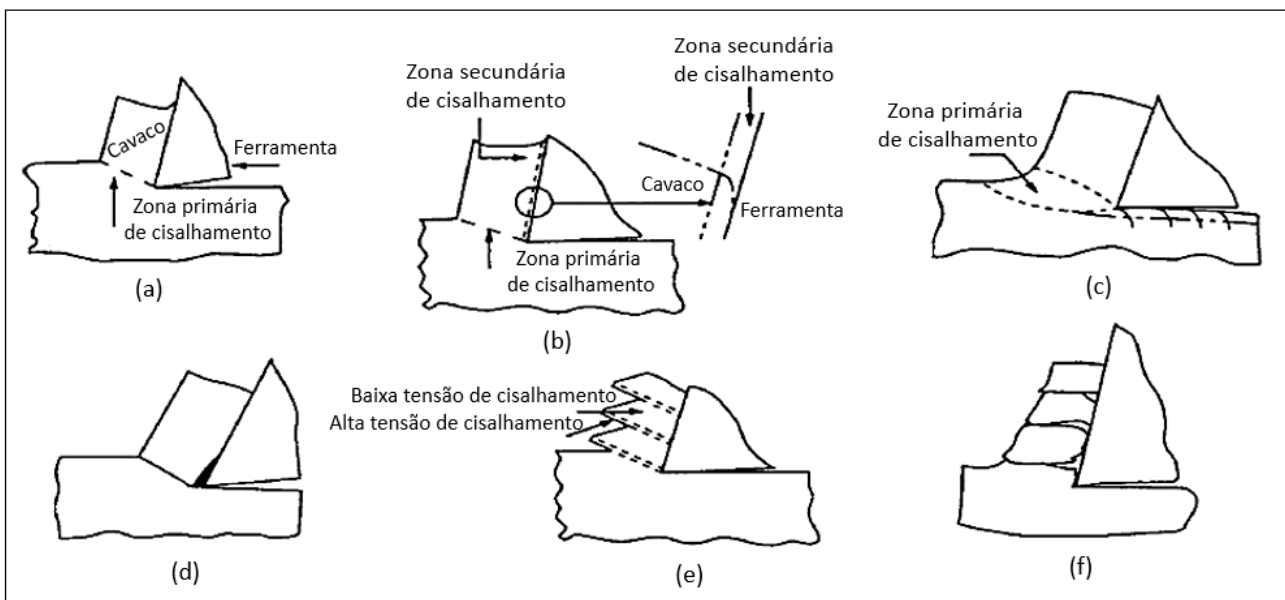
Na Figura 14a pode-se observar a formação de duas novas superfícies, uma nova superfície da peça (OA) e a superfície inferior do cavaco (OB). A energia necessária para formar tais superfícies é pequena quando comparada com a energia necessária para deformar plasticamente o material removido. Entre a peça e o cavaco existem os planos instantâneos de ruptura e de propagação de trincas que definem uma região chamada de zona de cisalhamento primária (Figura 14b). O plano de cisalhamento primário é representado pela linha OD (Figura 14a). O ângulo entre o plano de cisalhamento primário e a direção da velocidade de corte é denominado de ângulo de cisalhamento (ϕ) (TANCRET et al., 2003).

O processo de formação de cavacos pode ser explicado considerando uma porção de volume arbitrária de material. A seção “klmn” representa um volume de material que será forçado contra a superfície de saída da ferramenta (Figura 14a). Inicialmente este volume sofrerá deformação elástica, seguida de deformação plástica e posterior ruptura através da propagação de uma trinca que se estende do ponto O ao ponto D. O cavaco poderá, então, se romper completamente ou parcialmente de acordo com a ductilidade do material da peça. Após esta porção de material passar pela zona de cisalhamento primária, deslizará sobre a superfície de saída da ferramenta como uma componente do cavaco em um novo formato “pqrs” (Figura 14a). Esta região de interface entre o cavaco e a ferramenta é definida como zona de

cisalhamento secundária (Figura 14b), onde o material ainda sofrerá altíssimas deformações plásticas e térmicas. Esta região pode ser identificada de forma simplificada na Figura 14a pelo plano OB. Dependendo da interação da ferramenta com a peça e do material da peça ocorrerá à formação de um cavaco com características próprias (TANCRET et al., 2003).

Na Figura 15 é apresentado um esquema de todo o processo supracitado, segundo Shaw (2005) e Kalpakjian (2006), para cada dos tipos de cavaco.

Figura 15- Tipos básicos de cavacos: (a) cavaco contínuo com zona de corte primária, estreita e retilínea, (b) zona de corte secundária na interface cavaco-ferramenta, (c) cavacos contínuo com grande zona de cisalhamento primário, (d) cavaco contínuo, (e) cavacos segmentado (f) cavacos descontínuo.



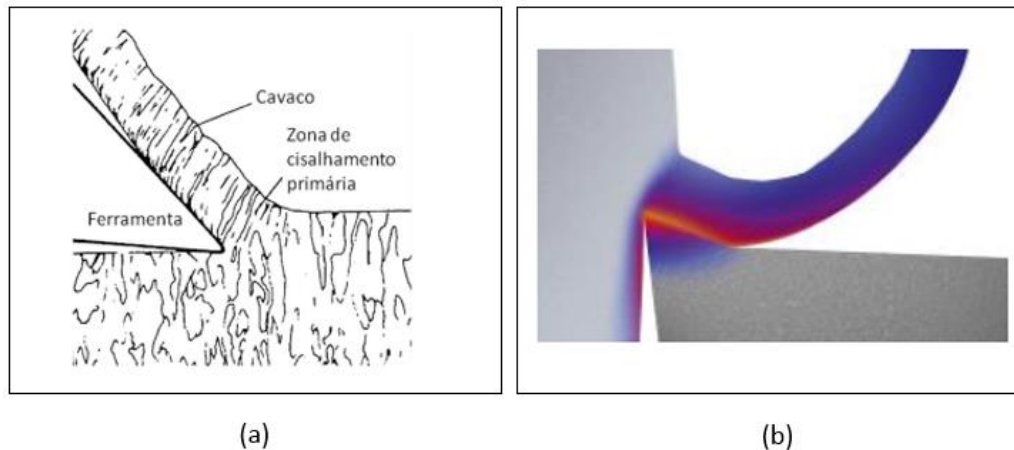
Fonte: Adaptado de Kalpakjian (2006)

3.4.4.1.2 Tipos de cavacos

De acordo com Drozda e Wick (1983), Shaw (2005), Stephenson e Agapiou (2006), Ferraresi (2006), Machado et al. (2009) e Diniz, Marcondes e Coppini (2013), os cavacos podem ser classificados em diferentes tipos e formas, as quais dependem da natureza dúctil ou frágil do material usinado e das condições de usinagem empregadas durante o processo. Morfologicamente os cavacos podem ser classificados como contínuos, parcialmente contínuos, descontínuos e segmentados (SANTOS; SALES, 2007; MACHADO et al., 2009).

Os cavacos contínuos são comuns em materiais dúcteis, como aços de baixa liga, alumínio e cobre. Segundo Machado et al. (2009) na formação de cavacos contínuos, o material inicia uma fratura na zona de cisalhamento primária com grandes deformações e permanece homogêneo, sem fragmentação (Figura 16). De acordo com Kalpakjian e Schmid (2009) os cavacos contínuos propiciam um bom acabamento superficial, forças de corte constante, porém é um tipo de cavaco indesejável, especialmente em máquinas automáticas.

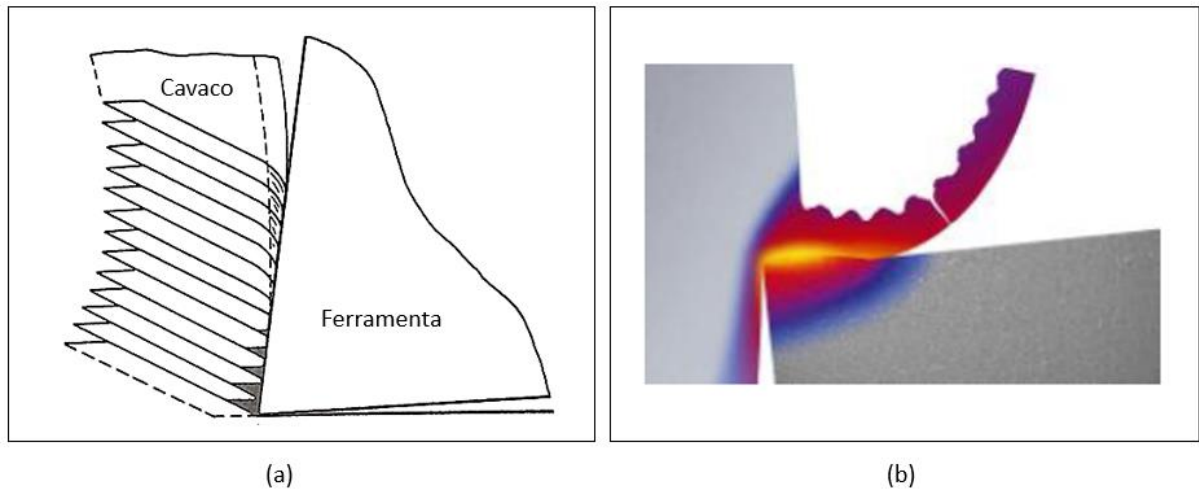
Figura 16- Cavacos contínuos



Fonte: (a) Boothroyd e Knight (1989) e (b) Souza (2016b)

O cavaco parcialmente contínuo ou cavaco de cisalhamento é aquele tipo intermediário entre os cavacos contínuos e descontínuos, onde a trinca se propaga parcialmente pela extensão do plano de cisalhamento (Figura 17). Esse tipo é constituído de lamelas justapostas bem distintas (FERRARESI, 2006). A formação desse tipo de cavaco é descontínua pois, a força de corte cresce progressivamente com a deformação do material até seu encruamento acentuado, rompimento e fragmentação, quando a força cai bruscamente e a aresta cortante reinicia o processo de deformação, repetindo-se o ciclo (SANTOS; SALES, 2007; KALPAKJIAN, SCHMID, 2009). O cavaco parcialmente contínuo apresenta serrilhado nas bordas.

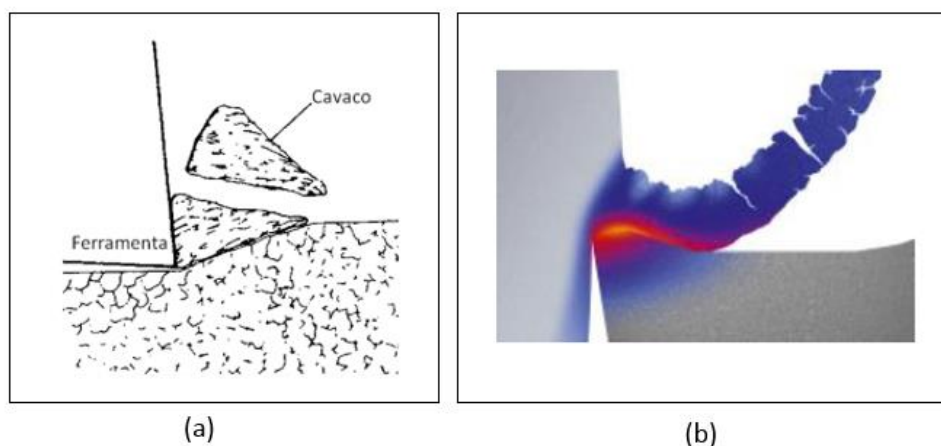
Figura 17- Cavaco de cisalhamento



Fonte: (a) Shaw (2005) e (b) Souza (2016b)

Segundo Boothroyd e Knight (1989) e Machado et al. (2009) o cavaco descontínuo ou de ruptura são aqueles formados na usinagem de materiais frágeis, como bronze e ferros fundidos cinzentos (Figura 18). A fratura completa do cavaco ocorre na zona de cisalhamento primária devido às tensões de tração e de compressão. Este tipo de cavaco constitui-se de fragmentos arrancados (não cisalhado), independentes e distintos, os quais não são capazes de suportar grandes deformações sem se quebrar. Eles possuem formato de lascas e por isso são os mais desejáveis, pois devido ao seu formato são facilmente afastados da área de corte, porém essa modalidade pode afetar o acabamento da superfície e causar vibração e trepidação (TRENT; WRIGHT, 2000; KALPAKJIAN; SCHMID, 2009).

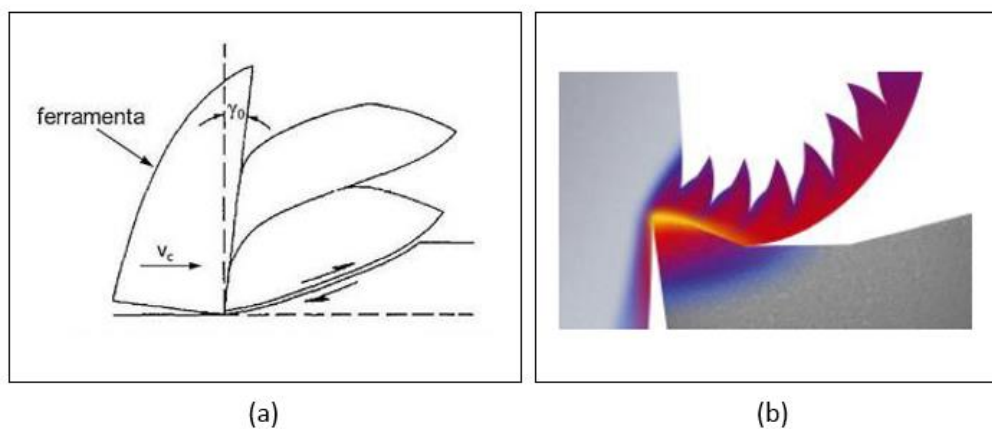
Figura 18- Cavacos de ruptura



Fonte: (a) Boothroyd; Knight (1989) e Souza (2016b)

O cavaco segmentado ou em lamelas (Figura 19), apresentam-se constituídos de segmentos distintos justapostos em uma disposição contínua. São caracterizados por grandes deformações continuadas em estreitas bandas entre segmentos com pouca ou quase nenhuma deformação nos seus interiores. Trata-se de um processo muito diferente do que se verifica na formação do cavaco contínuo. Esse tipo de cavaco geralmente ocorre na usinagem de materiais de baixa condutividade térmica e na presença de cisalhamento catastrófico ou adiabático (SANTOS; SALES, 2007; RECHT, 1964¹³ apud MACHADO et al., 2009).

Figura 19- Cavaco segmentado






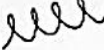


















Fonte: (a) Komanduri e Von Turkovich (1981) e (b) Souza (2016b)

3.4.4.1.3 Formas de cavacos

De acordo com Shaw (2005), Ferraresi (2006), Machado et al. (2009) e Diniz, Marcondes e Coppini (2013) e os cavacos podem ser classificados em quatro diferentes formas: fita, helicoidal, espiral e lascas (pedaços). A norma ISO 3685:1993 classifica detalhadamente a forma dos cavacos (Figura 20).

¹³ RECHT, R. F. Catastrophic thermoplastic shear. *Trans. of ASME. Journal of Applied Mechanics*, junho 1964, p. 189-193 apud MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Editora Blucher, p.371, 2009

Figura 20- Classificação do formato de cavaco segundo norma ISO 3685:1993

1- Cavaco em fita	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco helicoidal tipo arruela	5- Cavaco helicoidal cônico	6- Cavaco em arco	7- Cavaco fragmentado	8- Cavaco tipo agulha
							
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conectado		
							
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
							
1-3- Emaranhado	2-3- Emaranhado		4-3- Emaranhado	5-3- Emaranhado			
							

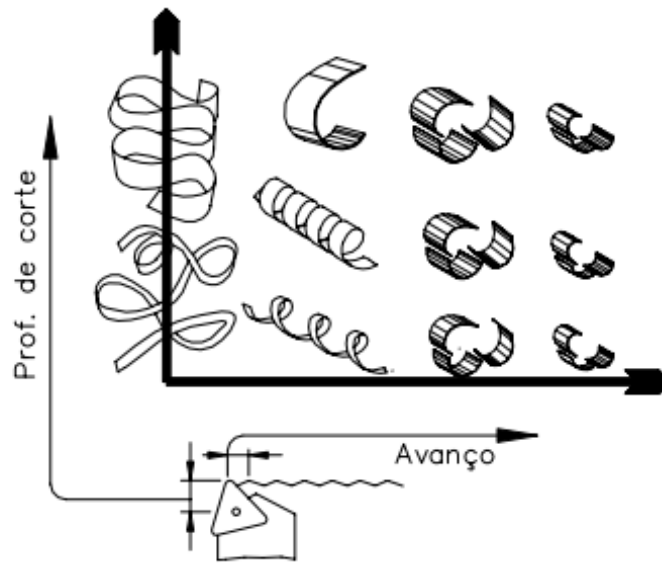
Fonte: Adaptado de ISO 3685 (1993)

O material da peça usinada é o fator de maior influência na forma e no tipo dos cavacos. Os cavacos contínuos, parcialmente contínuos e segmentados podem ser produzidos em qualquer das formas apresentadas na Figura 20, dependendo dos parâmetros de corte e do uso de quebra-cavacos. Já os do tipo descontínuos só podem ser classificados quanto às formas das lascas (MACHADO et al., 2009).

Com relação aos parâmetros de corte, normalmente com o aumento da velocidade de corte, redução na velocidade de avanço ou aumento no ângulo de saída da ferramenta, a tendência é mudar a forma da direita para a esquerda dos cavacos apresentados na Figura 20, ou seja, produzir cavacos em formato de fita (MACHADO et al., 2009).

Segundo Machado et al. (2009) a velocidade de avanço é o parâmetro mais influente na forma do cavaco, seguido da profundidade de corte. De acordo com Batista (2002) o aumento da espessura do cavaco leva a uma deformação demasiada na superfície de cisalhamento, isto é, aparecem cavacos curtos. O autor ainda cita que com o aumento crescente da profundidade de corte devem-se escolher maiores valores de avanços para uma quebra mais favorável do cavaco. Em geral utiliza-se a relação “profundidade x avanço” como critério de formação de cavaco (BATISTA, 2002; SANTOS; SALES, 2007). Observa-se na Figura 21 a relação entre a profundidade de corte e o avanço.

Figura 21- Influência da velocidade avanço e da profundidade de corte na formação do cavaco



Fonte: Machado et al. (2009)

3.4.4.1 Desgaste e avaria das ferramentas de corte

Um dos critérios de maior importância para a caracterização da usinabilidade de um material é a de vida da ferramenta, que pode ser definida como sendo o tempo efetivo de trabalho da ferramenta, até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido de rentabilidade e eficiência (MACHADO et al., 2009; DINIZ et al., 2013; DE VOS; STÅHL, 2014).

O desgaste é um processo gradual, bem como o desgaste da ponta de um lápis normal (KALPAKJIAN e SCHMID, 2009; DAVIM, 2012; DE VOS; STÅHL, 2014). A taxa de desgaste da ferramenta depende dos materiais da ferramenta e da peça, geometria da ferramenta, parâmetros de usinagem, fluidos de corte e das características da máquina-ferramenta (KALPAKJIAN e SCHMID, 2009; DE VOS; STÅHL, 2014). O desgaste das ferramentas irá afetar negativamente na qualidade superficial da peça, bem como nos parâmetros dimensionais e, conseqüentemente, nos custos operacionais (MACHADO *et al.*, 2009; KALPAKJIAN e SCHMID, 2009).

Em função das condições de corte a ferramenta fica sujeita a uma combinação de vários fatores de origem térmica, mecânica, química e abrasiva (elevada pressão de contato entre peça/ferramenta/cavaco). Devido ao fato de nem o material da peça e nem o da ferramenta ser homogêneo, desgastes e avarias de naturezas distintas podem ser observados na ferramenta

durante seu uso. Em decorrência de tais solicitações, a deterioração da mesma torna-se relativamente rápida (KALPAKJIAN e SCHMID, 2009; DE VOS; STÅHL, 2014).

Segundo Davim (2012), Diniz, Marcondes e Coppini (2013) e De Vos; Ståhl (2014) existem diversos tipos de desgaste em ferramentas de usinagem, sendo predominantemente os desgastes de flanco, de cratera e aresta postiça de corte (Figura 22 e 23). De acordo com Stephenson e Agapiou (2006) e De Vos; Ståhl (2014), os desgastes e avarias podem ser definidos como:

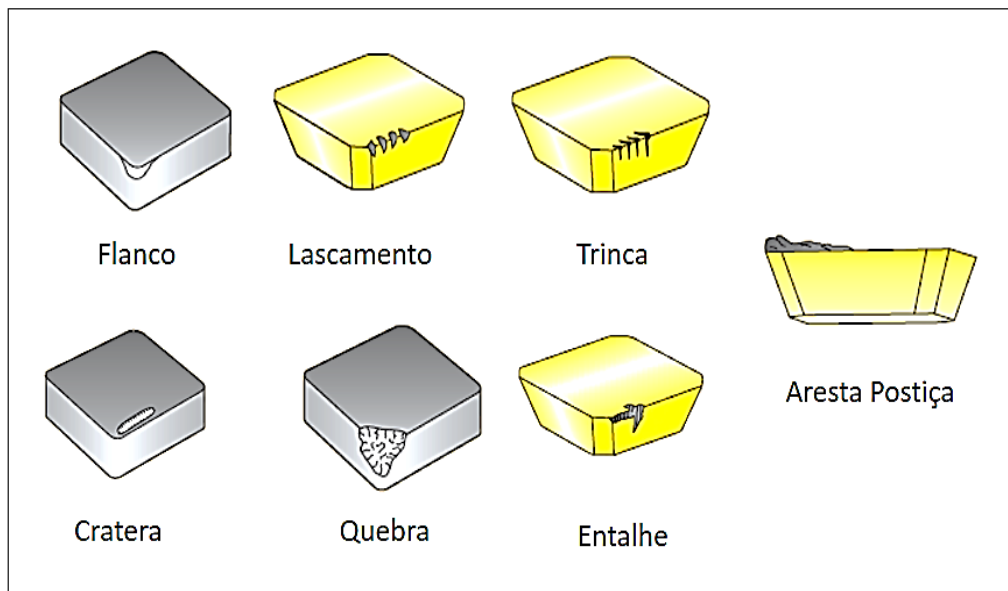
- **Aresta postiça:** ocorre quando o material usinado adere a aresta da ferramenta de corte. Isso ocorre quando há afinidade química entre os materiais (ferramenta e peça usinada), elevada temperatura na zona de corte e alta pressão. Normalmente, ocorre na usinagem de metais macios a baixas velocidades de corte. A formação de aresta postiça pode ser minimizada usando um ângulo de inclinação mais positivo, ferramentas com acabamentos superficiais lisos (< 5 a $10 \mu\text{m}$), fluido de corte com maior lubrificação ou de alta pressão dirigidos na face de inclinação e velocidades de corte mais elevadas;
- **Desgaste de flanco:** ocorre na superfície de folga da ferramenta de corte, devido ao atrito com a peça usinada, ou seja, devido à abrasão e erosão para baixas velocidades. Já em altas velocidades é causado devido à difusão, em virtude do aumento da temperatura. Esse desgaste reduz a precisão dimensional da peça. O desgaste de flanco pode ser minimizado aumentando a resistência à abrasão e a deformação do material da ferramenta, bem como pela adição de recobrimentos a mesma;
- **Desgaste da cratera:** ocorre na superfície de saída da ferramenta de corte, devido à combinação da difusão, decomposição (velocidade de corte alta) e desgaste abrasivo (velocidade de corte baixa). O desgaste de cratera moderado, geralmente, não limita a vida da ferramenta. De fato, a formação de cratera aumenta o ângulo de inclinação efetivo da ferramenta e assim pode reduzir as forças de corte. No entanto, o desgaste excessivo enfraquece a aresta de corte e pode levar a deformação ou fratura da ferramenta. O desgaste da cratera pode ser minimizado aumentando a estabilidade química do material da ferramenta ou diminuindo a solubilidade química da ferramenta no material da usinado, sendo que isso pode ser realizado com adição de recobrimento na ferramenta de corte. Reduzir a velocidade de corte também é eficaz no controle do desgaste de cratera;

- **Lascamento:** é resultante da quebra de pequenos fragmentos da aresta de corte durante a usinagem. Ocorre quando são utilizados materiais frágeis para as ferramentas de corte, especialmente compósitos cerâmicos e policristalinos, bem como quando se usam materiais que possuem partículas duras ou abrasivas. Vibração devido às forças de corte excessivas ou baixa rigidez do sistema também podem causar lascamentos o qual acarreta em um acabamento superficial pobre e o aumento do desgaste de flanco, podendo levar a quebra da ferramenta. O lascamento muitas vezes pode ser controlado mudando a preparação da borda da ferramenta ou aumentando a resistência à fratura do material da ferramenta;
- **Deformação plástica:** ocorre na aresta de corte quando a ferramenta é incapaz de suportar a pressão de corte sobre a área de contato entre a ferramenta e o cavaco. A deformação da aresta de corte geralmente ocorre com altas taxas de avanço, as quais produzem elevadas cargas na aresta ou a velocidades de corte mais altas, uma vez que a dureza da ferramenta diminui com o aumento da velocidade de corte e da temperatura. Uma deformação excessiva da aresta de corte resulta em perda de precisão dimensional, má qualidade do acabamento superficial e desgaste severo do flanco ou fratura da ferramenta;
- **Desgaste de entalhe:** ocorre na região de interface entre o contato peça/ferramenta/cavaco, no lado exposto da superfície de corte. A formação do entalhe é resultado da ação das rebarbas produzidas nas bordas do cavaco, as quais apresentam uma taxa de encruamento maior que na parte central do cavaco, tornando-se uma região com dureza mais elevada, envolvendo um mecanismo de aderência e arrancamento. O aumento progressivo do entalhe pode levar à quebra da ferramenta de corte bem, como a um pior acabamento superficial. O desgaste do entalhe pode ser reduzido aumentando o ângulo de entrada, o que aumenta a área de contato entre a ferramenta e a superfície da peça, variando a profundidade de corte em operações de múltiplos passes e aumentando a dureza a quente e a resistência à deformação do material da ferramenta.
- **Quebra:** a quebra resulta na perda catastrófica da aresta de corte e de uma porção substancial da ferramenta. Em geral as estratégias para eliminar a quebra da ferramenta

incluem a redução das forças de corte, a utilização de ferramentas mais resistente ou mais rígidas;

- **Trincas:** as trincas podem ser de origem mecânica (resultante do carregamento cíclico da ferramenta, em corte interrompido) ou térmica (usinagem de materiais que geram altas temperaturas de ferramenta). Podem ocorrer dois tipos de fissuras: fissuras perpendiculares à aresta de corte, que normalmente resultam de cargas térmicas cíclicas, especialmente quando se utiliza um fluido de corte e, rachaduras paralelas à aresta de corte, que normalmente resultam de cargas mecânicas cíclicas. A formação de fissuras leva a fratura rápida da ferramenta ou lascamento.

Figura 22- Tipos de desgaste e avarias em ferramentas de corte no fresamento

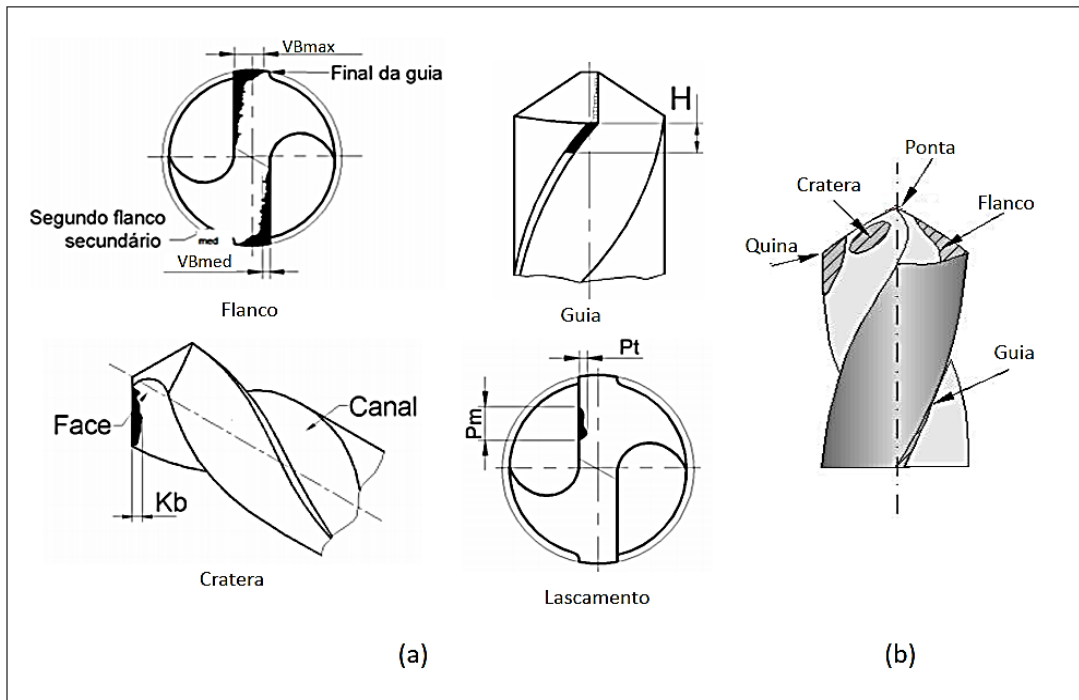


Fonte: Adaptado de Seco Tools (2016)

De acordo com Bork (1995) e Stephenson e Agapiou (2006), os desgastes e avarias que ocorrem nas brocas podem ser os mesmos ocorridos em fresas ou pastilhas, como o desgaste de cratera, de flanco e lascamento além dos característicos dessa ferramenta como desgaste de ponta, de quina e de guia (Figura 23). De acordo com Stephenson e Agapiou (2006), os principais desgastes e avarias ocorridos em brocas podem ser definidos como:

- **Desgaste de ponta:** ocorre na aresta transversal da broca e resulta da abrasão ou da deformação plástica. Esta forma de desgaste pode dobrar ou triplicar a força de avanço na broca e afeta a precisão de centralização da broca;
- **Aresta postiça:** ocorre quando o material usinado adere a aresta da ferramenta de corte construindo-se e projetando-se para a frente a partir dela. Pode ocorrer em diversas operações, porém é um grande problema na furação. A aresta postiça é indesejável porque altera a profundidade de corte efetiva (ou diâmetro do furo) e muitas vezes é instável, levando a um acabamento superficial pobre e o lascamento da ferramenta. A formação de aresta postiça pode ser minimizada usando um ângulo de inclinação mais positivo, ferramentas com acabamentos superficiais lisos (< 5 a $10 \mu\text{m}$), fluido de corte com maior lubrificação ou de alta pressão dirigidos na face de inclinação e velocidades de corte mais elevadas;
- **Desgaste de flanco:** ocorre ao longo da superfície de folga da broca. É resultante da abrasão, deformação plástica, entre outros. Esta forma de desgaste aumenta a força de avanço na broca, o consumo de potência e a temperatura na aresta de corte. O desgaste de flanco aumenta a dimensão das rebarbas geradas pela furação. Quando esse desgaste se torna excessivo a broca para de cortar e falha por vibração ou quebra;
- **Desgaste de quina (margem):** ocorre no canto exterior da aresta de corte ou na região de contato com a superfície perfurada. É resultante da abrasão, deformação térmica ou difusão. O desgaste excessivo de margem resulta em um controle dimensional do furo pobre e na má qualidade da superfície de acabamento. Geralmente, o desgaste da margem produz um furo subdimensionado a menos que seja acompanhado por formação de aresta postiça ou erros de centralização, caso em que produz um furo superdimensionado;
- **Desgaste da cratera:** ocorre na superfície do canal. É resultante do desgaste térmico ou da difusão. O desgaste de cratera moderado, geralmente não é preocupante, mas o desgaste excessivo enfraquece a aresta de corte da broca e pode conduzir à deformação da aresta, lascamento ou quebra.

Figura 23- Principais tipos de desgaste e avarias para processos de furacão



Fonte: Adaptado de (a) Bork (1995) e (b) Stoeterau (2004)

Os desgastes acontecem por diversos mecanismos básicos na usinagem, dentre eles pode-se citar: abrasão, difusão, oxidação e adesão.

- **Abrasão:** é um dos principais causadores de desgaste de ferramentas. Esse mecanismo pode causar lascamento, entalhe, desgastes de flanco e de ponta (broca), sendo o mecanismo predominante no desgaste frontal, onde a superfície da ferramenta atrita com a peça, enquanto que a superfície de saída atrita com elemento mais flexível que é o cavaco. Esse desgaste é influenciado por partículas duras contidas no material da peça e pela temperatura de corte, que reduz a dureza da ferramenta (SHAW, 2005; STEPHENSON; AGAPIOU, 2006; SANTOS; SALES, 2007; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; DE VOS; STÅHL, 2014);
- **Erosão:** o desgaste erosivo é devido ao impacto de pequenas partículas em uma superfície. Há diversos tipos de desgaste erosivo, como a erosão causada pelo impacto de partículas sólidas ou de gotas e por cavitação. Normalmente, o desgaste erosivo não ocorre ou ocorre em menor grau, nas ferramentas de corte. Uma das causas é devida as inclusões microscópicas duras de carbonetos ou partículas do material usinado, endurecido por deformação, que danificam a ferramenta de corte. Há também

pequenos pedaços de revestimento que quebram e danificam a face da ferramenta (DE VOS; STÅHL, 2014);

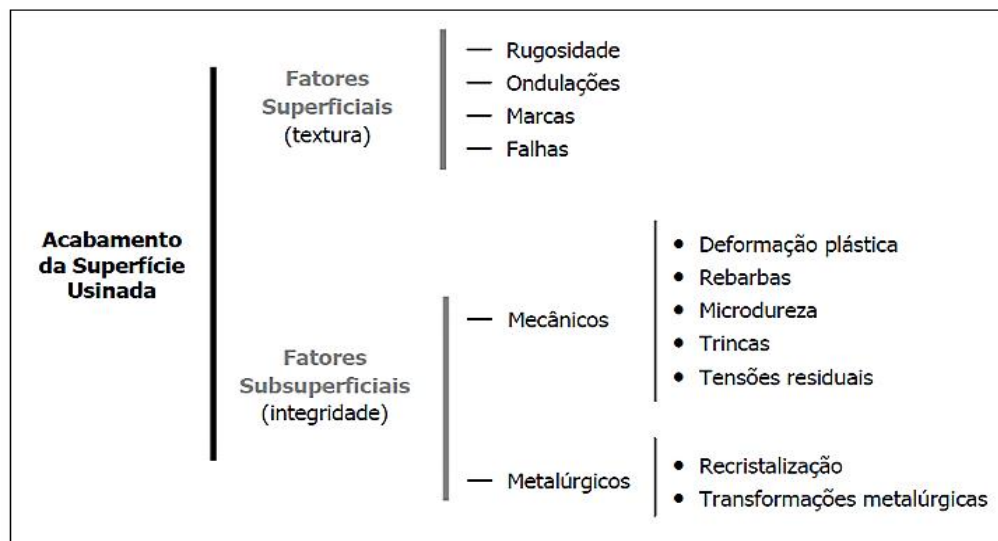
- **Difusão:** O mecanismo de difusão ocorre entre a ferramenta e o cavaco e é um mecanismo microscópico ativado pela temperatura na região de corte, devido à elevadas velocidades de corte. Esse fenômeno é o principal responsável pelo desgaste de cratera. É na superfície de saída da ferramenta que se tem as condições apropriadas, tais como: alta temperatura (causada pelas velocidades e zona de aderência) e tempo de contato cavaco-ferramenta na zona de aderência, onde a velocidade de saída do cavaco é zero (SHAW, 2005; STEPHENSON; AGAPIOU, 2006; SANTOS; SALES, 2007; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013);
- **Oxidação:** o mecanismo de oxidação é decorrente da elevada temperatura e da presença de ar ou fluidos de corte. Esse mecanismo pode causar o desgaste de entalhe. Alguns materiais de ferramentas se desgastam com maior facilidade devido à oxidação, pois não contém materiais com dureza e resistência superiores que os óxidos formados. Esse mecanismo de desgaste ocorre principalmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido à sua exposição ao ar nessa região (STEPHENSON; AGAPIOU, 2006; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013);
- **Adesão:** Ocorre quando superfícies estão em contato, sob cargas moderadas, baixas temperaturas e baixas velocidades de corte, acarretando na adesão de partículas da superfície da peça usinada e na superfície da ferramenta, originando assim, o desgaste chamado de aresta postiça de corte (STEPHENSON; AGAPIOU, 2006; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; DE VOS; STÅHL, 2014).

Existem diversas formas de identificar o “fim-de-vida” de uma ferramenta, entre elas a qualidade da superfície da peça usinada, o aumento da força de corte, da potência consumida, do torque, da força de avanço, ruídos considerados anormais, vibrações excessivas, superaquecimento da aresta corte, entre outros (MOCELLIN, 2002).

3.4.4.2 Acabamento superficial da peça

De acordo com Machado et al. (2009), a qualidade das superfícies obtidas na usinagem é resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e, às vezes, reações químicas. Todos esses processos estão envolvidos na formação de uma nova superfície, ou seja, determinam a integridade superficial da peça. De acordo com o autor, devido à a todos esses fatores não se pode definir a integridade superficial como apenas a textura da superfície ou a forma geométrica, pois esse termo engloba também outras características da superfície em serviço e de camadas abaixo desta. Na Figura 24 pode-se observar as alterações que podem ocorrer em superfícies usinadas, podendo essa ser classificada em alterações na superfície (acabamento) e alterações em camadas internas da peça (alterações subsuperficiais).

Figura 24- Classificação de acabamento



Fonte: Machado et al. (2009)

Obter uma superfície técnica que apresente fatores superficiais e subsuperficiais apropriados, a fim de garantir segurança, confiabilidade e longa vida ao componente fabricado é o objetivo da usinagem. Como exemplo tem-se as superfícies dos componentes deslizantes, como os eixos de um mancal, as quais devem ser lisas para que o atrito seja o menor possível. Já as exigências de acabamento das superfícies externas da tampa e da base do mancal são menores, visto que a produção de superfícies lisas exige, em geral, custo de fabricação mais elevado.

De acordo com Alves et al. (2010) um parâmetro importante para avaliar a qualidade superficial das peças usinadas é a rugosidade, a qual é caracterizada pelas irregularidades existentes em uma superfície usinada. Essas irregularidades podem ser determinadas através das dimensões dos picos e vales, produzidos durante as operações de usinagem, oriundas do perfil da ferramenta ou por propriedades estruturais na superfície do material (MAGOSS, 2008).

Esta qualidade é influenciada por diversos fatores como a velocidade de corte, velocidade de avanço, ângulo de inclinação da ferramenta, geometria da quina da ferramenta, dentre outros (FUSSE et al., 2004). Em seus estudos Rossi, Kanenobu e Batalha (2004) perceberam que o parâmetro que mais influencia na rugosidade é o avanço, seguido pela rotação do fuso (rotação da fresa) e pela profundidade de corte, nesta ordem.

A rugosidade irá aumentar com o aumento do avanço, o qual influencia na altura dos picos e na profundidade dos vales das marcas de avanço (MACHADO et al. 2009). Além disso, o avanço está ligado a quantidade de material removido, assim como a profundidade de corte, e quanto maior o volume de material a ser retirado pior será a rugosidade. Um corte muito pesado determina mau acabamento. Para controlar a quantidade de cavaco a ser removida deve-se alterar avanço e profundidade de corte, sendo o avanço o mais significativo (STEMMER, 1993).

A profundidade de corte é um dos parâmetros de usinagem que influencia no comprimento de corte e também na vibração, pois uma maior profundidade de usinagem acarreta no aumento das forças e, portanto, as possibilidades de deflexões. As alturas das ondulações também são aumentadas com a profundidade de corte (MACHADO et al. 2009).

Com relação à velocidade de corte, a rugosidade inicialmente tende a aumentar com o aumento da velocidade de corte, diminuindo após uma certa velocidade. Quando a velocidade de avanço é mantida constante, percebe-se que a rugosidade diminuiu com o aumento da velocidade de corte, pois o aumento da rotação da fresa resulta em um avanço por dente menor, ou seja, diminui a espessura do cavaco, acarretando em uma menor rugosidade (PÓVOA, 2009).

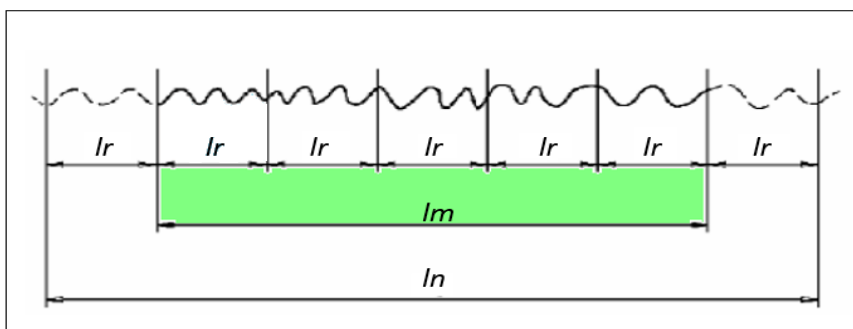
De forma geral, Weingaertner e Schroeter¹⁴ (1991) apud Batista (2002) citam que:

A rugosidade aumenta com o aumento do avanço e diminui com o aumento do raio de ponta. Com relação à velocidade de corte, a rugosidade inicialmente tende a aumentar com o aumento da velocidade de corte, diminuindo após uma certa velocidade. Já a profundidade de corte praticamente não tem influência sobre a qualidade superficial, quando a profundidade for superior a um valor mínimo. Dos ângulos da ferramenta, o ângulo de saída e o ângulo de posição têm a maior influência sobre a qualidade superficial. Com o aumento positivo do ângulo de saída a rugosidade diminui. A diminuição do ângulo de posição leva a um aumento da força passiva e, em decorrência, aumenta a possibilidade de vibrações regenerativas, que levam a uma piora da qualidade superficial. Também o desgaste da ferramenta tem influência sobre a qualidade superficial da peça (WEINGAERTNER; SCHROETER, 1991 apud BATISTA, 2002, p105)

Para se avaliar a qualidade superficial de um objeto a norma ABNT NBR4287: 2002 apresenta critérios sobre o comprimento da amostragem (Figura 25) como:

- l_r : comprimento de amostragem *cut-off*;
- l_n : comprimento de avaliação.

Figura 25- Comprimento para a avaliação de rugosidade



Fonte: Adaptado de ABNT NBR4287: 2002

Para o cálculo da rugosidade é desconsiderado o l_r inicial e o final devido à aceleração e frenagem do apalpador do rugosímetro, portanto l_m é o percurso de medição. A escolha do *cut-off* deve estar de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4288:2008. Nos Quadros 4 e 5 pode-se observar os valores limites de *cut-off* padronizados, para perfis periódicos e não periódicos.

¹⁴ WEINGAERTNER, W. L., SCHROETER, R. B. *Tecnologia de usinagem do alumínio e suas ligas*. Alcan Alumínio do Brasil S.A., 1991 apud BAPTISTA, A. L. B. Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 55, n. 2, p. 103-109, 2002.

Quadro 4 - Comprimento de amostragem de rugosidade para medições de R- parâmetro de perfil periódico e RSm para perfis periódicos e não periódicos

RSm (mm)	Comprimento de amostragem de rugosidade (<i>lr</i>) (mm) <i>cut-off</i>	Comprimento de avaliação da rugosidade (<i>ln</i>) (mm)
0,013 < RSm ≤ 0,04	0,08	0,4
0,04 < RSm ≤ 0,13	0,25	1,25
0,13 < RSm ≤ 0,4	0,8	4
0,4 < RSm ≤ 1,3	2,5	12,5
1,3 < RSm ≤ 4	8	40

Fonte: Adaptado da ABNT NBR ISO 4288 (2008)

Quadro 5- Comprimento de amostragem de rugosidade para medições de Ra, Rq, Rsk, Rku, RΔq e curvas e parametros relacionados para perfis não periódicos

Ra (μm)	Comprimento de amostragem de rugosidade (<i>lr</i>) (mm) <i>cut-off</i>	Comprimento de avaliação da rugosidade (<i>ln</i>) (mm)
0,006 < Ra ≤ 0,002	0,08	0,4
0,02 < Ra ≤ 0,1	0,25	1,25
0,1 < Ra ≤ 2	0,8	4
2 < Ra ≤ 10	2,5	12,5
10 < Ra ≤ 80	8	40

Fonte: Adaptado da ABNT NBR ISO 4288 (2008)

Para se determinar a rugosidade de um objeto existem alguns parâmetros de medição como a rugosidade média, total, máxima, entre outras, sendo a média o parâmetro mais usual para definir a qualidade superficial.

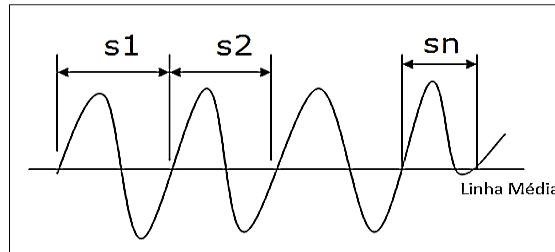
3.4.4.2.1 Largura média dos elementos do perfil de rugosidade

Segundo a ABNT NBR 4287 (2002), ABNT NBR 4288 (2008) e Davim (2010), a largura média dos elementos do perfil de rugosidade (RSm) é um parâmetro de espaçamento, utilizado para se determinar a rugosidade de perfis periódicos (como exemplo, a furação) e de perfis não periódicos (como exemplo, fresamento e torneamento).

O RSm expressa a média da largura dos elementos da curva de perfil, num comprimento de amostragem, ou seja, o valor médio de espaçamento entre os picos do perfil e a linha média, medido dentro do comprimento de amostragem (Figura 26), o qual é dado pela Equação 1.

$$RSm = \frac{s1+s2+\dots+sn}{n} \quad (1)$$

Figura 26- Largura dos elementos do perfil



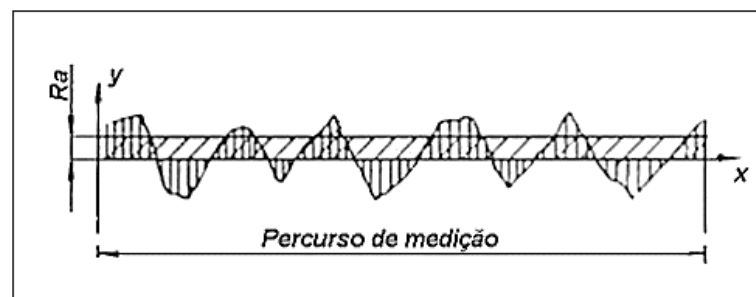
Fonte: Adaptado de ABNT NBR 4287 (2002)

De acordo com Olympus Corporation (2016) o RSm é utilizado frequentemente para a avaliação do brilho e de polimento, textura, desempenho de adesão e tratamento de superfície.

3.4.4.2 Rugosidade Média

A rugosidade média (Ra - *Roughness Average*) é um parâmetro de amplitude largamente empregado como parâmetro de controle de processo, uma vez que alterações no seu valor representam alterações no processo, em especial no desgaste da ferramenta (MUMMERY¹⁵, 1992 *apud* MACHADO et al., 2009). A Ra consiste na média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento em relação a linha média, de perfis não periódicos (Figura 27).

Figura 27- Rugosidade média-Ra

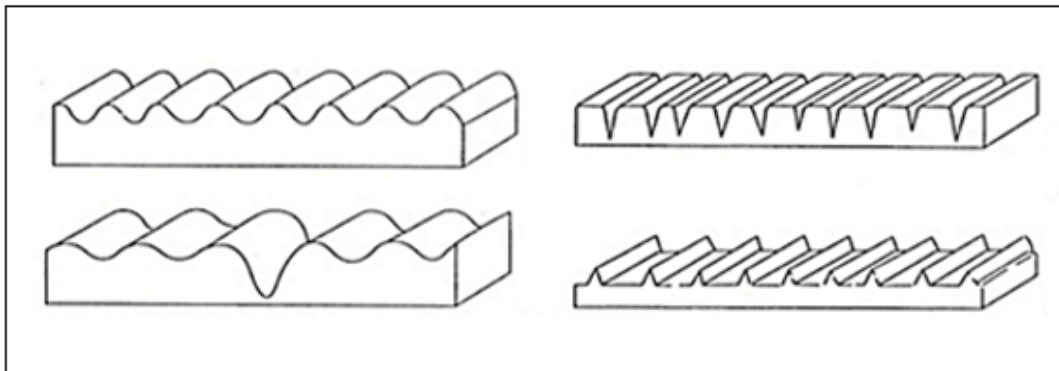


Fonte: Adaptado de Camargo (2002)

¹⁵ MUMMERY, L. "Surface texture analysis - **The handbook**". Hommelwerke GmbH, 1992 *apud* MACHADO, A. R; ABRÃO, A. M; COELHO, R. T; DA SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Editora Blucher, p.371, 2009

Apesar de ser um parâmetro estável, ou seja, não recebe influência de efeitos ocasionais, isoladamente não é suficiente para identificar algumas características importantes da superfície, pois superfícies geometricamente diferentes podem apresentar uma rugosidade média muito próxima, mas desempenhos em serviço bastante diversos (MACHADO et al., 2009). A Figura 28 ilustra perfis de superfícies diferentes que apresentam o mesmo valor de Ra.

Figura 28- Diferentes perfis superficiais com rugosidade média igual a dois ($R_a=2$)



Fonte: Adaptado de Camargo (2002)

3.4.5 Parâmetros do processo de usinagem

3.4.5.1 Potência de usinagem

A potência de usinagem pode ser definida como o esforço que uma máquina-ferramenta realiza ao girar o seu eixo-árvore para executar os movimentos de corte e de avanço (MACHADO et al., 2009; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Segundo a ABNT NBR 12545: 1991 a potência de usinagem é a resultante da combinação das componentes da velocidade e da força de usinagem atuantes na direção da velocidade correspondente. A norma brasileira divide a potência de usinagem em:

- **Potência Efetiva:** produto da velocidade efetiva com a força efetiva, que também pode ser determinada como a soma das potências de corte e de avanço;
- **Potência de corte:** produto da velocidade de corte com a força de corte;
- **Potência de avanço:** produto da velocidade de avanço com a força de avanço.

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013) a potência de corte, em uma situação extrema, é 140 vezes maior do que a potência de avanço. Portanto para o cálculo do

dimensionamento do motor da máquina-ferramenta é possível desprezar a potência de avanço. Sendo assim, a potência de usinagem será a mesma que a potência de corte.

Segundo Machado et al. (2009) uma das formas de se determinar a potência necessária para o corte do material, é através do estudo das forças de usinagem (força ativa, força de corte, força de avanço e força de apoio) que agem sobre a cunha cortante e de seus componentes. Segundo o autor o consumo de potência irá variar de acordo com o material usinado, as condições de corte empregadas, a geometria e o desgaste da ferramenta de corte, entre outros. De acordo com Kollmann e Cotê Jr¹⁶ (1984 apud Souza, 2009), em geral, velocidades de corte mais elevadas estão associadas com utilização menos eficientes de energia de corte, ou seja, maiores potências.

3.4.5.1.1 Cálculo da potência de corte

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), a potência de corte é a relação entre a força de corte e a velocidade de corte (Equação 2).

$$P = \frac{Fc \times Vc}{60 \times 75} \quad (2)$$

P = potência de corte, (CV);

Fc = força de corte, (kgf);

Vc = velocidade de corte, (m/min).

Sendo a força de corte expressa pela relação apresentada na Equação 3.

$$Fc = Ks \times A \quad (3)$$

Fc = força de corte, (kgf);

Ks = pressão específica de corte;

A = área da seção transversal de corte.

De acordo com Machado et al. (2009) e Diniz, Marcondes e Coppini (2013), a pressão específica de corte (k_s) é a força necessária para a remoção de uma área de corte equivalente a

¹⁶ KOLLMANN, F.F.P; CÔTE JÚNIOR, W. A. **Principles of wood science and technology**. New York: Springer-Verlag, v.1. 1984 apud SOUZA, E. M. **Influência dos parâmetros de usinagem da madeira de *Eucalyptus* sp. no consumo de energia específica de corte em serra circular**. 2014. 63f. Dissertação (Mestrado)- Ciência e Tecnologia da Madeira: Processamento e Utilização da Madeira, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

l mm². Inicialmente, imaginava-se como sendo uma característica somente do material, similar à tensão de ruptura, porém ensaios mostraram que a pressão específica irá variar segundo o material da peça; o material, a geometria e o desgaste da ferramenta de corte; a área da seção de corte; a velocidade de corte; as condições de lubrificação e refrigeração.

Vários autores e instituições já propuseram formulas para o cálculo do k_s , dentre eles, Kienzle propôs um formula suficientemente precisa, na qual k_s varia em função da espessura de corte, ou seja, a diminuição da espessura de corte acarretará no o aumento de k_s , sendo esta uma propriedade que é válida para todas operações de usinagem (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Entretanto, a potência de usinagem pode ser mensurada experimentalmente durante um processo, através da tensão e da corrente elétrica consumida. A tensão pode ser obtida através do uso de voltímetros e para a corrente pode-se utilizar amperímetros em série (MACHADO et al., 2009). Outro equipamento que se pode utilizar para a captação da potência consumida ou a variação da frequência do motor é o sensor de tipo Hall, que irá mensurar a corrente e a tensão gerada (SANTOS; SALES, 2007). Por sua fácil trabalhabilidade, os sensores são usados em grande escala para o monitoramento de equipamentos de usinagem (JEMIELNIAK, 1999).

3.4.5.2 Vibração

O processo de usinagem dos materiais muitas vezes é considerado como um processo estável, devido ao fato de possuir algumas variáveis fixas, como velocidade de avanço, velocidade de corte, ângulos de corte, entre outros (SANTOS, 2011). Porém os processos de usinagem são influenciados tanto pela operação de corte como pelo sistema dinâmico máquina/ferramenta/ peça, nos quais ocorrem o fenômeno vibratório, desencadeando a variação nas forças produzidas durante a usinagem (TOBIAS¹⁷, 1961 apud SANTOS, 2011). Esse sistema apresenta características de rigidez e de amortecimento de vibrações, as quais são essenciais para a qualidade das operações. Um dos fenômenos mais importantes é a vibração entre a ferramenta e a peça usinada, pois acaba influenciando na qualidade do processo (TRENT; WRIGHT, 2000).

¹⁷ TOBIAS, S.A. Machine Tool Vibration Research. *International Journal of Machine Tool Desing and Research*, v. 1, p.1-14, 1961 apud SANTOS, R. G. **Desenvolvimento de um método para comparar os limites de estabilidade dinâmica em máquinas-ferramentas utilizando o diagrama de lóbulos**.2011. 137f. Dissertação (Mestrado). USP, São Carlos, 2011.

Quando há o excesso de vibrações no sistema pode ocorrer o desgaste prematuro e avarias da ferramenta de corte que se ocorrerem de forma persistente por longos períodos, podem danificar a integridade e reduzir a vida útil dos rolamentos do eixo-arvore da máquina-ferramenta (TRENT; WRIGHT, 2000; KING¹⁸, 1985 apud SANTOS, 2011). Além disso, altas vibrações causam baixa qualidade superficial e perda dimensional da peça usinada, ruídos indesejáveis e desagradáveis e aumento do consumo de energia elétrica (TRENT; WRIGHT, 2000; SIDDHPURA; PAUROBALLY, 2012).

Em usinagem, as vibrações podem ser causadas por uma fonte externa, pela própria máquina ou devido à ação de forças geradas durante o corte do material (ALTINTAS; WECK, 2004; STEPHENSON; AGAPIOU, 2006; QUINTANA; CIURANA, 2011; SIDDHPURA; PAUROBALLY, 2012). Segundo Altintas e Weck (2004), Stephenson e Agapiou (2006) e Siddhpura e Paurobally (2012) a vibração é um fenômeno complexo, estudado a mais de cem anos, que pode ser dividido em três formas básicas:

- **Vibração livre:** é causada por choque e possui um comportamento aleatório, dependendo das condições de corte, das propriedades do material e até de distúrbios ambientais;

Vibração forçada: geralmente causada por forças periódicas presentes na máquina, como forças provenientes de engrenagens ou da instabilidade de componentes da máquina além de desalinhamentos de motores ou de bombas. Ademais, as vibrações forçadas podem ser causadas pelo contato periódico da ferramenta de corte com a superfície da peça. Em geral, a vibração forçada é facilmente detectada durante a fase de desenvolvimento ou inspeção final de uma máquina-ferramenta, e assim, pode ser reduzida ou eliminada.

- **Vibração autoexcitada:** também conhecida por *chatter* (trepidação), é causada pelas interações do processo de remoção de cavaco com a estrutura da máquina. Sabe-se que o *chatter* ocorre quando o deslocamento relativo da ferramenta-peça é repentinamente interrompido.

¹⁸ KING, R. I. **Handbook of high Speed Machining Technology**. Chaman and Hall, 1985 apud SANTOS, R. G. **Desenvolvimento de um método para comparar os limites de estabilidade dinâmica em máquinas-ferramentas utilizando o diagrama de lóbulos**. 2011. 137f. Dissertação (Mestrado). USP, São Carlos, 2011.

Dentre os três tipos de vibração, uma das mais estudadas é a vibração por trepidação, a qual é um fenômeno complexo que depende da concepção e configuração da estrutura da máquina e da ferramenta, dos materiais da peça de trabalho e da ferramenta de corte e dos parâmetros de corte, por isso, a rigidez da máquina, da ferramenta e da fixação da peça de trabalho são fatores importantes. A profundidade, largura e velocidade de corte, são os parâmetros de usinagem que mais influenciam na vibração autoexcitada. Por ser um fenômeno complexo e tipicamente não-linear, a vibração pode ocorrer apenas sob certas condições aparentemente aleatórias, podendo ir e vir esporadicamente (STEPHENSON; AGAPIOU, 2006).

A vibração ocorre porque o amortecimento do sistema da máquina-ferramenta não é suficiente para absorver parte da energia de corte transmitida ao sistema. A relevância da presença de vibração no sistema irá depender do tipo de operação realizada (acabamento ou desbaste), dos requisitos de acabamento superficial, das características de desgaste da ferramenta, do ruído acústico admissível e da sua propagação ao equipamento circundante. A eliminação da vibração, de um processo de usinagem, é uma tarefa difícil (STEPHENSON; AGAPIOU, 2006; QUINTANA; CIURANA, 2011).

Segundo Stephenson e Agapiou (2006), há duas abordagens para se resolver problemas de vibração:

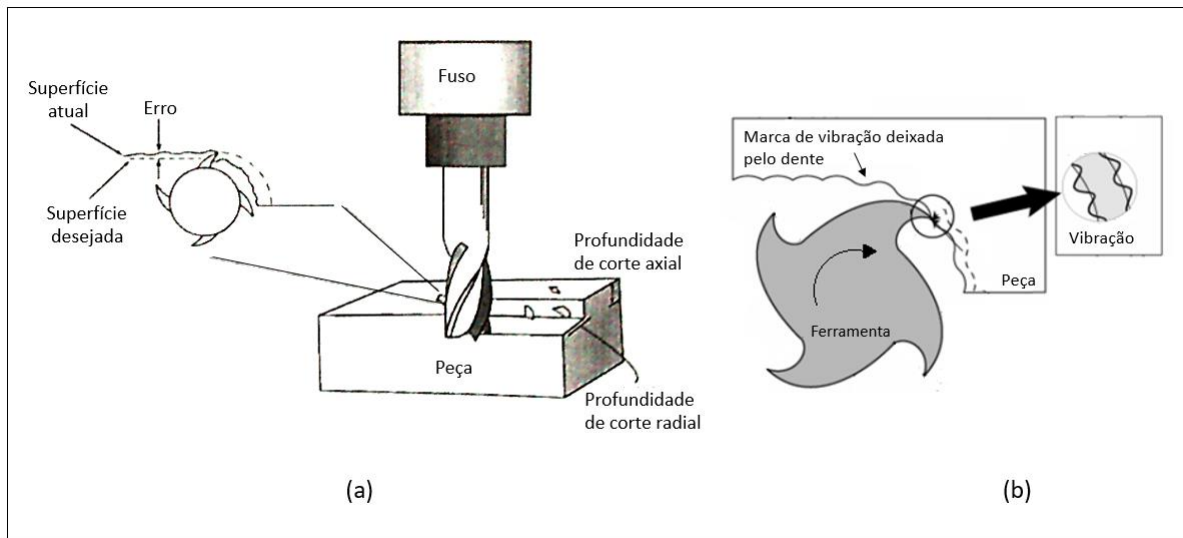
- **Primeira:** escolher ou alterar as condições de corte, tais como a velocidade de corte, taxa de avanço, profundidade de corte, geometria da ferramenta, fluido refrigerante, entre outros, para otimizar a taxa de remoção de material ao operar em regime estável. Esta é a abordagem de corte de teste, que detecta e corrige;
- **Segunda:** analisar as características dinâmicas do sistema de usinagem para determinar a faixa estável de operação e sugerir melhorias no projeto do sistema, para atender a essa faixa.

O estudo da vibração tem sido realizado principalmente nas operações de fresamento, pois é uma operação de usinagem de pontos múltiplos onde o processo é intermitente e

periódico nos intervalos de passagem dos dentes. Além disso, é um processo no qual se pode utilizar altas velocidades de produção (ALTINTAS; WECK, 2004).

Na Figura 29 é apresentado um esquema de como a vibração irá interferir na superfície usinada pelo processo de fresamento.

Figura 29- Dinâmica no fresamento



Fonte: Adaptado de (a) Stephenson e Agapiou (2006) e (b) Altintas e Weck (2004)

3.4.5.3 Temperatura

Durante o processo de usinagem a maior parte da energia consumida é utilizada para a remoção do cavaco, cujas fontes são a deformação do cavaco no plano de cisalhamento, o atrito do cavaco com a ferramenta e o atrito da ferramenta com a peça (MELO et al., 2003; SHAW, 2005; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). As porcentagens do calor total devido à a cada uma das fontes citadas variam com o tipo de usinagem empregada, tipo de material usinado, material e geometria da ferramenta utilizada e das condições de usinagem empregadas. Porém pode-se dizer que a deformação e o cisalhamento do cavaco no plano de cisalhamento são as principais fontes geradoras de calor, seguidas pelo atrito do cavaco com a superfície de saída da ferramenta e depois pelo atrito da peça com a superfície de folga da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

A temperatura desenvolvida nas operações de usinagem sempre foi um fator preocupante, pois pode influenciar no desgaste das ferramentas, o qual também acarreta no aumento da

temperatura (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). A aumento da temperatura ainda influencia na precisão do maquinário e na qualidade superficial e dimensão das peças usinadas (SUAREZ et al., 2008; MACHADO et al., 2009).

De acordo com Machado et al. (2009), a energia gasta no processo de formação de cavacos é percebida na forma de calor em três regiões distintas na área de formação de cavacos: na zona do plano de cisalhamento ou zona primária de cisalhamento, na interface entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta ou zona secundária de cisalhamento e na interface de contato da peça com a superfície de folga da ferramenta ou zona terciária de cisalhamento (Figura 14b). O calor, na zona primária de cisalhamento provém do trabalho de cisalhamento interno do material, enquanto nas outras duas zonas o calor vem do atrito e do cisalhamento interno provocados pela aderência entre as superfícies.

A zona de cisalhamento secundário é a principal fonte de calor, responsável pelas altas temperaturas da ferramenta de corte principalmente na usinagem de materiais duros e de alto ponto de fusão, como aços, titânio e ligas de níquel (MACHADO et al., 2009).

O calor gerado na zona de cisalhamento primário normalmente é dissipado pelo cavaco e uma pequena parte é transmitida por condução para a peça, a qual é responsável por possíveis erros dimensionais da peça (TRENT; WRIGHT, 2000).

A porcentagem de calor total que é dissipada pelo cavaco se eleva com o aumento da velocidade. Em velocidades de corte muito altas a maior parte do calor é carregada pelo cavaco, uma pequena quantia fica na peça e uma quantidade menor ainda fica na ferramenta, devido ao tempo de exposição ao calor gerado (DINIZ, MARCONDES; COPPINI, 2013). A zona de interface entre a peça e a superfície de folga da ferramenta pode-se tornar uma importante fonte de calor para a ferramenta quando se usina com pequenos ângulos de folga ou com ferramentas com desgastes consideráveis (TRENT; WRIGHT, 2000).

Na usinagem de polímeros, devido à a sua baixa condutividade térmica (quando comparadas com as dos metais), a maior parte do calor tem que ser removida pela ferramenta. Isso causa aumento na temperatura da zona de corte, a qual influencia o processo de duas maneiras: aumentando o desgaste da ferramenta e prejudicando a qualidade da superfície usinada (DONALDSON; PETERSON¹⁹, 1984 apud SCHNEIDER et al., 2008).

¹⁹ DONALDSON, R.R.; PATTERSON, S.R. Design and construction of a large, vertical axis diamond turning

3.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Dentro da indústria, principalmente no desenvolvimento de produto, muitas vezes é necessário obter informações sobre processos e produtos empiricamente, os quais são realizados através de experimentos. Experimentos são empregados para resolver problemas de fabricação, decidir entre diferentes processos de manufatura, entender a influência de determinados fatores, entre outros. Além disso esta tarefa torna-se cada vez mais importante na medida que se intensifica a base tecnológica dos produtos e as exigências governamentais e de clientes aumentando a necessidade de emprego de experimentos durante todas as etapas do ciclo de vida do produto (TAHARA, 2008).

O Planejamento de Experimentos (*Design of Experiments-DOE*) é uma técnica utilizada para definir quais dados serão coletados, sua quantidade e em que condições devem ser coletados durante um determinado experimento, buscando basicamente, satisfazer dois grandes objetivos: a maior precisão estatística possível na resposta e o menor custo. Atualmente há diversas técnicas de DOE, sendo umas das mais utilizadas o método Taguchi.

3.5.1 Método Taguchi

Após a Segunda Guerra Mundial, iniciou-se a reconstrução do Japão, o qual estava enfrentando uma grave escassez de matéria-prima de boa qualidade para a fabricação de equipamentos de alta qualidade e engenheiros qualificados. Diante de tantos problemas o desafio era desenvolver produtos com alta qualidade e continuar a melhorar a qualidade nessas circunstâncias. A tarefa de desenvolver uma metodologia para enfrentar o desafio foi atribuída ao Dr. Genichi Taguchi, que na época, era o gerente responsável pelo desenvolvimento de produtos da uma empresa de telecomunicações. Através de sua pesquisa, nos anos 50 e 60, Taguchi desenvolveu a base do design robusto e validou sua filosofia aplicando-a no desenvolvimento de muitos produtos, ficando assim, conhecido como o Método Taguchi (PHADKE, 1989; TAGUCHI; JUGULUM, 2002).

Pode-se definir o Método Taguchi como uma abordagem da engenharia de qualidade *off line* (fora de linha), ou seja, o controle da qualidade aplicado durante o projeto do produto e do

machine. **Proceedings of the SPIE**, v. 7, p. 433-462, 1983. apud SCHNEIDER, E. L; MARQUES, A. C; FALLER, R. R; KINDLEIN JÚNIOR, W. Análise dos Parâmetros de Usinagem no Acabamento Superficial de Polímeros. **UNOPAR Científica Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 7, n. 1, p. 25-30, Nov. 2008.

processo. O principal objetivo desse método é melhorar as características de um processo ou de um produto, através da identificação e ajuste dos seus fatores controláveis, que irão minimizar a variação do produto final em relação ao seu objetivo, tornando assim o projeto/produto mais robusto (TAGUCHI; JUGULUM, 2002; TAGUCHI; CHOWDHURY; WU, 2005; DEHNAD, 2012; PAREDES, 2016).

A proposta de Taguchi²⁰ (1986 apud Almeida e Toledo 1989), tenta reverter a tendência da concentração de esforços no controle do processo, voltando-se pra o projeto do produto e do processo, ou seja, ao invés de concentrar os esforços no processo de produção (equipamentos, ferramentas, mão de obra, entre outros) deve-se procurar projetar um produto que seja robusto o suficiente para garantir alta qualidade quando sujeito a variações que venham a ocorrer no processo de produção, bem como no ambiente de uso do produto.

Segundo Taguchi, a qualidade é medida pelo desvio que uma característica apresenta em relação ao seu valor esperado. Os fatores chamados de “Ruído” (temperatura, umidade, poeira, deterioração, etc.) causam tais desvios e resultam em perda de qualidade do produto. Este “prejuízo” pode ser avaliado através de uma “função perda”, proposta por Taguchi (TAGUCHI; CHOWDHURY; WU, 2005; PAREDES, 2016).

De acordo com Taguchi, esse método visa determinar a função perda do produto e otimizá-la empregando técnicas estatísticas. Estas análises permitem identificar os parâmetros ótimos de projeto que minimizam ou mesmo eliminam as influências dos fatores ruído no desempenho do produto. Assim, em lugar da tendência tradicional de isolar o produto dos fatores ruído, o que pode ser de difícil execução e/ou encarecer o processo produtivo, o método de Taguchi ambiciona realizar projetos que eliminem os efeitos dos fatores ruído no produto (TAGUCHI; JUGULUM, 2002; DEHNAD, 2012; PAREDES, 2016; TAGUCHI; JUGULUM, 2002).

O método Taguchi possibilita a investigação das variáveis de entrada do processo e suas interações com número reduzido de experimentos. O método torna possível reduzir significativamente a quantidade de experimentos originalmente planejados, por se tratar de uma estrutura composta por matrizes fracionadas saturadas, que proporciona grande redução de

²⁰ TAGUCHI, G. **Introduction to quality engineering**. Tokyo Asian Productivity Organization, 1986 apud ALMEIDA, H. S; TOLEDO, J. C. Método Taguchi: qualidade voltada para o projeto do produto e do processo. **Revista de Administração**, v. 24, n. 4, 1989.

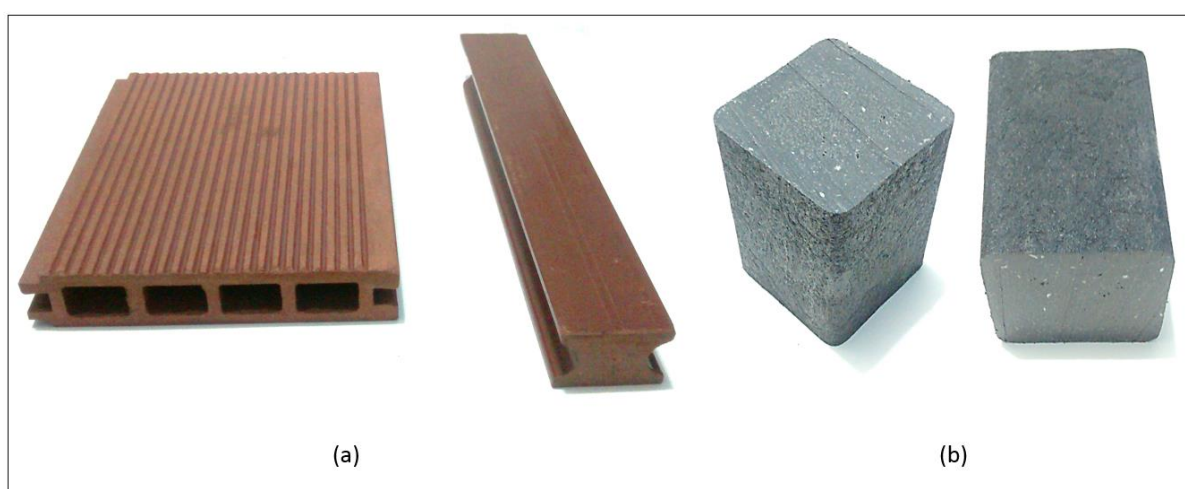
custos relativos à experimentação, podendo ser implementado em situações que envolvam produtos e/ou processos (TAGUCHI; JUGULUM, 2002; PIMENTA et al., 2012).

4 MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo foram utilizados dois tipos de compósito polimérico. O primeiro é o compósito plástico madeira (Figura 30a), o qual foi fabricado na China, importados e doados pela empresa Econs- Ecologia na Construção, situada na cidade de São José do Rio Preto- SP. Segundo o fornecedor, o material foi produzido com matriz de polipropileno (30%), reforço de farinha de madeira (60%) e aditivos (10%).

O segundo é a madeira plástica (Figura 30b), a qual foi produzida e doada pela empresa Wisewood Soluções Ecológicas S.A., localizada na cidade de Itatiba- SP. De acordo com o fornecedor o material foi produzido com matriz de polietileno e polipropileno e reforçada com fibra de vidro curta distribuída aleatoriamente. Segundo a empresa não é adicionado agente compatibilizante, somente carboneto de cálcio (CaCO_3) para diminuição da acidez da mistura.

Figura 30- Materiais utilizados no estudo: (a) compósito plástico madeira e (b) madeira plástica



Fonte: Autoria própria

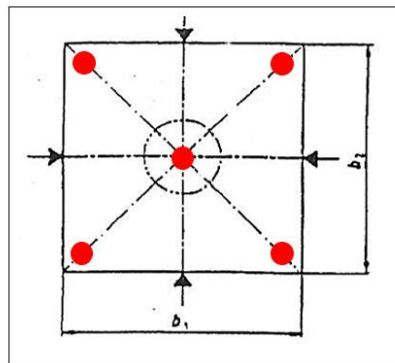
4.1 PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS

Para a avaliação das propriedades físico-mecânicas dos materiais foram realizados ensaios de densidade, dureza e cisalhamento. Para critério de comparação foi utilizada a mesma norma para os dois materiais, visto que, ambos são aplicados como substitutos da madeira *in natura* e preservada. Todos os testes físico-mecânicos foram realizados no Laboratório de Propriedades dos Materiais da Unesp/Campus de Itapeva-SP.

4.1.1 Densidade

Os ensaios para a determinação da densidade foram realizados com base nos procedimentos descritos na norma EN 323: 2000. Os corpos de prova para a determinação da densidade foram confeccionados, com dimensões nominais de 50mm x 50mm e espessura do material. Após a identificação foi determinada a espessura dos corpos de prova, utilizando-se um micrômetro com resolução de 0,01 mm, tendo sido tomadas em cinco pontos (Figura 31).

Figura 31- Pontos de medição no corpo de prova



Fonte: Adaptado de EN 323 (2000)

Também foram determinados o comprimento e a largura dos corpos de prova com o auxílio de um paquímetro com precisão de 0,1 mm, e o peso dos corpos de prova através de uma balança semi-analítica.

A densidade dos corpos de prova, foi determinada através das Equações 4 e 5.

$$D = \frac{M}{V} \times 1000000 \quad (4)$$

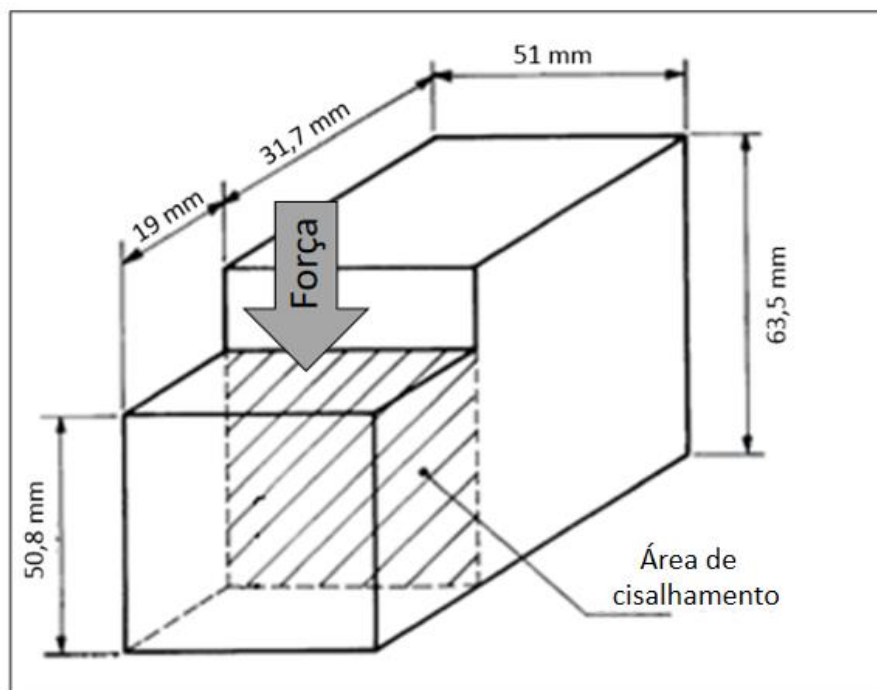
$$V = L \times C \times E \quad (5)$$

- D = densidade do corpo de prova, (kg/m³);
- M = massa do corpo de prova, (g);
- V = volume do corpo de prova, (mm³);
- L = largura do corpo de prova, (mm);
- C = comprimento do corpo de prova, (mm);
- E = espessura do corpo de prova, (mm).

4.1.2 Cisalhamento

Os ensaios para a determinação do cisalhamento foram realizados com base nos procedimentos descritos na norma ASTM D1037 – 12: 2006. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios EMIC DL300kN com célula de carga com capacidade de 10kN. Na Figura 32 é apresentado o esquema do corpo de prova de cisalhamento segundo recomendações da ASTM D1037 – 12: 2006, bem como a direção de aplicação da força.

Figura 32- Esquema do corpo de prova de cisalhamento paralelo a superfície e aplicação da força



Fonte: Adaptado de ASTM D1037 – 12 (2006)

Os valores da tensão máxima de cisalhamento foram obtidos através da Equação 6, a qual foi adicionada ao software da EMIC.

$$\tau = \frac{P_{max}}{b*d} \quad (6)$$

τ = máxima tensão de cisalhamento, (MPa);

P_{max} = carga máxima, (N);

b = largura da área de cisalhamento, mensurada em condição seca (mm).

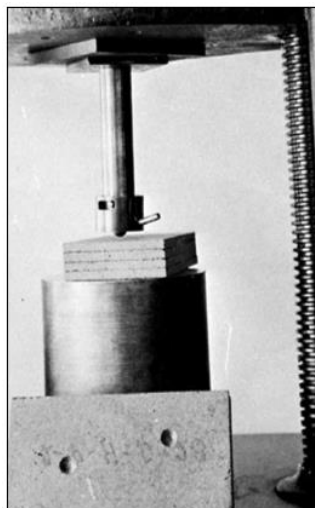
d = profundidade da área de cisalhamento, mensurada em condição seca (mm).

4.1.3 Dureza

Os ensaios para a determinação da dureza foram realizados com base nos procedimentos descritos na norma ASTM D1037 – 12: 2006. Os corpos de prova foram confeccionados com dimensões nominais de 76mm x 152mm e espessura do corpo de prova. Como cada corpo de prova do WPC tinha menos de 6mm de espessura, foram utilizados dois copos de prova para cada ensaio, conforme recomendações da ASTM D1037 – 12: 2006. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios EMIC DL300kN com célula de carga de carga com capacidade de 10kN.

O ensaio de dureza foi realizado pela modalidade Janka, na qual penetra-se uma esfera de 11,3 mm de diâmetro, até metade de seu diâmetro na amostra, ou seja, 5,65 mm (Figura 33). Deve-se realizar duas penetrações em cada superfície da amostra, com uma distância de 25 mm das laterais, separando-as o suficiente para que uma penetração não tenha nenhum efeito sobre a outra.

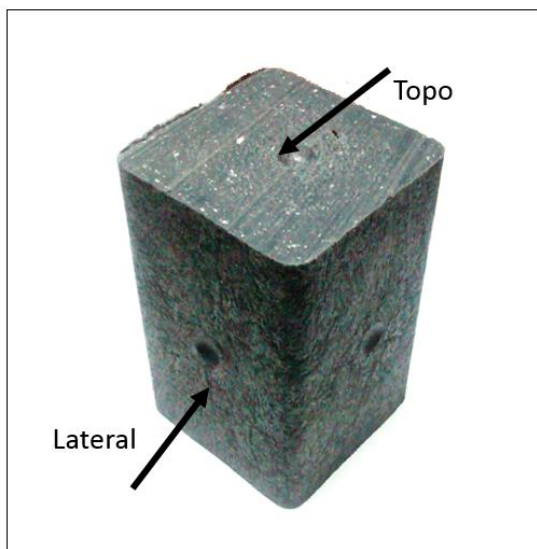
Figura 33- Exemplo de Corpo de prova de dureza pela ASTM D1037 – 12: 2006, sendo ensaído



Fonte: ASTM D1037 – 12 (2006)

Para quesito de comparação, nesse estudo só foram utilizados os valores obtidos nos ensaios de dureza Janka das laterais pois, o processo de fresamento foi realizado somente nessa parte das peças (Figura 34).

Figura 34- Indicação da lateral e topo das peças de madeira plástica



Fonte: Autoria própria

4.1.4 Delineamento experimental

Para a análise estatística foi realizada uma análise de variância (ANOVA) através do teste T de Student, com nível de significância de 5% para testar a existência de diferenças significativas entre as médias. Inicialmente foram verificadas a normalidade dos dados e a homogeneidade das variâncias, através dos testes de Shapiro Wilk e Bartlett, respectivamente. Para a análise estatística foi utilizado o software R versão 2.15.2-1 de 2012.

4.2 ANÁLISE TÉRMICA

Como os materiais estudados são de matriz polimérica foi realizado uma análise térmica, como questão de segurança, e assim, garantir que os processos de usinagem realizados não degradassem o material e nem que fosse atingida a faixa de temperatura de transição vítrea dos mesmos. Para isso foram realizadas as análises Termomecânica (TMA) e Termogravimétrica (TG/DTG), no Laboratório de Análises térmicas da Unesp/Campus de Guaratinguetá-SP.

4.2.1 Análise Termomecânica

Os materiais estudados foram ensaiados em um TMA/SS 6100 (*Thermo Mechanical Analysis*) marca *SII-Nanotechnology Inc. - Seiko*, modelo EXSTAR6000, *SW Muse Standard*

Analysis Versão 6.2U (Figura 35). Este equipamento foi calibrado em altura, temperatura e força, de acordo com as especificações do fornecedor. As análises foram realizadas segundo a norma ASTM E831, para conhecer o comportamento do coeficiente de expansão térmica linear do WPC e da MP.

Os corpos de prova para a determinação do coeficiente de expansão térmica foram confeccionados, com dimensões nominais de 8,0 mm x 8,0 mm e 1,5 mm. Os corpos de prova foram analisados utilizando-se a faixa de 25 a 150 °C, com taxa de aquecimento de 3 °C/min, força de 100 mN e atmosfera de N₂ (100 mL/min).

Figura 35- Equipamento de TMA da *SII Nanotechnology*



Fonte: Autoria própria

4.2.2 Análise Termogravimétrica

Análises termogravimétricas foram realizadas utilizando-se um equipamento TG/DTA 6200, modelo EXSTAR6000 da marca *SII Nanotechnology* (Figura 36). Para as análises foram utilizados aproximadamente 8,0 mg de material/amostra, porta-amostra de platina como material de referência. As amostras foram aquecidas utilizando-se taxas de aquecimento de

10°C/min, sob fluxo constante de nitrogênio de 100 mL/min e em uma faixa de temperaturas compreendida entre 25 e 1000°C. Os ajustes e a calibração foram realizados de acordo com as especificações do fabricante.

Figura 36- Equipamento de TGA/DTA da *SII Nanotechnology*



Fonte: Autoria própria

4.3 ESTUDO DA USINAGEM

4.3.1 Processo de Usinagem

Os materiais foram submetidos aos processos de furação e de fresamento, em um Centro de Usinagem marca DMG modelo DMU50ECO, com rotação máxima do fuso de 8000 rpm e potência de 17 kVA (Figura 37), como forma de se avaliar a usinabilidade de ambos. Os ensaios foram realizados Laboratório de Estudos da Usinagem da Unesp/Campus de Guaratinguetá-SP.

Figura 37- Centro de Usinagem marca DMG modelo DMU50ECO série DMG Ecoline

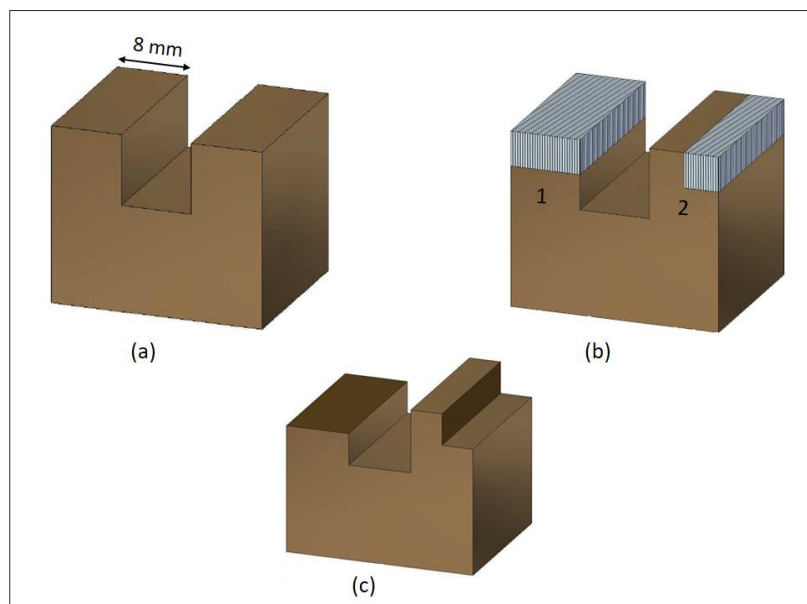


Fonte: Autoria própria

4.3.1.1 Fresamento

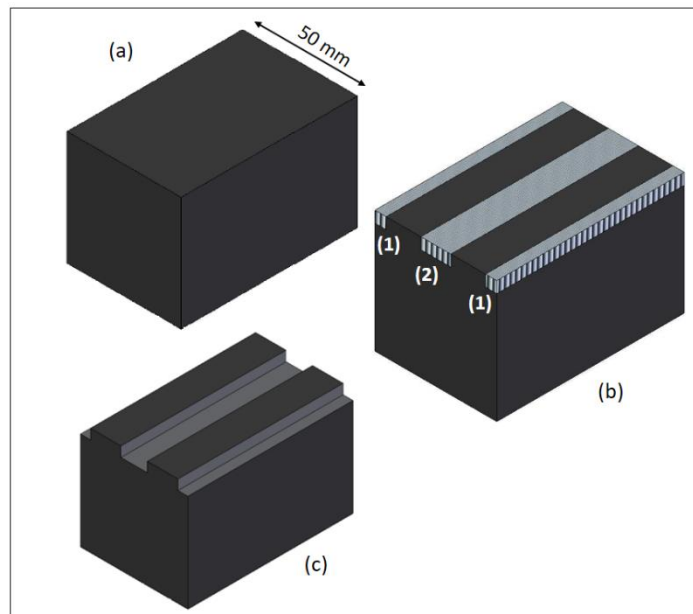
O processo de fresamento foi realizado nas modalidades tangencial e frontal, nos sentidos concordante e discordante (Figura 38 e 39).

Figura 38- (a) Amostras de plástico madeira a serem usinadas, (b) esquema do processo de usinagem: (1b) frontal e (2b) tangencial e (c) WPC usinado



Fonte: Autoria própria

Figura 39- (a) Amostras da madeira plástica a serem usinadas, (b) esquema do processo de usinagem: (1b) tangencial e (2b) frontal e (c) MP usinado



Fonte: Autoria própria

Na Figura 40 é apresentado o corpo de prova de plástico madeira, sendo usinado pelo processo de fresamento tangencial.

Figura 40- Corpo de prova de WPC sendo usinado pelo processo de fresamento tangencial



Fonte: Autoria própria

O processo de fresamento foi realizado nas modalidades tangencial e frontal, nos sentidos concordante e discordante. Após os ensaios preliminares foram determinadas três velocidades de corte, partindo do número máximo de rotações do centro de usinagem, utilizando a Equação 7.

$$V_c = \frac{\pi * D * \eta}{1000} \quad (7)$$

V_c = velocidade de corte, (m/min)

D = diâmetro da ferramenta de corte, (mm);

η = número de rotações, (rpm).

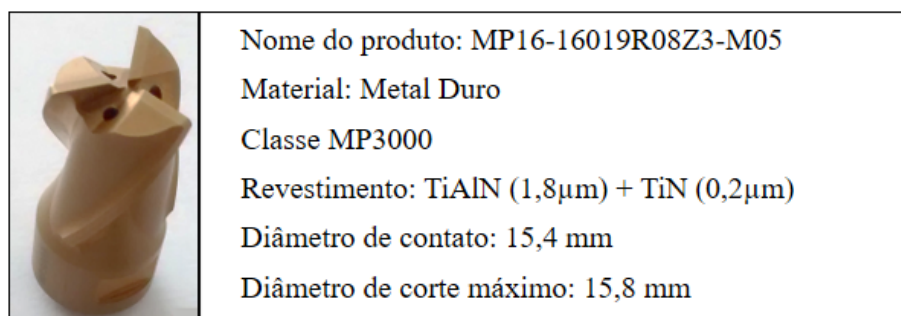
Através da Equação 7, obteve-se as seguintes velocidades:

- 4000rpm= 201 m/mim;
- 6000rpm= 301,4 m/mim;
- 8000rpm= 401,9 m/min.

Ainda foram determinadas três velocidades de avanço (3, 5 e 7 m/mim) e três profundidades de corte (4, 5 e 6 mm). A largura de usinagem variou de acordo com o tamanho de cada amostra utilizada, sendo em média 180 mm no fresamento tangencial e 320 mm no frontal, ambos os valores para o WPC. Para a MP foi um valor médio de 100 mm, para ambos os processos de fresamento.

Para cada material foi utilizada uma fresa de metal duro, com 16mm de diâmetro, com revestimento de TiAlN (Nitreto de Titânio e Alumínio) e uma camada superior decorativa de TiN (Nitreto de Titânio), com 3 arestas cortantes (Figura 41) da empresa Seco Tools.

Figura 41- Fresa MP16-16019R08Z3-M05

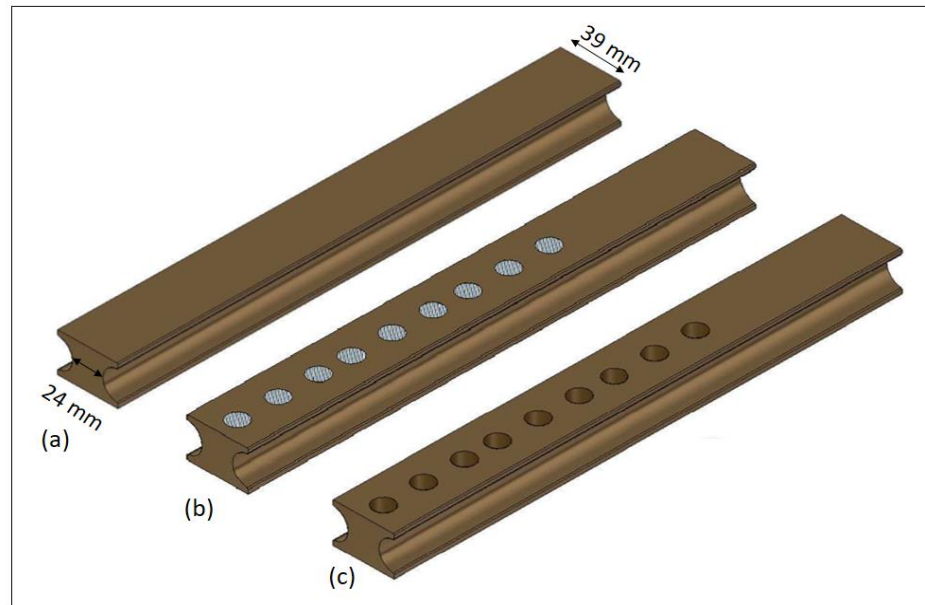


Fonte: Autoria própria

4.3.1.2 Furação

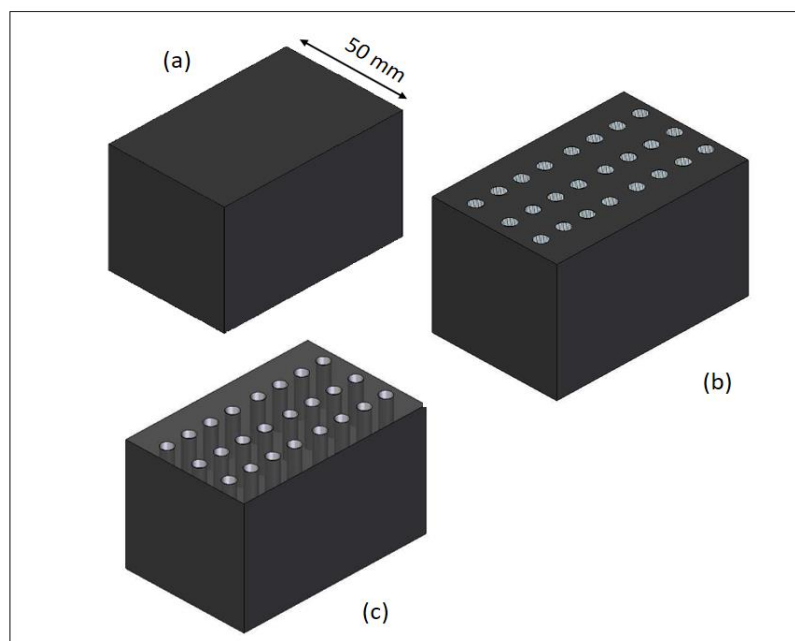
Nas Figuras 42 e 43 são apresentados os esquemas de furação realizados na madeira plástica e no plástico madeira.

Figura 42- (a) Amostras de plástico madeira a ser usinada, (b) esquema do processo de furação e (c) WPC com furos



Fonte: Autoria própria

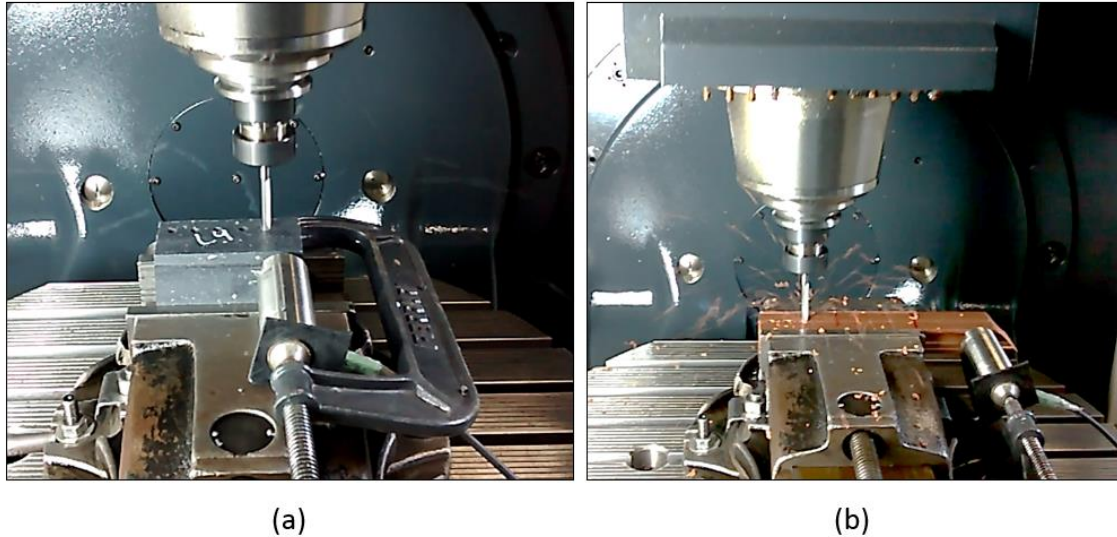
Figura 43- (a) Amostras de plástico madeira a serem usinadas, (b) esquema do processo de furação e (c) MP furado



Fonte: Autoria própria

Na Figura 44 observa-se corpos de prova utilizados no processo de furação sendo usinados.

Figura 44- Corpor de prova de furação (a) madeira plástica e (b) plástico madeira



Fonte: Autoria própria

Para o processo de furação, foram determinadas três velocidades de corte, partindo do número máximo de rotações do centro de usinagem (Equação 7), sendo elas:

- 4000rpm= 82,1 m/mim;
- 6000rpm= 123,2 m/mim;
- 8000rpm= 164,3 m/min.

Ainda foram determinadas três velocidades de avanço (3, 5 e 7 m/mim) e fixada uma profundidade de 22mm.

Para cada material foi utilizada uma broca helicoidal paralela com dois canais e furo de refrigeração, com 6,54 mm de diâmetro, indicada para uso geral da empresa OSG Ferramentas de Precisão Ltda, de metal duro sem revestimento (Figura 45).

Figura 45- Broca MD-HO-BDR



Nome do produto: MD-HO-BDR
 Material: Metal Duro
 Diâmetro de corte: 6,54 mm
 Comprimento de canal: 62 mm
 Comprimento total: 112 mm

Fonte: Adaptado de OSG SULAMERICANA

4.3.2 Delineamento Experimental

4.3.2.1 Fresamento

A escolha do arranjo ortogonal mais adequado para a situação foi baseada na quantidade de fatores estudados (Tabela 1). Como, neste caso, seria necessário estudar cinco fatores, sendo dois com 2 níveis e 3 com três níveis, foi escolhido o arranjo ortogonal L18 de Taguchi, o qual possui uma coluna com dois níveis e sete colunas com três níveis (Tabela 2). Porém como era necessário a utilização de duas colunas com 2 níveis, a coluna B foi alterada, tornando o nível 2 como nível 1 e o nível 3 como nível 2 (Tabela 3).

Tabela 1- Fatores e níveis dos experimentos para o fresamento

Fatores	Níveis		
	1	2	3
Sentido de corte (A)	Concordante	Discordante	-
Material (B)	WPC	MP	-
Velocidade de Corte (C)	4000 rpm	6000 rpm	8000 rpm
Velocidade de Avanço (D)	3 m/mim	5 m/mim	7 m/mim
Profundidade de corte (E)	4 mm	5 mm	6 mm

Tabela 2- Matriz do arranjo ortogonal L18

Exp.	FATORES				
	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2
3	1	1	3	3	3
4	1	2	1	1	2
5	1	2	2	2	3
6	1	2	3	3	1
7	1	3	1	2	1
8	1	3	2	3	2
9	1	3	3	1	3
0	2	1	1	3	3
11	2	1	2	1	1
12	2	1	3	2	2
13	2	2	1	2	3
14	2	2	2	3	1
15	2	2	3	1	2
16	2	3	1	3	2
17	2	3	2	1	3
18	2	3	3	2	1

Tabela 3- Matriz L18 modificada

Exp.	FATORES				
	A	B	C	D	E
1	1	<i>I</i>	1	1	1
2	1	<i>I</i>	2	2	2
3	1	<i>I</i>	3	3	3
4	1	<i>I</i>	1	1	2
5	1	<i>I</i>	2	2	3
6	1	<i>I</i>	3	3	1
7	1	<i>2</i>	1	2	1
8	1	<i>2</i>	2	3	2
9	1	<i>2</i>	3	1	3
10	2	<i>I</i>	1	3	3
11	2	<i>I</i>	2	1	1
12	2	<i>I</i>	3	2	2
13	2	<i>I</i>	1	2	3
14	2	<i>I</i>	2	3	1
15	2	<i>I</i>	3	1	2
16	2	<i>2</i>	1	3	2
17	2	<i>2</i>	2	1	3
18	2	<i>2</i>	3	2	1

De acordo com a configuração experimental do arranjo ortogonal L18, apresentado na Matriz do arranjo ortogonal L18, foram realizadas 18 rodadas de experimentos e para assegurar a exatidão dos resultados, foram realizadas três repetições para cada configuração experimental. Foi utilizado o WPC no nível 1 e MP no nível 2, devido à a quantidade de material disponível.

4.3.2.2 Furação

A escolha do arranjo ortogonal mais adequado para a situação foi baseada na quantidade de fatores estudados (Tabela 4). Como, neste caso, seria necessário estudar três fatores, sendo um com 2 níveis e dois com 3 níveis, foi escolhido o arranjo ortogonal L9 de Taguchi, o qual possui três colunas com três níveis cada (Tabela 5). Porém como era necessário a utilização de uma coluna com 2 níveis, a coluna A foi alterada, tornando o nível 2 como nível 1 e o nível 3 como nível 2 (Tabela 6).

Tabela 4- Fatores e níveis dos experimentos para a furação

Fatores	Níveis		
	1	2	3
Material (A)	MP	WPC	-
Velocidade de Corte (B)	4000 rpm	6000 rpm	8000 rpm
Velocidade de Avanço (C)	3 m/mim	5 m/mim	7 m/mim

Tabela 5- Matriz do arranjo ortogonal L9

Exp.	FATORES		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Tabela 6- Matriz L9 modificada

Exp.	FATORES		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	1	1	2
5	1	2	3
6	1	3	1
7	2	1	3
8	2	2	1
9	2	3	2

De acordo com a configuração experimental do arranjo ortogonal L9, apresentado na Tabela 6, foram realizadas 9 rodadas de experimentos e para assegurar a exatidão dos resultados, foram realizadas três repetições para cada configuração experimental. Foi utilizado o MP no nível 1 e WPC no nível 2, devido à a quantidade de material disponível.

4.3.2.3 Análise Estatística

Para o tratamento das variáveis resposta foi escolhida a modalidade “menor melhor”, no qual o ajuste final é caracterizado pelos menores valores de cada variável resposta. Para a análise estatística foi realizada uma análise de variância (ANOVA) através do teste F, com nível de significância de 5% para testar a existência de diferenças significativas entre as médias.

Para identificar as variáveis influentes, foram utilizados dois critérios. Inicialmente foi verificado os valores de $F_{\text{crítico}}$ na tabela de distribuição $F_{5\%}$, onde $F_{\text{calculado}} > F_{\text{crítico}}$ existe a influência significativa do fator. O segundo, foi o critério proposto por Phadke (1989), onde um

$F_{\text{calculado}} > 2$ já deve ser considerado, pois isso significa que o valor obtido é no mínimo duas vezes maior que o erro.

4.3.3 Sistema Aquisição de dados

Durante os processos de usinagem foram coletados dados de potência e vibração com o auxílio de um sistema de aquisição de dados computadorizado, o qual coletou os dados do processo em tempo real. Esse sistema permite a obtenção de quaisquer variáveis físicas que, mediante sensores ou transdutores apropriados, são convertidos em sinais elétricos proporcionais.

Para isto foi desenvolvido um aplicativo que adquirisse os dados com uma taxa de 2000 pontos por segundo. Este programa foi desenvolvido através da plataforma do software Labview 7.1 2012, da National Instruments. O sistema ainda contou com uma placa de aquisição de dados da mesma empresa do software, modelo NI PCI 6220, que foi acoplada no computador. A placa teve a função de receber os sinais analógicos enviado dos sensores acoplados ao centro de usinagem e transformá-los em sinais digitais para serem interpretados pelo software.

4.3.3.1 Potência consumida

Para a aquisição da potência consumida do motor do centro de usinagem foram usados sensores de efeito Hall marca LEM modelo AT 100 B10 (Figura 46).

Figura 46- Sensor de efeito Hall, marca LEM, modelo AT 100 B10



Fonte: Autoria própria

O sensor em função da corrente elétrica de uma das fases do motor gera uma saída proporcional de 0 a 10 Volts de Corrente Contínua (VCC), que é armazenada pelo computador. Como o sinal adquirido pelo sistema tem uma saída proporcional em volts é necessário converter o valor para ampéres. O fabricante do sensor fornece a Equação 8 para a transformação do dado adquirido em volts para ampéres.

$$I = U_{cc} * 10 \quad (8)$$

I = corrente de uma das fases em ampéres;

U_{cc} = tensão de corrente contínua em volts.

Substituindo o valor da corrente, o valor da tensão de fase do motor do centro de usinagem (220 V) e o fator de potência (0,92) do motor, na Equação 9 que foi utilizada para transformar o sinal adquirido em volts para potência consumida em watts e, multiplicado toda a equação por $\sqrt{3}$, visto que motor utilizado é trifásico, obtêm-se a Equação 10.

$$P_c = I \times U_f \times F_p \times \sqrt{3} \quad (9)$$

P_c = potência consumida, em watts;

I = corrente alternada de uma das fases, em ampéres;

U_f = tensão de uma das fases, em volts;

F_p = fator de potência.

$$P_c = U_{cc} * 10 * 0,92 * 220 * \sqrt{3} \quad (10)$$

4.3.3.2 Vibração

Para a aquisição dos valores de vibração foi utilizado um sensor piezelétrico (acelerômetro) e um amplificador de sinal com saída retificada em RMS, marca Vibro Control, modelo TV100 (Figura 47).

Figura 47- Sensor piezelétrico, marca VibroControl, modelo TV100



Fonte: Autoria própria

Os valores obtidos em VCC foram convertidos depois para valores de velocidade em mm/s através da Equação 11, fornecida pelo fabricante.

$$V = \frac{25 \cdot VCC}{8} \quad (11)$$

4.3.3.3 Aquecimento das peças durante a usinagem

Para captação da temperatura na região de contato da ferramenta com a amostra, não foi possível o uso de termômetros comuns de contato, já que este seria danificado. Portanto foi utilizado uma câmera térmica por infravermelho. Dessa forma foi possível a obtenção da temperatura na região de contato da ferramenta com a amostra, proporcionando o estudo do comportamento do aquecimento ao longo da usinagem.

A câmera infravermelha utilizada foi da marca FLIR SYSTEMS®, modelo FLIR i5 (Figura 48) e as medições coletadas foram registradas pelo Software ThermaCAM™ QuickReport da FLIR Systems, versão 1.1 de 2007. A medições foram realizadas em duplicatas, para cada uma das repetições do arranjo ortogonal de Taguchi.

Figura 48- Câmera infravermelha



Fonte: Flir (2015)

4.3.4 Desgaste e avaria das ferramentas de corte

Após os processos de usinagem foram determinados os desgastes e as avarias que as fresas e as brocas sofreram durante os processos.

Para realizar a avaliação do tipo de desgaste qualitativo foi utilizado um microscópio óptico da Carl Zeiss, modelo Stemi 2000 com a câmera da AxioCam ICc 3 da Zeiss, acoplado para a captação de imagem. (Figura 49). Foram capturadas fotos das superfícies de corte e de saída.

Figura 49- Microscópio óptico Zeiss



Fonte: Autoria própria

Para a análise quantitativa, foi utilizado um microscópio de medição da Marca Mahr, modelo MarVision MM200 (Figura 50).

Figura 50- Microscópio de medição



Fonte: Autoria própria

Foi realizada a mensuração do desgaste de flanco (VB máximo) através da fixação da linha de referência no início do desgaste e em seguida movendo esta mesma linha até o final do desgaste e assim determinando a sua extensão em milímetros.

Para se determinar o quanto cada processo e material estudado desgastou as ferramentas, foi dividido o VB máximo pelo comprimento de corte, ambos em milímetros. Para isso, foi calculado o comprimento de corte, para se estabelecer o quanto cada aresta usinou de cada material.

4.3.4.1 Comprimento de corte

O comprimento de corte (L_c) por definição é considerado o comprimento linear percorrido por cada aresta de corte em relação à amostra usinada.

4.3.4.1.1 Fresamento

Para o cálculo do comprimento de corte, inicialmente foi determinado o ângulo de engajamento, como demonstrado na Equação 12. A seguir foram determinados o comprimento do arco a cada giro da fresa (Equação 13) e o comprimento de corte do passe usinado (Equação 14). Por fim, foi determinado o comprimento de corte, como demonstrado nas Equações 15, 16 e 17. Os cálculos foram baseados nas equações propostas por Garcia (2015).

$$\alpha e = 90^\circ + \text{arc sen} \left(\frac{2 \cdot a e}{D} - 1 \right) \quad (12)$$

αe = ângulo de engajamento, em graus;
 $a e$ = penetração de trabalho, em mm;
 D = diâmetro da fresa, em mm.

$$L_{cf} = \frac{\alpha e \cdot \pi \cdot D}{360^\circ} \quad (13)$$

L_{cf} = comprimento do arco a cada giro da fresa, em mm;
 αe = ângulo de engajamento, em graus;
 D = Diâmetro da fresa, em mm;

$$L_{cp} = \frac{L_{cf} \cdot L_n}{f} \quad (14)$$

L_{cp} = comprimento de corte do passe usinado, em mm;
 L_{cf} = comprimento do arco a cada giro da fresa, em mm;
 L_n = comprimento da amostra, em mm;
 f = taxa de avanço, em mm,

$$f = f_z \cdot Z \quad (15)$$

f = taxa de avanço, em mm,
 f_z = avanço por dente, em mm/dente;
 Z = número de dentes, em dentes.

$$L_c = L_{cp} \cdot P \quad (16)$$

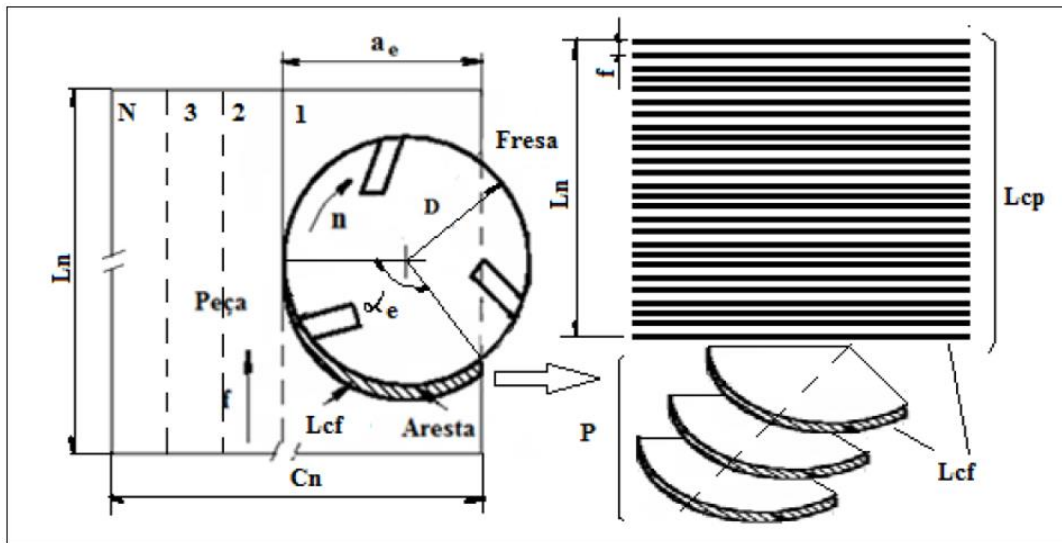
L_c = comprimento de corte, em mm;
 L_{cp} = comprimento de corte do passe usinado, em mm;
 P = número de passes usinados.

∴

$$L_c = \frac{P \cdot \left[90^\circ \cdot \text{arc sen} \left(\frac{2 \cdot a e}{D} - 1 \right) \right] \cdot \pi \cdot D \cdot L_n}{360 \cdot f} \quad (17)$$

Na Figura 51 é apresentado um esquema para o cálculo de comprimento de corte.

Figura 51- Esquema representativo para o cálculo de comprimento de corte (Lc)



Fonte: Garcia (2015)

4.3.4.1.2 Furação

Baseado nas Equações de 12 a 17, propostas por Garcia (2015), foram feitas adaptações para o processo de furação, apresentados nas Equações de 18 a 22.

$$Lcb = \sqrt{(\pi * D)^2 + fz^2} \quad (18)$$

Lcb= comprimento do arco a cada giro da broca, em mm;

D= Diâmetro da broca, em mm;

fz= avanço por dente, em mm/dente.

$$Lcp = \frac{Lcb * Ln}{f} \quad (19)$$

Lcp= comprimento de corte do passe usinado, em mm;

Lcb= comprimento do arco a cada giro da broca, em mm;

Ln = comprimento do furo usinado, em mm;

f= taxa de avanço, em mm,

$$f = fz * Z \quad (20)$$

f= taxa de avanço, em mm,

fz= avanço por dente, em mm/dente;

Z = número de dentes, em dentes.

$$L_c = L_{cp} * P \quad (21)$$

L_c = comprimento de corte, em mm;

L_{cp} = comprimento de corte do passe usinado, em mm;

P = número de passes usinados.

∴

$$L_c = \frac{P * \left[\sqrt{(\pi * D)^2 + fz^2} \right] * Ln}{f} \quad (22)$$

4.3.5 Tipos e formas de cavacos

A cada processo de usinagem foi coletado o cavaco gerado. Para analisar os tipos e formas dos cavacos gerados foi utilizado um microscópio óptico da Carl Zeiss, modelo Stemi 2000 com captura de imagem (Figura 49).

A classificação dos tipos de cavacos gerados foi realizada segundo sua morfologia (contínuos, descontínuos, parcialmente contínuos ou segmentados) e para a classificação dos formatos dos cavacos foi utilizada as recomendações da norma ISO 3685:1993 (fita, helicoidal, espiral ou lascas).

Para uma melhor compreensão da influência dos parâmetros de usinagem, foi montado um gráfico de “profundidade de corte *versus* velocidade de avanço” e feita uma análise do fator de empacotamento dos cavacos, que é a relação entre o volume do cavaco e o volume de um sólido equivalente ao seu peso (Equação 23), para cada um dos experimentos do arranjo ortogonal de Taguchi.

$$R = \frac{\text{Volume do cavaco}}{\text{Volume de um sólido equivalente ao seu peso}} \quad (23)$$

R = fator de empacotamento

Para esse teste, foi preenchida uma proveta de 10 ml até 5ml para o WPC e 2ml para a MP, esse volume seria considerado como o do cavaco, para o qual também foi terminada a massa em gramas, com o auxílio de uma balança analítica da marca Shimadzu, modelo AUX220, com precisão de 0,0001g.

Com o valor do volume do cavaco e sua massa correspondente e o valor da densidade de cada um dos materiais estudados, foi determinado o volume de um sólido equivalente ao seu peso, através da Equação 24.

$$\text{Densidade} = \frac{\text{Massa}}{\text{Volume}} \quad (24)$$

4.3.6 Integridade superficial

Após a usinagem foi avaliada a integridade superficial das amostras utilizadas no estudo. Para isso foi determinada a rugosidade e a análise topográfica das amostras fresadas e para as amostras furadas foi determinada a rugosidade a variação dimensional dos furos.

4.3.6.1 Rugosidade

Para a avaliação da qualidade superficial das amostras através da rugosidade foi utilizado um rugosímetro da marca Mahr modelo Marsurf M300 (Figura 52), com ponta apalpadora em formato de cone esférico feita de diamante e com raio de ponta de 2 μm .

Figura 52- Rugosímetro marca Mahr modelo Marsurf M300

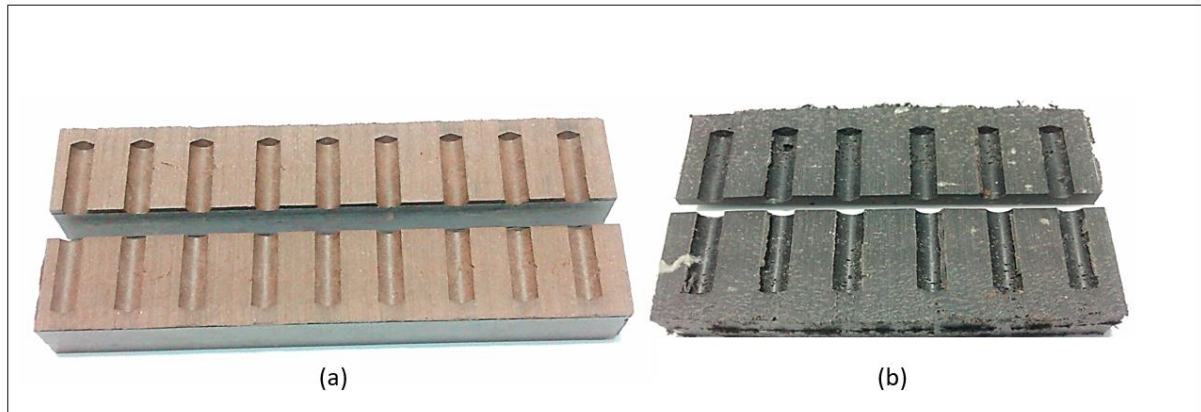


Fonte: Autoria própria

Para a furação, perfil periódico, foi utilizado o parâmetro de rugosidade RSm, com comprimento de amostragem adotado (*cut-off*) de 2,5 mm e 0,8mm para o WPC e MP

respectivamente (Quadro 4). Para facilitar a medição, assim como maior confiabilidade dos resultados, os corpos de prova de furação foram seccionados ao meio (Figura 53).

Figura 53- Corpos de prova de furação seccionados



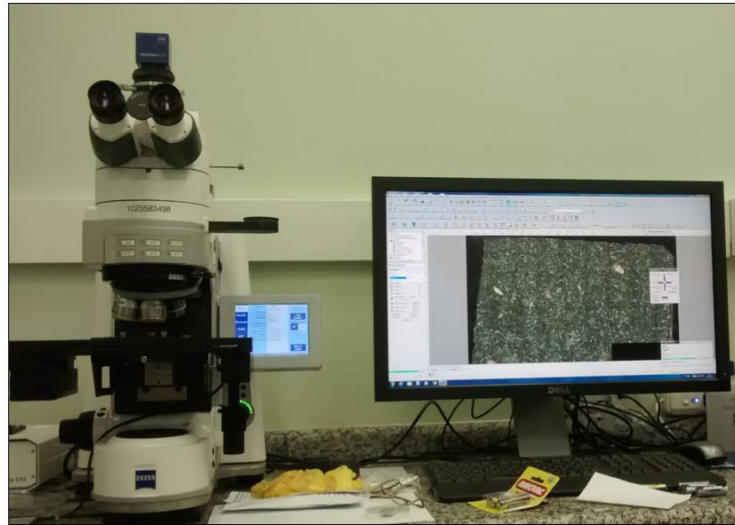
Fonte: Autoria própria

Para o fresamento, perfil não periódico, foi utilizado o parâmetro de rugosidade Ra, com comprimento de amostragem adotado (*cut-off*) de 2,5 mm e 0,8mm para o WPC e MP respectivamente (Quadro 5).

4.3.6.2 Topografia

Para a análise de topografia das superfícies usinadas foi utilizado um microscópio óptico da marca Zeiss, modelo Axio Imager Z2m (Figura 54). Este microscópio possui sistema completo para microscopia correlativa de análise de materiais com luz refletida em campo claro, campo escuro e polarizado, sendo esse estudo realizado em campo escuro e luz polarizada, através da reconstrução por extensão de foco.

Figura 54- Microscópio ZEISS Axio Imager Z2m



Fonte: Autoria própria

O sistema fotográfico do microscópio captura as imagens em diversos planos e depois realiza a reconstrução da imagem, possibilitando assim, a visualização da topografia das amostras usinadas.

4.3.6.3 Desvio Dimensional

Para a determinação do desvio dimensional dos furos, foi utilizado um conjunto de pinos calibrados de 6 mm a 7 mm, com intervalo de um centésimo e tolerância h6, da marca Veb Längenmesstechnik Limbach (Figura 55).

Figura 55- Pino Padrão Veb Längenmesstechnik Limbach, 6-7/0,01 mm \varnothing 

Fonte: Autoria própria

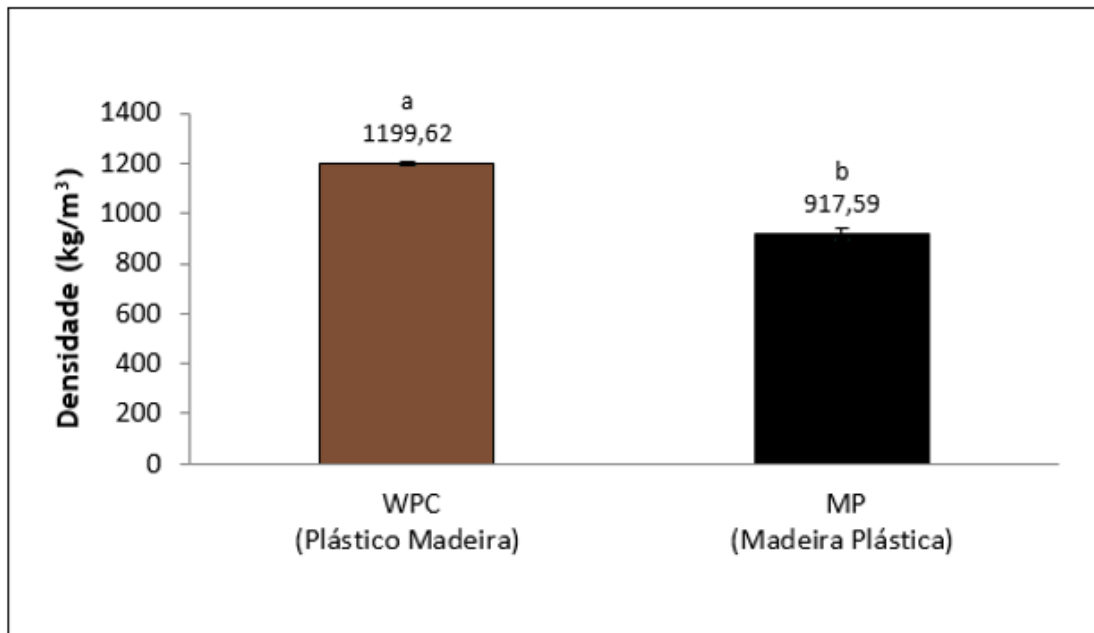
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS

5.1.1 Densidade

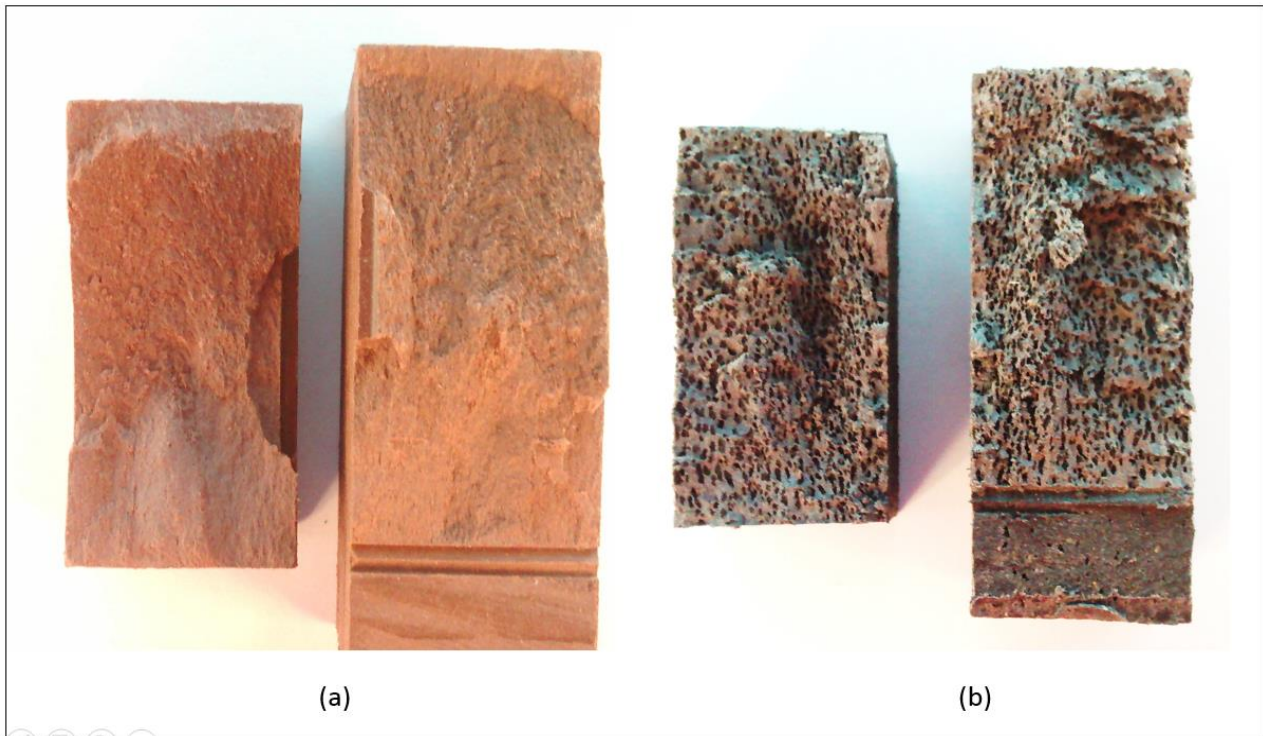
O plástico madeira (1199,62 kg/m³) apresentou uma densidade significativamente superior à da madeira plástica (917,59 kg/m³) (Figura 56), fato que pode ser explicado devida a alta porosidade da MP em comparação como WPC (Figura 57), mesmo a densidade da fibra de vidro sendo maior que a da madeira *in natura* (MIOTTO, 2009).

Figura 56- Médias das densidades da madeira plástica e do plástico madeira



Fonte: Autoria própria

Figura 57- Aspecto dos materiais (a) WPC e (b) MP



Fonte: Autoria própria

Para a análise da porosidade dos materiais, só foi realizada uma comparação visual entre eles, visto que não foi encontrado um método convencional ou alternativo para a quantificação volumétrica do número de poros. Para utilizar a metodologia de Arquimedes seria necessário conhecer o valor absoluto da densidade dos materiais, além de submergir em água os corpos de prova. Nesse caso, a metodologia não seria possível pois, não é sabido a densidade absoluta dos materiais e a madeira presente no WPC é higroscópica, o que acarretaria em resultados errôneos.

Já para a metodologia de porosimetria de mercúrio seria necessário que os poros do material fossem interconectados, o que nem sempre ocorre nos materiais estudados, sendo assim, o resultado final seria mascarado.

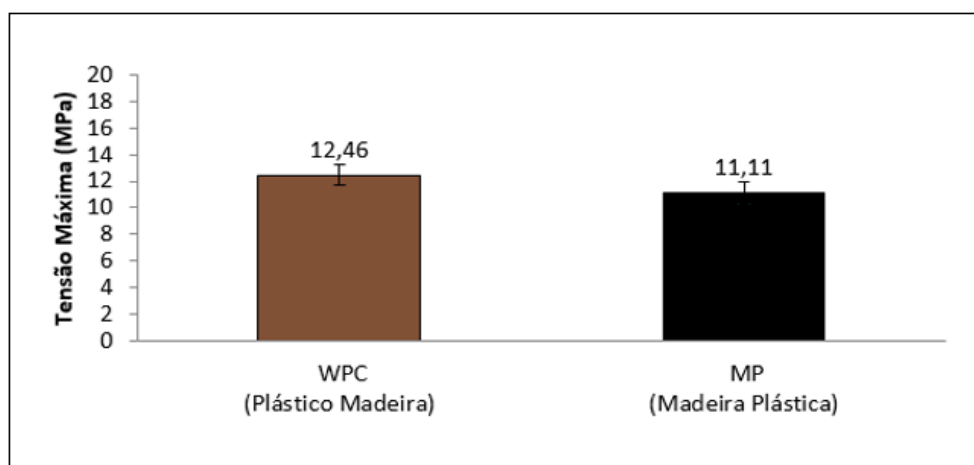
Além dessas duas técnicas, foi cogitado depositar uma resina com corante de coloração “viva” como azul ou verde, para que realçasse os poros e assim fosse possível, através de microscopia óptica, quantificar os poros, porém a dimensão dos poros do WPC é quase imperceptível visualmente, o que inviabiliza essa técnica.

5.1.2 Cisalhamento

Na análise da tensão máxima de cisalhamento (Figura 58), não foram encontradas diferenças significativas entre os materiais analisados, fato que pode ser explicado, pela utilização da resina de polipropileno em ambos.

O plástico madeira (12,46 MPa) apresentou valor maior ao da madeira plástica (11,11 MPa) para a tensão de cisalhamento, apesar da fibra de vidro possuir maior resistência e rigidez que a madeira (FONSECA; DA COSTA; DIAS, 2011), esse fator pode ser explicado pela maior porosidade da MP (Figura 57) pois, tensão é a relação entre a força e a área, se diminuir a área (poros) a tensão cisalhamento será menor, além disso, os poros são concentradores de tensão, fragilizando a estrutura do material.

Figura 58- Médias das tensões máximas obtidas nos ensaios de cisalhamento da madeira plástica e do plástico madeira



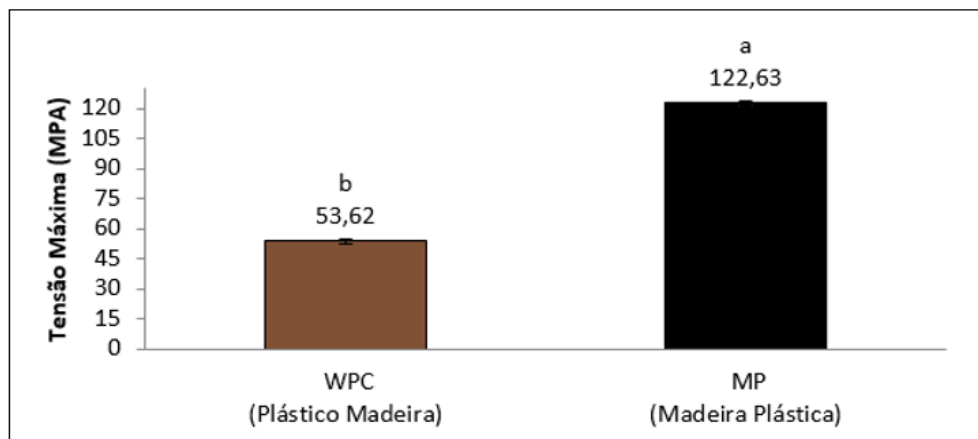
Fonte: Autoria própria

5.1.3 Dureza

A madeira plástica (122,63 MPa) apresentou valores de tensão máxima de dureza Janka, significativamente superior ao plástico madeira (53,62MPa), isso se deve a fibra de vidro presente na composição da madeira plástica, a qual possui maior resistência que a madeira (Figura 59).

As extremidades, os corpos de prova da madeira plástica (Figura 34), apresentaram valor médio de tensão máxima de dureza Janka de 53,16 MPa, essa grande variação de deve a porosidade no centro dos corpos de prova.

Figura 59- Médias das tensões máximas obtidas nos ensaios de dureza Janka da madeira plástica e do plástico madeira



Fonte: Autoria própria

5.2 ANÁLISE TÉRMICA

5.2.1 Análise Termomecânica

A partir dos resultados encontrados, pode-se observar que os perfis térmicos determinados pela técnica de TMA (Figuras A1 e A2- Apêndice A), apresentaram semelhança até a temperatura de 50°C, onde o coeficiente de expansão está próximo de $1 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Com o aumento da temperatura observa-se uma ligeira dilatação do material, porém não foi possível atingir a temperatura de transição vítrea dos materiais estudados na faixa de temperaturas avaliada.

5.2.2 Análise Termogravimétrica

Através da análise termogravimétrica (Figuras B1 e B2- Apêndice B), observa-se que as temperaturas atingidas durante a usinagem (Item 5.3.3) estão abaixo da faixa de degradação dos materiais estudados. Analisando a curva do WPC (Figuras B1 - Apêndice B), percebe-se que a perda de massa ocorre em sua grande maioria, no intervalo de temperaturas de 200°C a 500°C. Já na curva da MP (Figuras B2 -Apêndice B), observa-se que o início desse intervalo é próximo dos 300°C indo até 500°C.

A partir de 500 °C a massa residual é considerada como a porcentagem de fibras de vidro e cargas inorgânicas presente na madeira plástica, devido aos polímeros utilizados para a produção da MP terem temperaturas de degradação menores que 500 °C (MOTHÉ; DIAS;

MOTHÉ, 2009; BATALIOTTI, 2016). Portanto porcentagem é de aproximadamente de 24% de inorgânicos na madeira plástica.

Em geral, até os 200°C não houve a perda de mais de 5% da massa do material, pois até essa temperatura foi eliminado somente água e voláteis. Com isso contata-se que os processos de usinagem estudados podem ser realizados sem a preocupação de degradação térmica dos materiais.

5.3 ESTUDO DA USINAGEM

Para as variáveis de saída foi escolhida a opção menor melhor, por exemplo, para a potência quanto menor o consumo melhor. Portanto, para a análise gráfica, deve-se olhar abaixo da linha média, para determinar o melhor ajuste dos fatores.

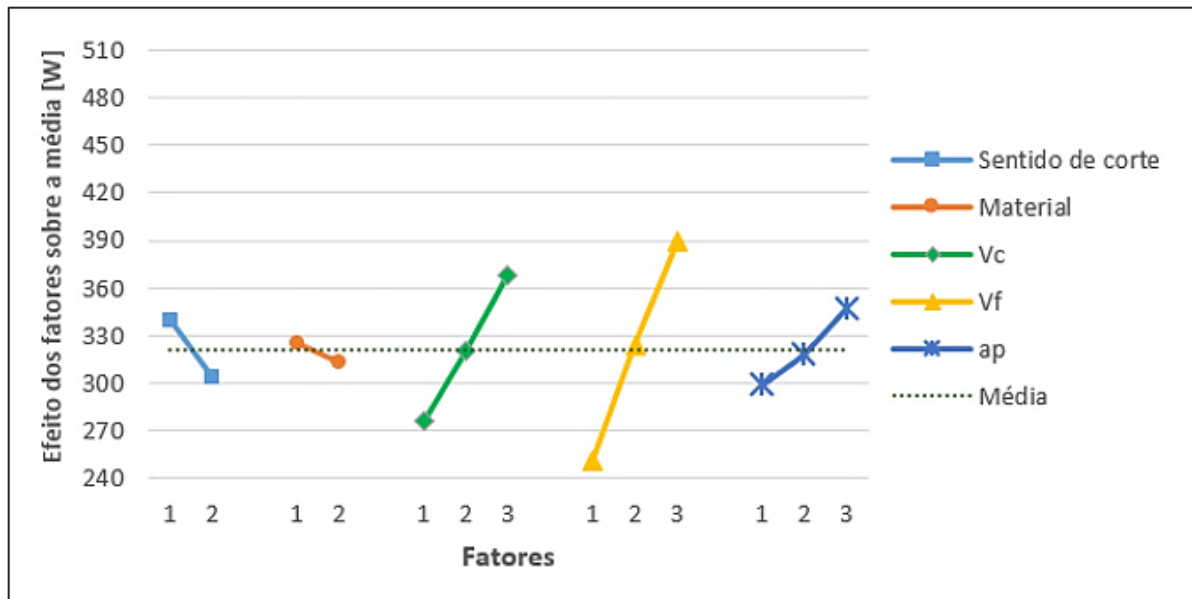
Porém deve-se atentar para aqueles fatores que estatisticamente apresentam uma diferença significativa, ou seja, nesse caso deve-se seguir o ajuste gráfico e os demais fatores, os que não possuem uma diferença estatisticamente significante, podem ser ajustados segundo critérios da indústria, em geral econômico.

5.3.1 Potência consumida

Através da análise gráfica (Figuras 60 e 61), é possível observar que o ajuste dos parâmetros de corte que proporcionou menor consumo de potência, para os processos de fresamento, foi semelhante, sendo ele: sentido de corte no nível 2 (discordante), a velocidade de corte no nível 1 (4000 rpm), a velocidade de avanço no nível 1 (3 m/mim) e a profundidade de corte no nível 1 (4 mm).

Com relação ao tipo de material usinado, houve divergência entre os processos, onde a MP foi o material que consumiu menos potência somente no processo tangencial, enquanto que para o processo de fresamento frontal foi o WPC.

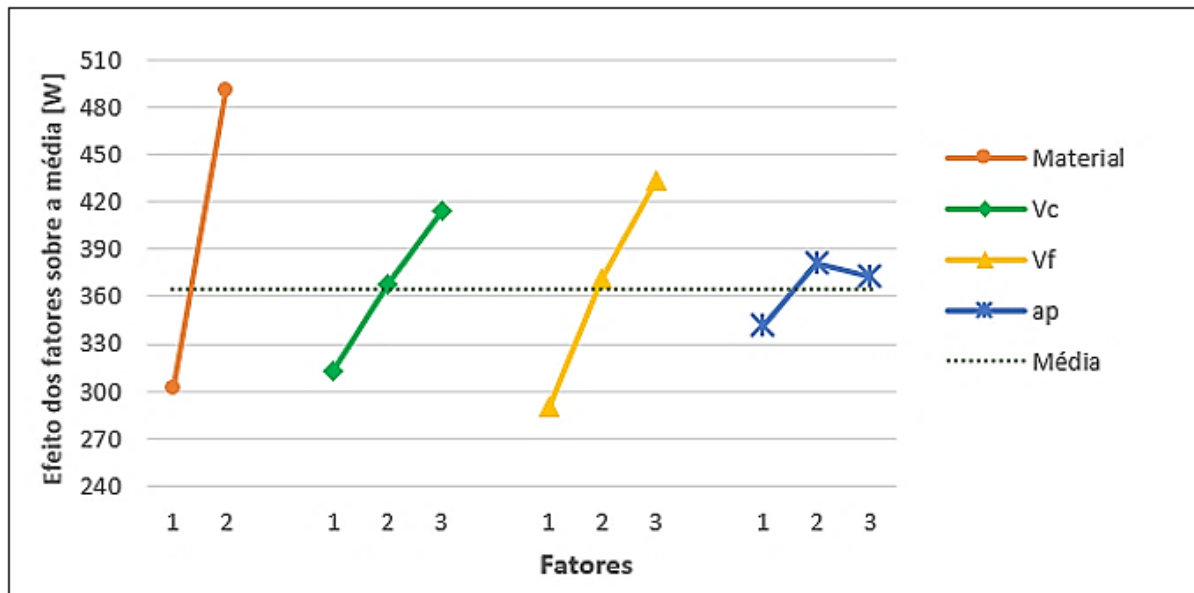
Figura 60- Gráfico do efeito dos fatores sobre a média do consumo de potência no fresamento tangencial



*Vc=Velocidade de corte; Vf= velocidade de avanço; ap= profundidade de corte.

Fonte: Autoria própria

Figura 61- Gráfico do efeito dos fatores sobre a média do consumo de potência no fresamento frontal

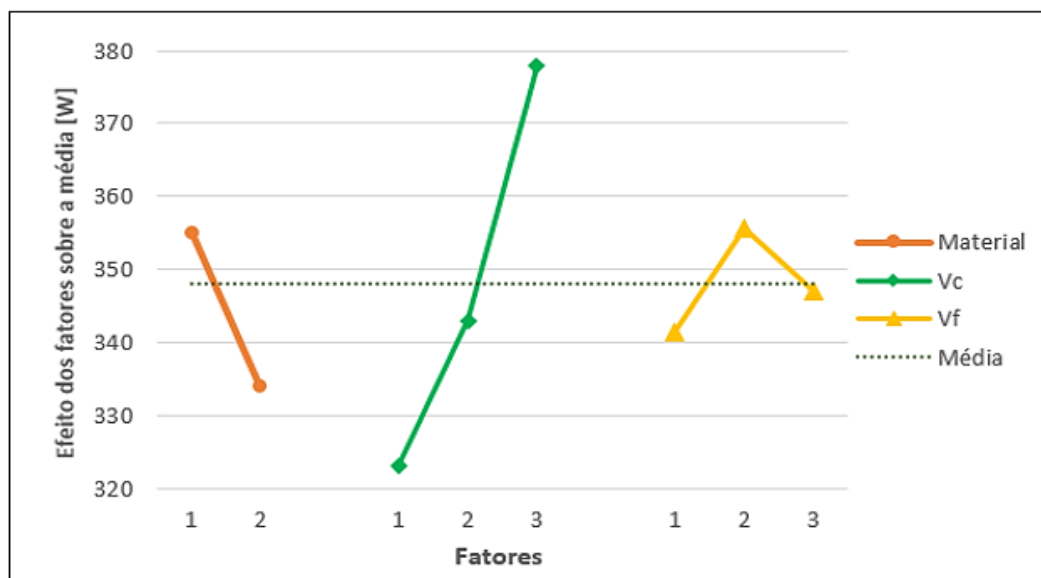


Fonte: Autoria própria

Para o processo de furação (Figura 62), o ajuste dos parâmetros de corte foi semelhante ao fresamento frontal, onde o ajuste dos fatores que proporcionaram um menor consumo de

potência foi o tipo de material no nível 2 (plástico madeira - WPC), a velocidade de corte no nível 1 (4000 rpm) e a velocidade de avanço no nível 1 (3 m/mim).

Figura 62- Gráfico do efeito dos fatores sobre a média do consumo de potência na furação



Fonte: Autoria própria

Para identificar as variáveis influentes, foram utilizados dois critérios. Inicialmente foi verificado os valores de $F_{\text{crítico}}$ na tabela de distribuição $F_{5\%}$, onde $F_{\text{calculado}} > F_{\text{crítico}}$ existe a influência significativa do fator. O segundo, foi o critério proposto por Phadke (1989), onde um $F_{\text{calculado}} > 2$ já deve ser considerado, pois isso significa que o valor obtido é no mínimo duas vezes maior que o erro.

Através da análise estatística dos processos de fresamento (Tabelas C1 e C2- Apêndice C), verificou-se que os fatores que apresentaram influência significativa, para ambos os processos, foram semelhantes, sendo eles o sentido de corte, a velocidade de corte e a velocidade de avanço. Já para o tangencial ainda teve a profundidade de corte e para o frontal o tipo de material. Para a furação os fatores significativamente influentes foram o tipo de material e a velocidade de corte (Tabela C3-Apêndice C).

Analisando cada um dos fatores e a sua influência no consumo de potência nota-se que a velocidade de corte é o único fator, que independente do processo, apresentou uma influência significativa. Isso já era esperado pois, como apresentado na Equação 2, um dos fatores a ser considerado no cálculo do consumo de potência é a velocidade de corte.

Com relação ao sentido de corte, parâmetro utilizado no processo de fresamento tangencial o melhor sentido foi o discordante, resultado já esperado pois, segundo a literatura, inicia-se com pouca espessura, acarretando em um menor esforço e conseqüentemente menor gasto de energia, ou seja, menor consumo de potência.

Analisando a velocidade de avanço e a profundidade de corte, percebe-se que os menores valores empregados foram os melhores. Isso porque ambos estão relacionados com a dimensão do cavaco gerado, ou seja, com o volume de material retirado. Sendo que, quanto menor o volume de material removido, menor a demanda de energia, conseqüentemente menor o consumo de potência (MACHADO et al., 2009).

Analisando os materiais estudados, percebeu-se que a seção de usinagem dos corpos de prova, utilizadas no processo de fresamento frontal, influenciaram no resultado final. Essa hipótese foi levantada por conta dos resultados obtidos através da análise microscópica (Figura 63), no qual observou-se que durante o processo de usinagem as fibras de vidro foram arrancadas da matriz polimérica, fazendo com que a potência necessária para a usinagem desse material fosse menor. Isso ocorreu devido à ausência de agente compatibilizante na produção da MP, o que ocasiona uma baixa interação entre a fibra e a matriz.

Figura 63- Imagem topográfica do arrancamaneto de fibras de vidro da madeira plástica



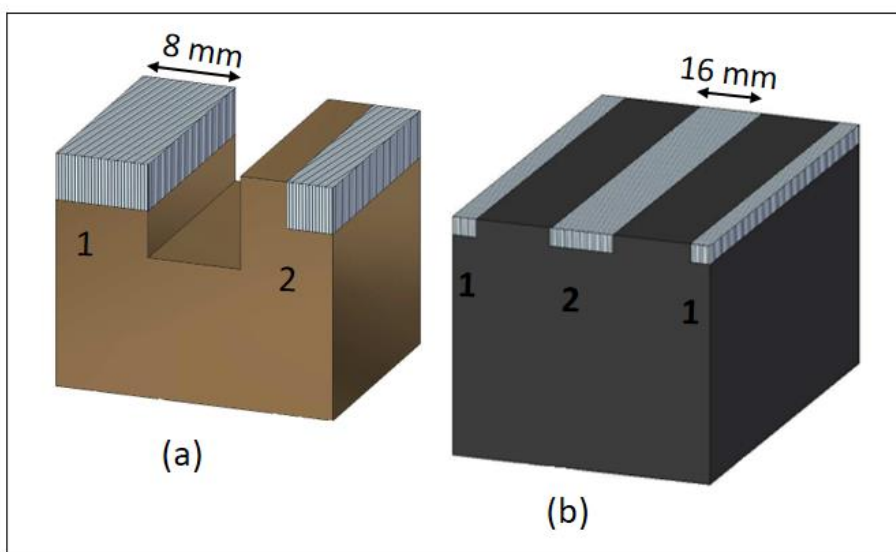
Fonte: Autoria própria

Mesmo a fibra de vidro, presente na composição da MP, apresentar maior resistência que a madeira e a MP ter apresentado maior dureza na parte usinada (Item 5.1.3) que o WPC, o

arrancamento das fibras facilitaria o corte, conseqüentemente o consumo de potência seria menor, como no fresamento tangencial.

Isso ocorreu devido às dimensões das amostras doadas (Figura 64), onde a área usinada no processo de fresamento frontal do WPC foi metade do usinado no MP, o que acarretou na retirada de um menor volume de material no plástico madeira do que na madeira plástica, conseqüentemente, o WPC obteve um menor consumo de energia.

Figura 64- Esquema de usinagem (a) plástico madeira e (b) madeira plástica



Fonte: Autoria própria

Acredita-se que se usinassem corpos de prova da mesma geometria e dimensão, o material que proporcionaria um menor consumo de potência no processo de fresamento frontal seria a madeira plástica.

Já para a furação, o tipo de material que proporcionou menor consumo de potência foi o plástico madeira, sendo que uma hipótese para o ocorrido, seja a forma dos cavacos gerados (Item 5.3.5), os quais, em sua maioria, foram na forma fragmentada, o que permite melhor eliminação do cavaco do furo e assim facilita o corte.

Comparando as médias de consumo de potência para os tipos de fresamento, pode-se observar que o fresamento tangencial consumiu menor potência (Tabela 7). Isso é devido ao fato de que no fresamento tangencial a área de contato da fresa com a amostra é menor, do que no fresamento frontal.

Tabela 7- Valores médios de consumo de potência para os processos de usinagem

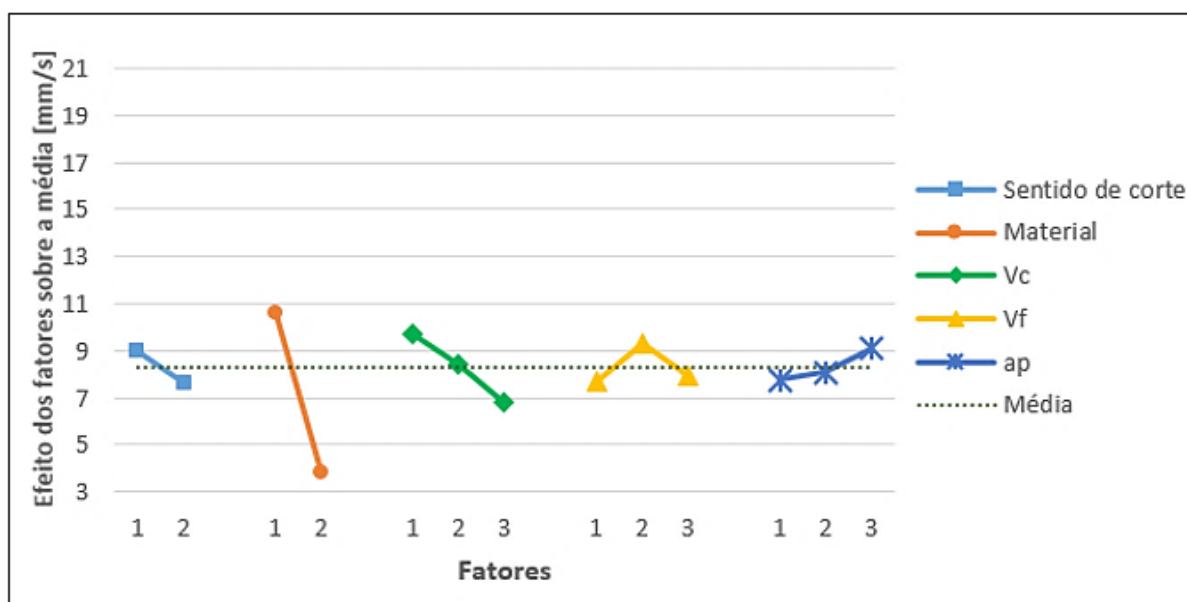
Processo	Potência [W]
Fresamento Tangencial	321,29
Fresamento Frontal	365,05
Furação	347,95

5.3.2 Vibração

Analisando graficamente (Figuras 65 e 66), observa-se que o ajuste dos parâmetros de corte que proporcionou menor vibração média do sistema, para os processos de fresamento estudados, foi semelhante sendo ele: sentido de corte no nível 2 (discordante), o tipo de material no nível 2 (madeira plástica-MP), a velocidade de avanço no nível 1(3 m/mim) e a profundidade de corte no nível 1(4 mm).

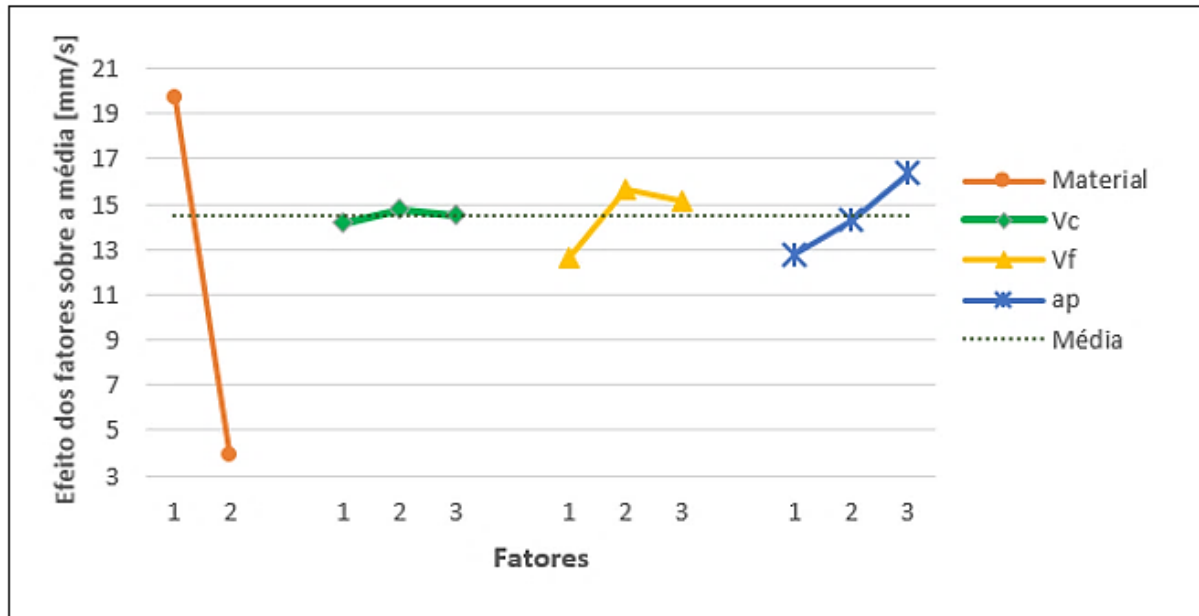
Com relação a velocidade de corte empregada, houve divergência entre os processos, sendo que para o fresamento tangencial a melhor velocidade foi de 8000 rpm, enquanto que para o fresamento frontal a melhor velocidade foi de 4000 rpm.

Figura 65- Gráfico do efeito dos fatores sobre a média da vibração no fresamento tangencial



Fonte: Autoria própria

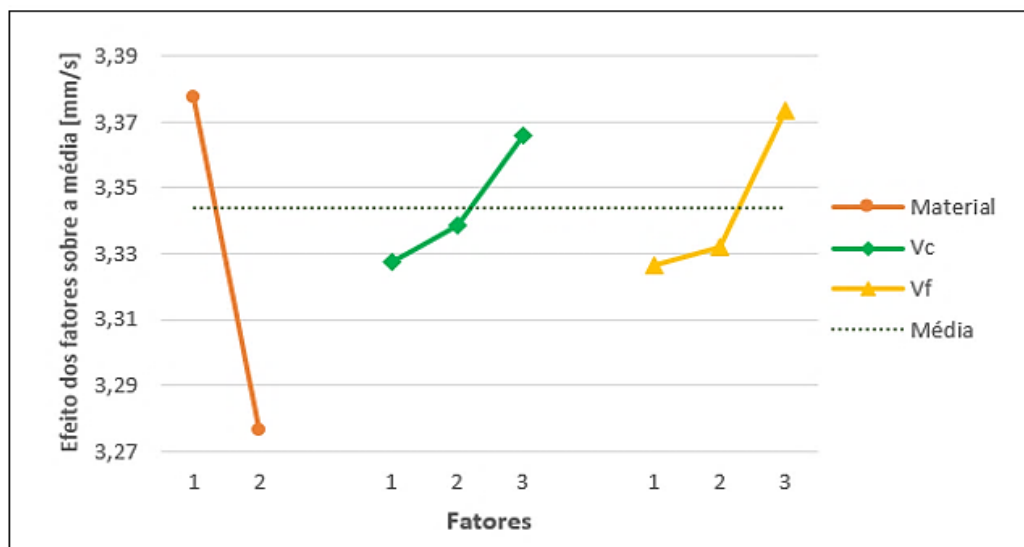
Figura 66- Gráfico do efeito dos fatores sobre a média da vibração no fresamento frontal



Fonte: Autoria própria

Para o processo de furação (Figura 67), o ajuste que proporcionou menor vibração média do sistema durante a usinagem, foi o material no nível 2 (plástico madeira -WPC), a velocidade de corte no nível 1 (4000 rpm) e a velocidade de avanço no nível 1(3 m/mim).

Figura 67- Gráfico do efeito dos fatores sobre a média da vibração na furação



Fonte: Autoria própria

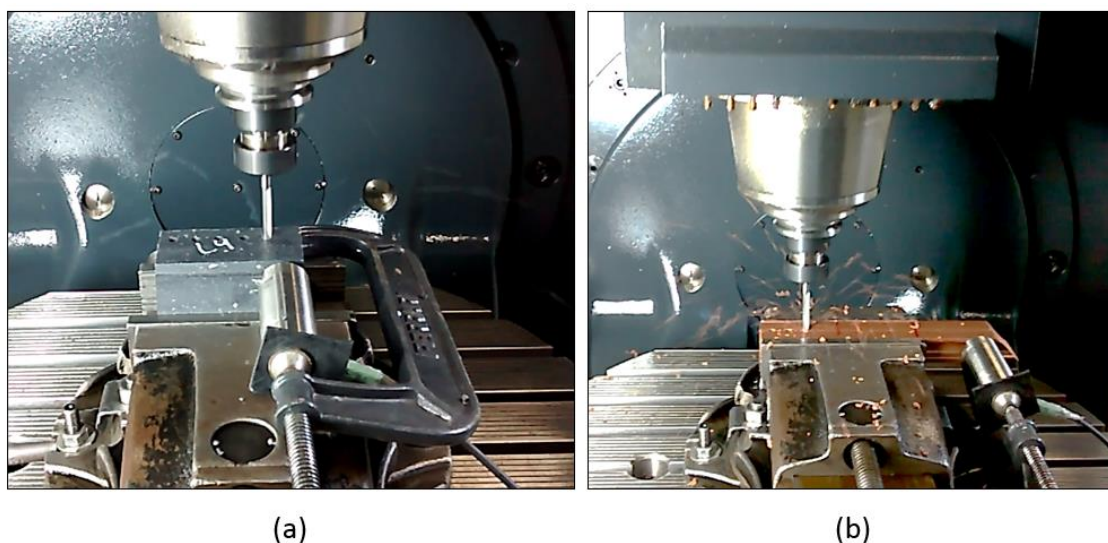
Através da análise estatística dos processos de fresamento (Tabelas D1 e D2 - Apêndice D), verificou-se que o único fator semelhante entre os processos, estatisticamente significativo, foi o tipo de material. Para o fresamento tangencial ainda houve o sentido de corte e a velocidade de corte e para o fresamento frontal houve a velocidade de avanço. Para a furação os fatores significativamente influentes foram o tipo de material e a velocidade de avanço (Tabela D3- Apêndice D).

Analisando cada um dos fatores e a sua influência na vibração do sistema nota-se que o tipo de material que apresentou melhores resultados, para os processos de fresamento, foi a madeira plástica, cuja hipótese para esse fato, é devido ao arrancamento das fibras, bem como uma menor densidade e maior porosidade, o que ajudaria na absorção do impacto.

Já na furação, o material que apresentou menor vibração do sistema foi o WPC. As hipóteses para esse resultado são a posição de acoplamento do sensor piezelétrico e a geometria da amostra usinada. Acredita-se que essa combinação tenha prejudicado na captação dos dados de vibração.

Na Figura 68 são apresentadas as posições de acoplamento do sensor piezelétrico em ambos os materiais estudados. Nota-se que no WPC o sensor está distante do suporte (morsa) da mesa, bem como fora da área de usinagem.

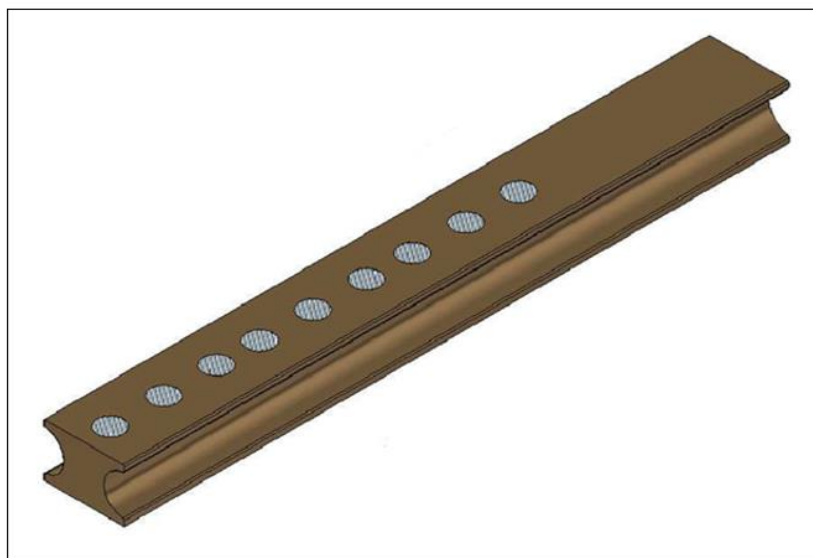
Figura 68- Corpos de prova de furação (a) madeira plástica e (b) plástico madeira



Fonte: Autoria própria

Na Figura 69 é apresentado o esquema do processo de furação, no qual é possível observar que a lateral da amostra de WPC é côncava e com isso o contato do sensor com a amostra ocorreu somente nas extremidades.

Figura 69- Esquema do processo de furação



Fonte: Autoria própria

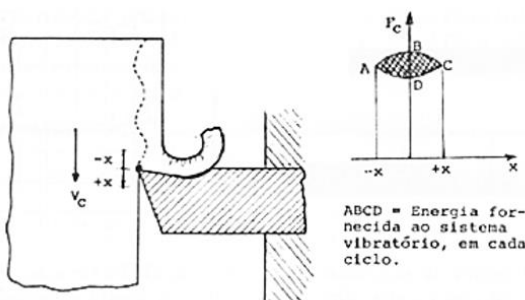
Com relação ao sentido de corte, assim como no consumo de potência, o sentido discordante proporcionou uma menor vibração do sistema, durante os processos de fresamento tangencial. Em geral, o sentido discordante gera maiores vibrações, devido à alternância da componente vertical da força de usinagem (ora empurra a amostra contra a mesa e ora tentar arrancar a amostra da mesa). Porém outro fator é o comprimento de cada amostra, que nesse estudo não eram longas e eram bem fixadas, o que atenua o efeito das forças geradas.

Com relação a velocidades avanço e profundidade de corte, apesar de não serem fatores significantes na maioria dos processos, observou-se que os menores valores empregados proporcionaram uma menor vibração do sistema durante a usinagem. Esses resultados já eram esperados, pois assim como uma baixa profundidade de corte, uma baixa velocidade de avanço proporciona a retirada de um menor volume de material (cavaco), evitando que haja grandes oscilação da ferramenta (MACHADO et al., 2009).

Já para a velocidade de corte as altas taxas proporcionam a diminuição da seção transversal de corte o que diminui a vibração (quando usando avanço em mm/min). Segundo

Stemmer (1993) com a diminuição da velocidade de corte há a diminuição da força de corte, o que acarreta no aumento das vibrações. De acordo com o autor a ferramenta ao tocar em um ponto mais duro do material, é forçada a fletir para baixo de sua posição de equilíbrio, iniciando assim a vibração, ou seja, ao descer a ferramenta causa a redução da velocidade de corte e conseqüentemente um aumento da força de deflexão (Figura 70). A ferramenta como um sistema vibratório recebe energia em cada ciclo (volta), aumentando progressivamente a amplitude até que se estabelece um equilíbrio entre a energia oferecida ao sistema e a distribuída por amortecimento. O autor conclui que em altas velocidades de corte há o desaparecimento das causas das vibrações.

Figura 70- Ponto duro inicializa a vibração num sistema dinamicamente instável



Fonte: Stemmer (1993)

Porém esse fato ocorreu somente para o fresamento tangencial. Já para o fresamento frontal e para a furação, a menor velocidade de corte estudada proporcionou menor vibração, uma hipótese para esse fato, é que para alguns processos o aumento da velocidade de corte pode acarretar no aumento das vibrações pois, o aumento da velocidade de corte, obtida por meio da elevação da rotação do eixo-árvore, pode atingir valores nos quais as vibrações prejudicam o acabamento, dependendo do processo empregado (MACHADO et al., 2009).

Comparando as médias da vibração para os tipos de fresamento, pode-se observar que o fresamento tangencial proporcionou uma menor vibração do que o fresamento frontal (Tabela 8). Isso se deve ao fato que no fresamento frontal o volume de material retirado é maior que no tangencial, além disso a medida de que a fresa gira ela empurra e puxa a amostra, já no tangencial a fresa empurra ou puxa dependendo do sentido (concordante ou discordante).

Tabela 8- Valores médios vibração ocorrido durante os processos de usinagem

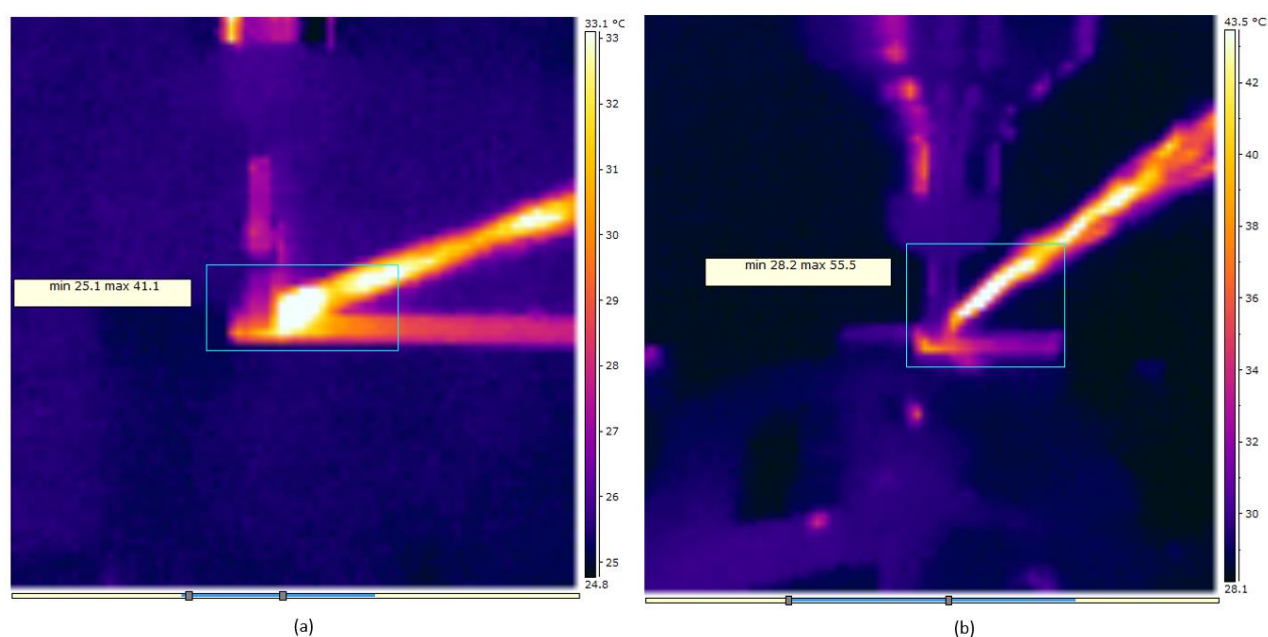
Processo	Vibração [mm/s]
Fresamento Tangencial	8,31
Fresamento Frontal	14,48
Furação	3,34

5.3.3 Aquecimento das peças durante a usinagem

Pode-se observar nas fotos térmicas dos processos de fresamento tangencial (Figura 71a) e frontal (Figura 71b) o valor mínimo e máximo para cada processo.

Devido ao fato da temperatura desenvolvida nas operações de usinagem ser um fator que pode influenciar no desgaste as ferramentas, na precisão do maquinário, na qualidade superficial e na dimensão das amostras usinadas, para esse estudo foi utilizada a máxima temperatura de aquecimento que as amostras atingiram.

Figura 71- Foto térmica dos processos (a) tangencial e (b) frontal



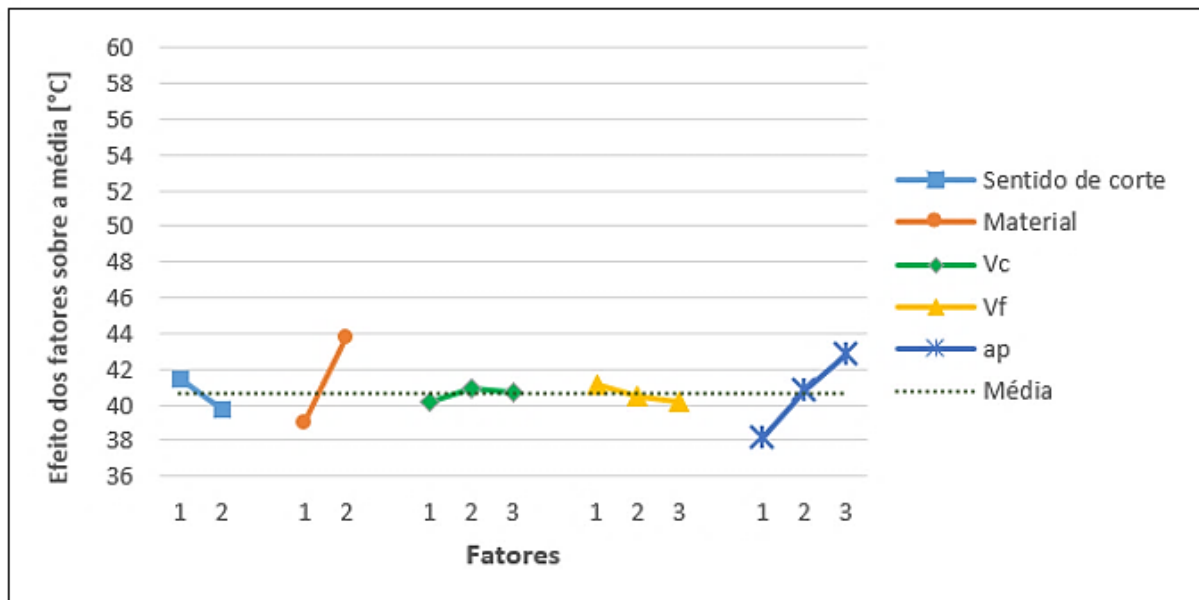
Fonte: Autoria própria

Através da análise gráfica (Figuras 72 e 73), é possível observar que o ajuste dos parâmetros de corte que proporcionou a menor taxa de aquecimento nas amostras durante os processos de fresamento, não foram semelhantes, como ocorreu na potência e na vibração. Os

únicos fatores que tiveram o ajuste igual foram o tipo de material no nível 1 (plástico madeira-WPC) e a velocidade de avanço no nível 3 (7 m/mim).

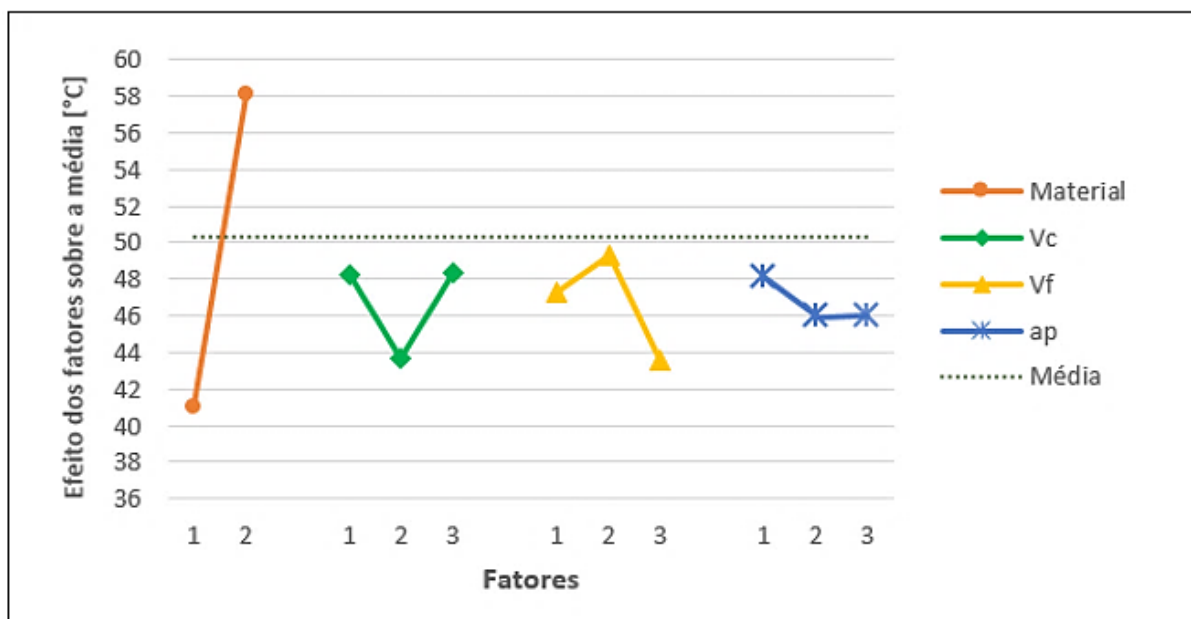
Para o fresamento tangencial (Figura 72) o ajuste dos outros fatores foi o sentido de corte no nível 2 (discordante), velocidade de corte no nível 1 (4000 rpm), e profundidade de corte no nível 1(4 mm). Já para o fresamento frontal (Figura 73) foi o sentido de corte no nível 1 (concordante), velocidade de corte no nível 2 (6000 rpm) e profundidade de corte no nível 2 (5 mm).

Figura 72- Gráfico do efeito dos fatores sobre a média do aquecimento das amostras durante o processo de fresamento tangencial



Fonte: Autoria própria

Figura 73- Gráfico do efeito dos fatores sobre a média do aquecimento das amostras durante o processo de fresamento frontal



Fonte: Autoria própria

Através da análise estatística dos processos de fresamento (Tabelas E1 e E2- Apêndice E), verificou-se que o único fator que apresentou influência significativa, para ambos os processos, foi o tipo de material usinado. No fresamento tangencial ainda teve a profundidade de corte e no fresamento frontal a velocidade de avanço.

Analisando cada um dos fatores e a sua influência no aquecimento das amostras durante o processo de usinagem, nota-se que o tipo de material que apresentou melhores resultados, foi o WPC, o qual contém farinha de madeira foi o propiciou menor aquecimento nas amostras, isso se deve ao alto valor do calor específico que a madeira possui, ou seja, a madeira necessita de maior energia que outros materiais para aquecer.

A velocidade de avanço que proporcionou menor aquecimento nas amostras foi a maior estudada (7m/min). Uma hipótese para essa ocorrência é que se a fresa avançar com maior velocidade, o tempo de contato entre a amostra e a ferramenta será menor, consequentemente o tempo de atrito será menor e a geração de calor menor.

Segundo a literatura os fatores que mais influenciam no aquecimento das amostras durante a usinagem são a velocidade e a profundidade de corte, pois com uma maior rotação do

fuso, bem quanto mais a fresa penetra na amostra, maior será o contato da ferramenta com o material usinado. Se considerar o mesmo par ferramenta/peça, a quantidade de calor gerada na usinagem aumenta diretamente com a velocidade de corte e com a força de corte (principal componente da força de usinagem). Como a força de corte é proporcional ao avanço e à profundidade de corte, pode-se afirmar que, para uma maior produtividade na operação de usinagem, devem ser aumentados a velocidade, o avanço e a profundidade de corte. Todavia, esse aumento deve ser limitado, porque haverá ao mesmo tempo, acréscimo da temperatura, e esta, por sua vez, altera as propriedades mecânicas da ferramenta, que se desgasta rapidamente, o que reduz de maneira drástica a sua produtividade (MACHADO et al., 2009).

Comparando as médias do aquecimento das amostras durante a usinagem para o processo de fresamento, pode-se observar que o fresamento tangencial proporcionou um menor aquecimento do que o frontal (Tabela 9). Isso pode ser devido ao fato de que no fresamento tangencial a área de contato da fresa com a amostra é menor do que no fresamento frontal, ou seja, durante no fresamento frontal a fresa cria um rasgo na amostra tendo metade do diâmetro em contato com a amostra, já no tangencial a área de contato é a profundidade utilizada, sendo esta menor que o diâmetro da fresa.

Tabela 9- Valores médios do aquecimento das amostras durante os processos de usinagem

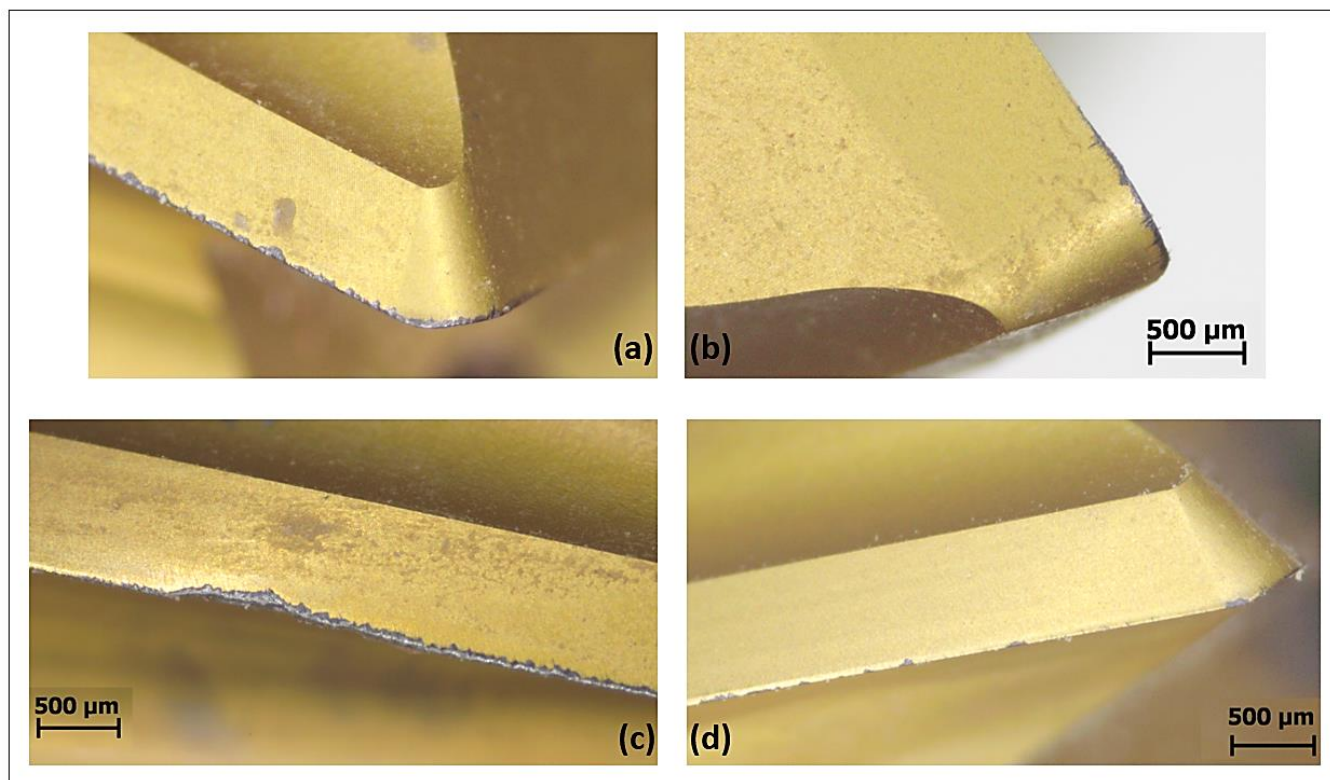
Processo	Temperatura [°C]
Fresamento Tangencial	40,60
Fresamento Frontal	50,28

5.3.4 Desgaste e avaria das ferramentas de corte

5.3.4.1 Fresamento

A usinagem tanto do plástico madeira como da madeira plástica acarretou no desgaste de flanco (Figura 74) bem como na avaria do tipo lascamento (Figura 74c), o qual ocorreu em maior quantidade.

Figura 74- Desgastes e avarias ocorridos das fresas (a; c; d) lascamento e (b) desgaste de flanco



Fonte: Autoria própria

Apesar de ter havido a ocorrência de desgaste nas fresas foi muito pouco ($VB_{\text{máximo}} < 0,12$), isso se deve a pequena quantidade de material usinado no estudo.

Na Tabela 10 são apresentados os valores obtido para o desgaste de flanco ($VB_{\text{máximo}}$) e para o comprimento de corte.

Tabela 10- Média do $VB_{\text{máximo}}$ e comprimento de corte para o processo de fresamento

Material	Modalidade	Média do $VB_{\text{máximo}}$ (mm)	Comprimento de corte (mm)	Comprimento de corte (m)	$VB_{\text{máx.}} \div \text{Comp. de corte}$
WPC	Tangencial	0,118	796.137,24	796,14	$1,5 \times 10^{-7}$
	Frontal	0,073	1.973.076,68	1.973,08	$0,4 \times 10^{-7}$
MP	Tangencial	0,064	24.849,19	24,84	26×10^{-7}
	Frontal	0,034	64.030,63	64,03	$5,3 \times 10^{-7}$

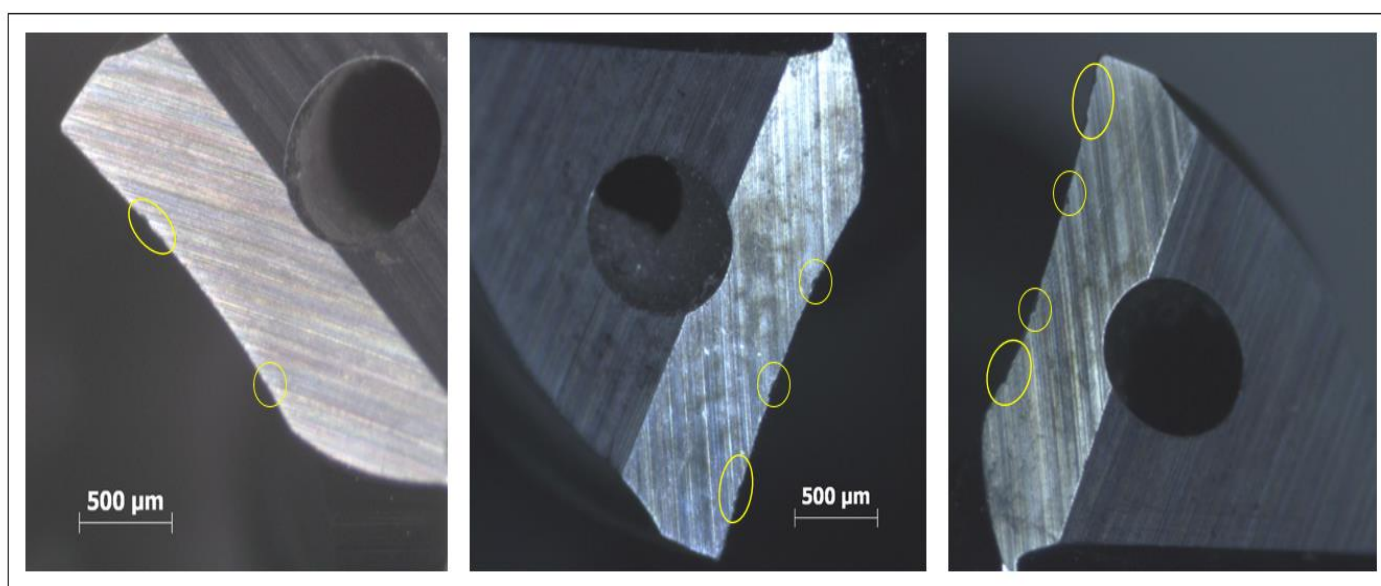
Através da relação do VB com o comprimento de corte, é possível observar que os maiores desgastes ocorreram nas ferramentas utilizadas na usinagem da madeira plástica e que o fresamento tangencial foi o processo que mais desgastou as ferramentas.

Com relação ao material, o fato das fibras de vidro estarem sendo arrancada da matriz polimérica só facilitaria o processo de usinagem em si, pois as fibras de vidro são mais danosas a ferramenta de corte que a madeira, pois apesar de ambos possuírem sílica (fibra de vidro e madeira) a quantidade de ambos é diferente sendo superior na fibra de vidro.

5.3.4.2 Furação

No processo de furação, ocorreu somente pequenos lascamentos nas brocas (Figura 75).

Figura 75- Avaria ocorrida nas brocas



Fonte: Autoria própria

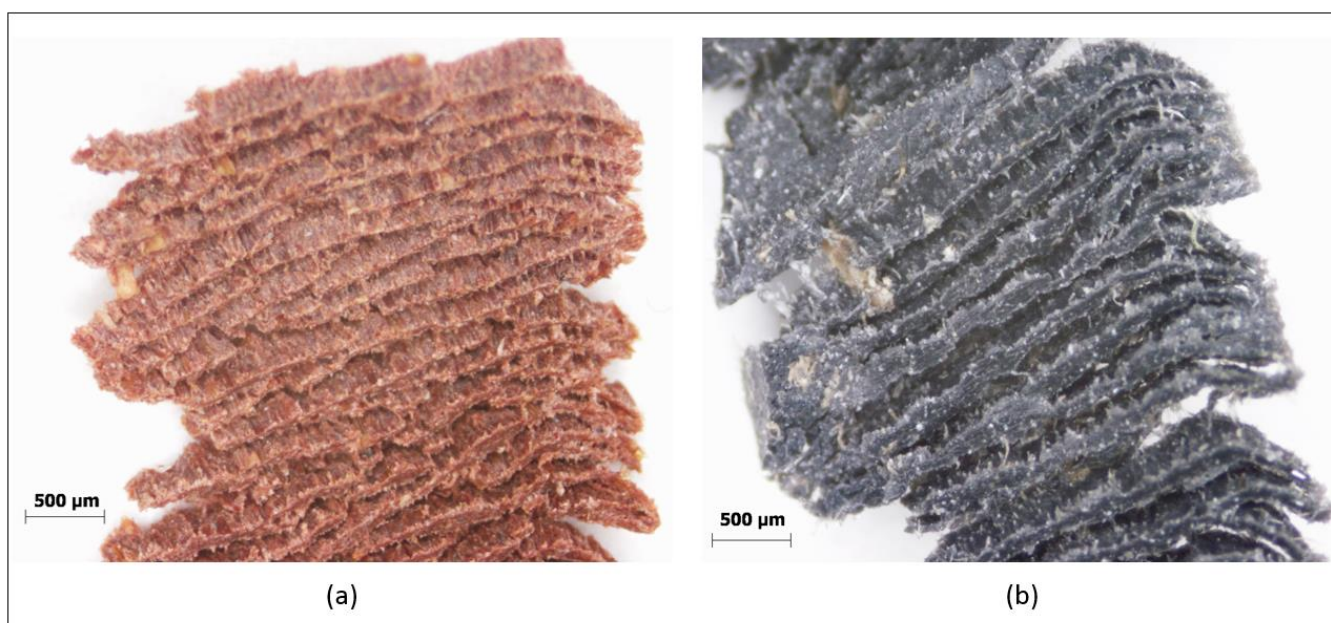
Devido ao pequeno número de ensaios não houve um desgaste acentuado que pudesse ser mensurado, portanto não pode ser realizada a análise quantitativa do desgaste das brocas.

Analisando o comprimento de corte de cada uma das brocas, obteve-se que a broca utilizada no plástico madeira usinou 848.344,69 mm, enquanto que a utilizada na madeira plástica usinou 1.494.763,89 mm.

5.3.5 Tipos e formas de cavacos

Através da análise dos cavacos gerados pelo processo de fresamento observou-se que em geral foram obtidos cavacos de cisalhamento (Figura 76a) para a madeira plástica e lamelar/segmentado (Figura 76b) para o plástico madeira. Já na furação do plástico madeira o tipo de cavaco foi o lamelar e para a madeira plástica está entre o lamelar e o de cisalhamento.

Figura 76- Tipos de cavacos (a) WPC-lamelar e (b) MP -cisalhamento

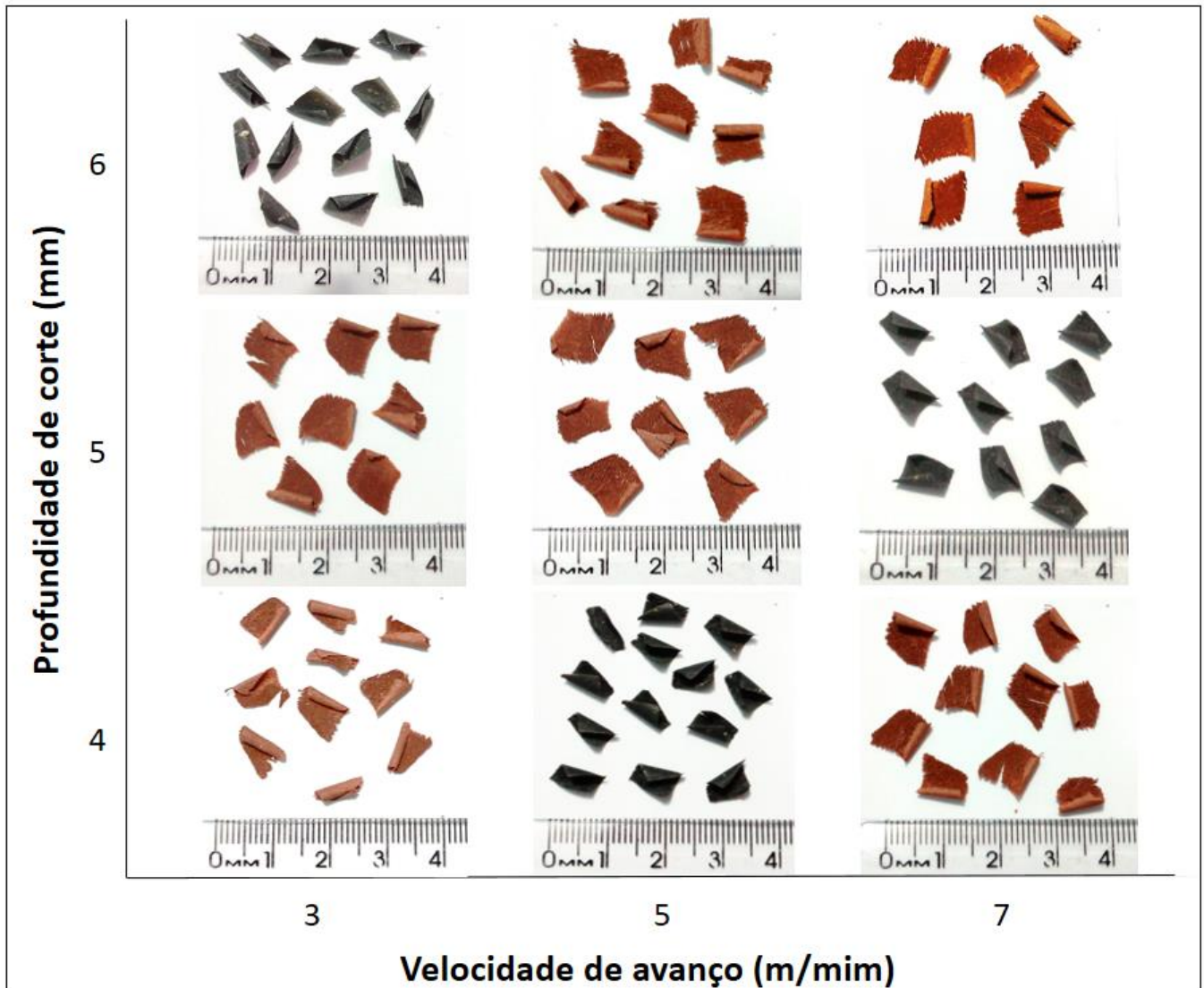


Fonte: Autoria Própria

Os formatos obtidos nos três processos estudados foram os mais diversos e nem sempre classificados pela ISO 3685:1993. São apresentadas nas Figuras de 77 a 82 as formas de cavacos gerados em função da profundidade de corte e do avanço empregados. Não foi observado um padrão nos cavacos gerados.

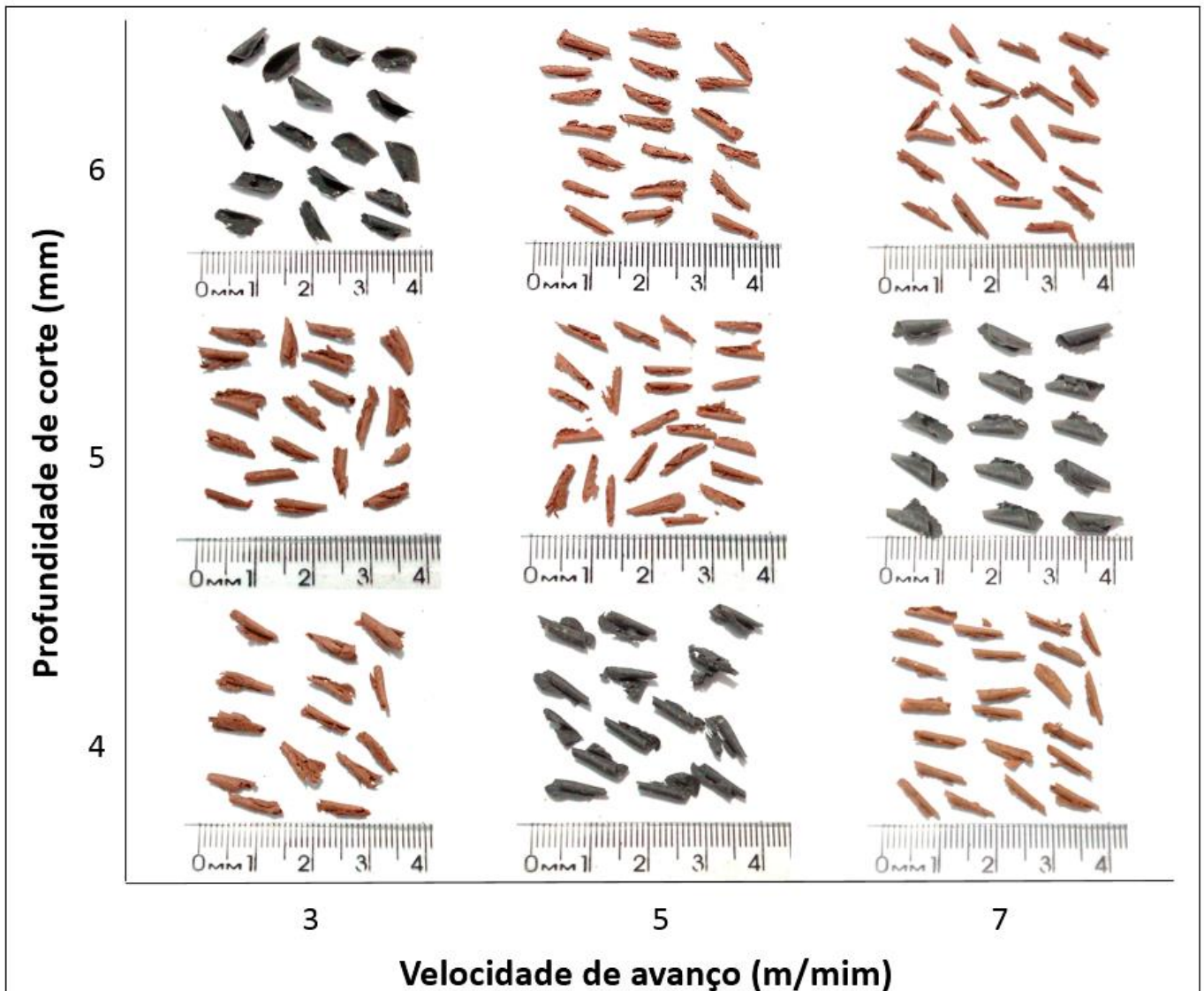
Para o processo de fresamento tangencial obteve-se o meio-fragmentado para o sentido concordante (Figura 77) e o agulha tubular para o discordante (Figura 78). Observa-se que os cavacos gerados pelo sentido discordante, foram mais “enrolados” que os do sentido concordante.

Figura 77- Gráfico da influência da velocidade avanço e da profundidade de corte na formação do cavaco no processo de fresamento tangencial no sentido de corte concordante



Fonte: Autoria própria

Figura 78- Gráfico da influência da velocidade avanço e da profundidade de corte na formação do cavaco no processo de fresamento tangencial no sentido de corte discordante

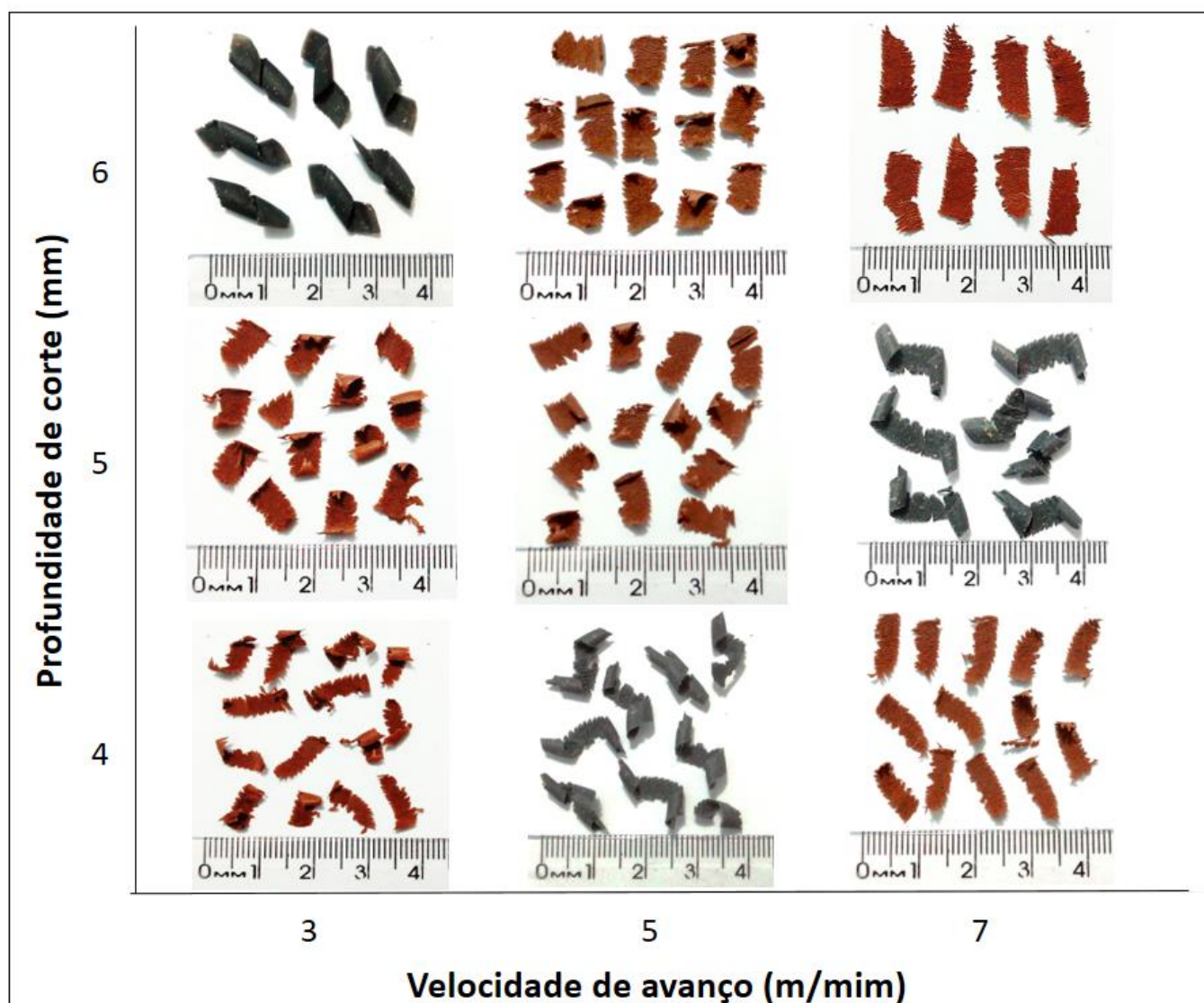


Fonte: Autoria própria

No fresamento frontal só houve diferença entre os sentidos de corte para o plástico madeira, pois na madeira plástica o corte foi realizado em cheio, ou seja, o rasgo foi realizado com o diâmetro total da fresa, já no WPC, foi realizado um corte mais concordante ou mais discordante.

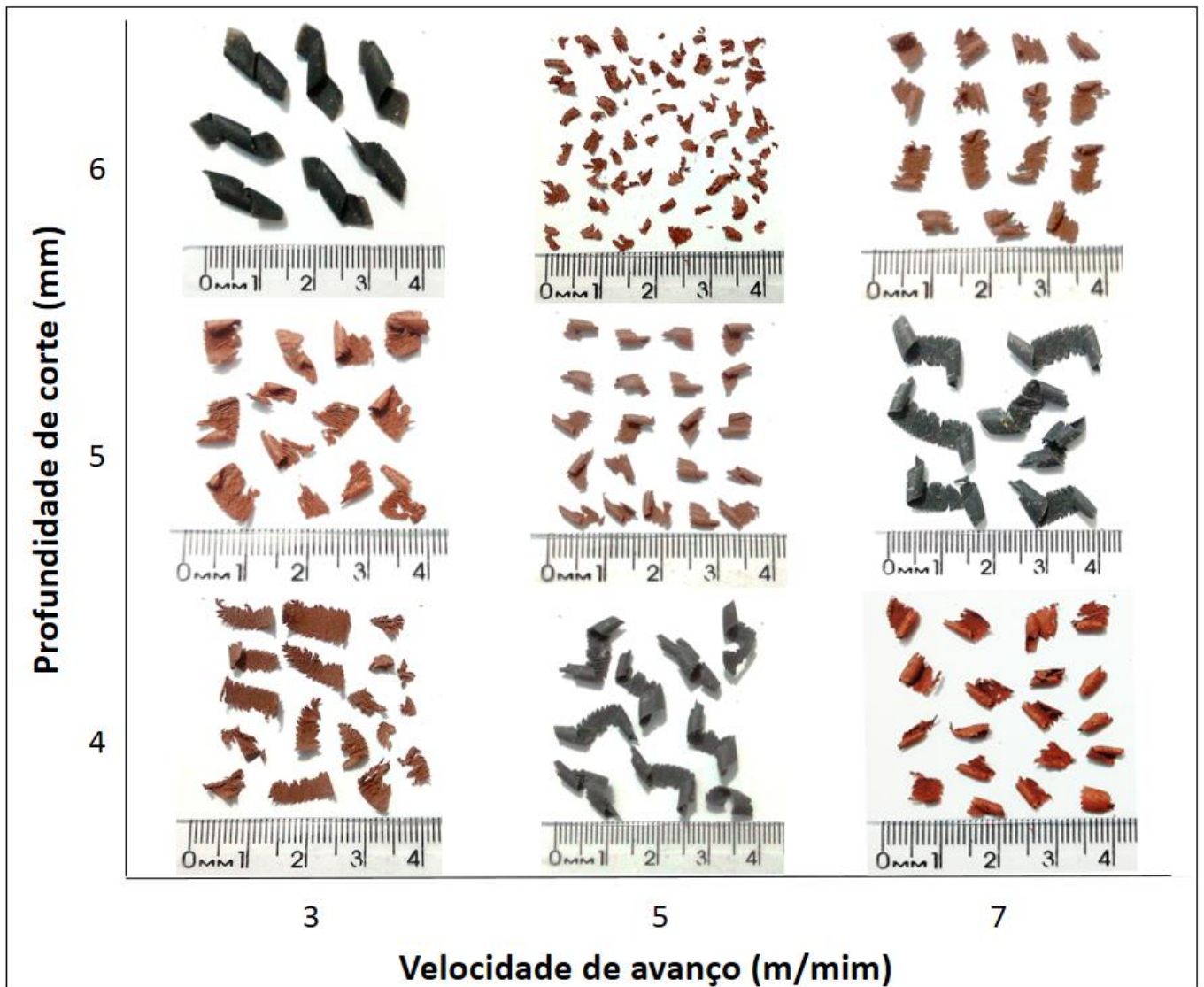
Para a madeira plástica foram obtidos os formatos helicoidal curto e fita curta. Já para o plástico madeira obteve-se o fita curta e meio fragmentado para o sentido concordante (Figura 79) e para o sentido discordante obtiveram-se o agulha cônica e o fragmentado (Figura 80).

Figura 79- Gráfico da influência da velocidade avanço e da profundidade de corte na formação do cavaco no processo de fresamento frontal no sentido de corte concordante para o WPC



Fonte: Autoria própria

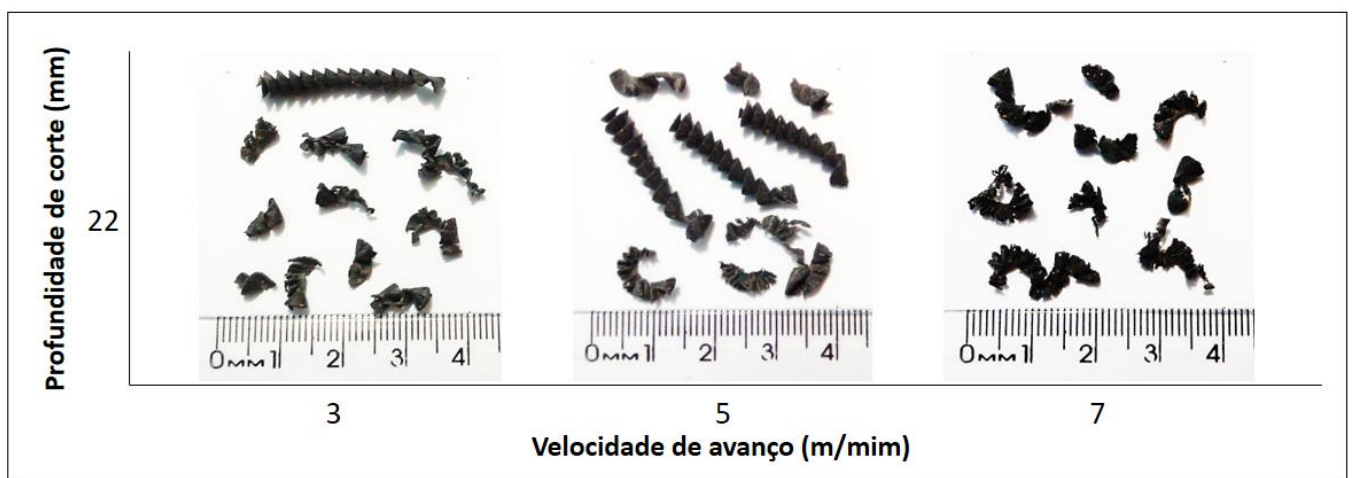
Figura 80- Gráfico da influência da velocidade avanço e da profundidade de corte na formação do cavaco no processo de fresamento frontal no sentido de corte disconcordante para o WPC



Fonte: Autoria própria

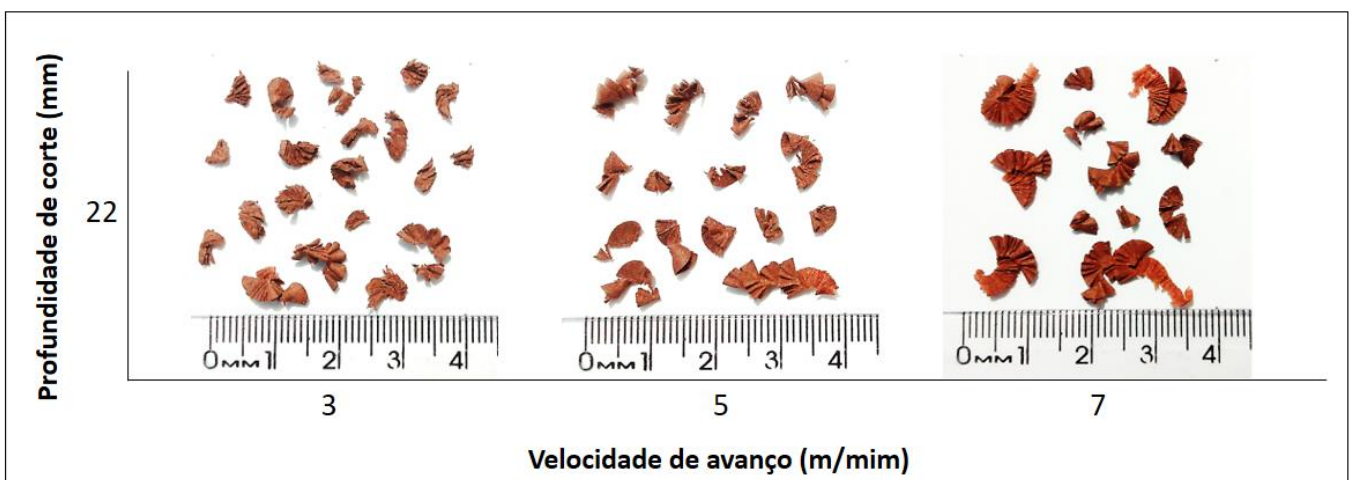
No processo de furação (Figuras 81 e 82) obtiveram-se os formatos helicoidal, fragmentado e sanfonado. Comparando as formas de cavaco obtidas na furação, para os dois materiais, com a literatura, constatou-se que, ambos os materiais geraram cavacos de fácil eliminação, pois Kalpakjian e Schmid (2009) e Diniz, Marcondes e Coppini (2013) citam que se o cavaco formado tiver a forma de fita, será complicado extraí-lo, cavacos helicoidais ou em lascas são os que podem ser mais facilmente removidos dos furos.

Figura 81- Gráfico da influência da velocidade avanço e da profundidade de corte na formação do cavaco no processo de furação para a madeira plástica



Fonte: Autoria própria


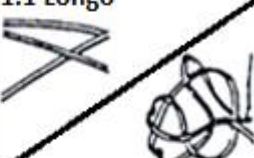
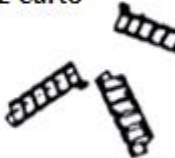




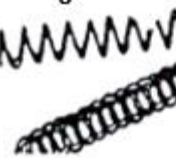
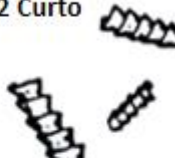





Figura 82- Gráfico da influência da velocidade avanço e da profundidade de corte na formação do cavaco no processo de furação para o plástico madeira



Fonte: Autoria própria

Comparando as formas dos cavacos obtidos como a classificação realizada por Shaw (2005), entre cavacos favoráveis e desfavoráveis (Figura 83), nota-se que todos os processos estudados geraram cavacos favoráveis, independentemente de seu formato.

Figura 83- Classificação dos cavacos entre favoráveis e desfavoráveis

Curvatura		Favorável	Desfavorável
Reto	1 Cavaco em fita	1.2 Curto 	1.1 Longo 
	2 Cavaco tubular	2.2 Curto 	2.1 Longo 
Curvado acima	3 Cavaco em espiral		3.1 Plano  3.2 Cônico 
	4 Cavaco tipo arruela	4.2 Curto 	4.1 Longo 
Curvado para o lado	5 Cavaco helicoidal cônico	5.2 Curto 	5.1 Longo 
	6 Cavaco em Arco	6.2 Solto  6.1 Con. 	
	7-8 Cavaco rompido naturalmente	7 Fragmentado 	8 Agulha 

Fonte: Adaptado de Shaw (2005)


Em geral, tem -se que o fator de empacotamento varia entre 3 e 4 para cavacos lascas ou pedaços e de 50 para cima são cavacos longos. Porém nesse estudo foram obtidos valores variando entre 3 e 18 (Tabela 11).

Através dos resultados obtidos constatou-se que, tanto para o fresamento como para a furação o fator de empacotamento foi menor que 20, portanto são considerados como lascas ou pedaços. Fato esse que é possível verificar através dos gráficos de profundidade de corte em função da velocidade de avanço (Figuras 77 a 82).

Em geral, quanto menor o fator de empacotamento melhor, pois isso significa que menor será o espaço necessário para armazená-los.

Tabela 11: Fator de empacotamento dos cavacos gerados para cada experimento das matrizes ortogonais L18 e L9 de Taguchi

Exp.	Processos		
	F. Tangencial	F. Frontal	Furação
1	11,30	9,56	6,54
2	12,02	9,56	6,54
3	12,56	10,82	9,45
4	13,89	8,17	4,97
5	12,40	9,39	6,47
6	13,35	9,75	12,89
7	8,11	9,52	6,85
8	8,87	10,15	7,68
9	13,41	17,09	11,47
10	6,89	4,24	-
11	8,29	8,34	-
12	9,10	8,66	-
13	6,23	5,48	-
14	7,07	3,79	-
15	10,03	9,27	-
16	4,94	10,25	-
17	11,88	12,30	-
18	10,74	13,44	-

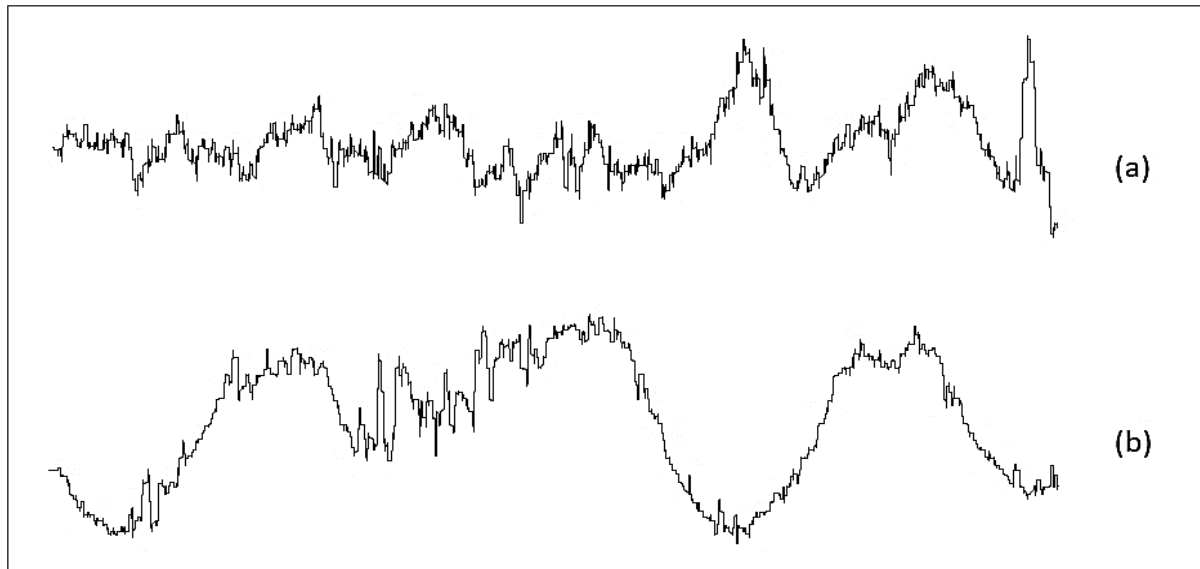


5.3.6 Integridade superficial

5.3.6.1 Rugosidade

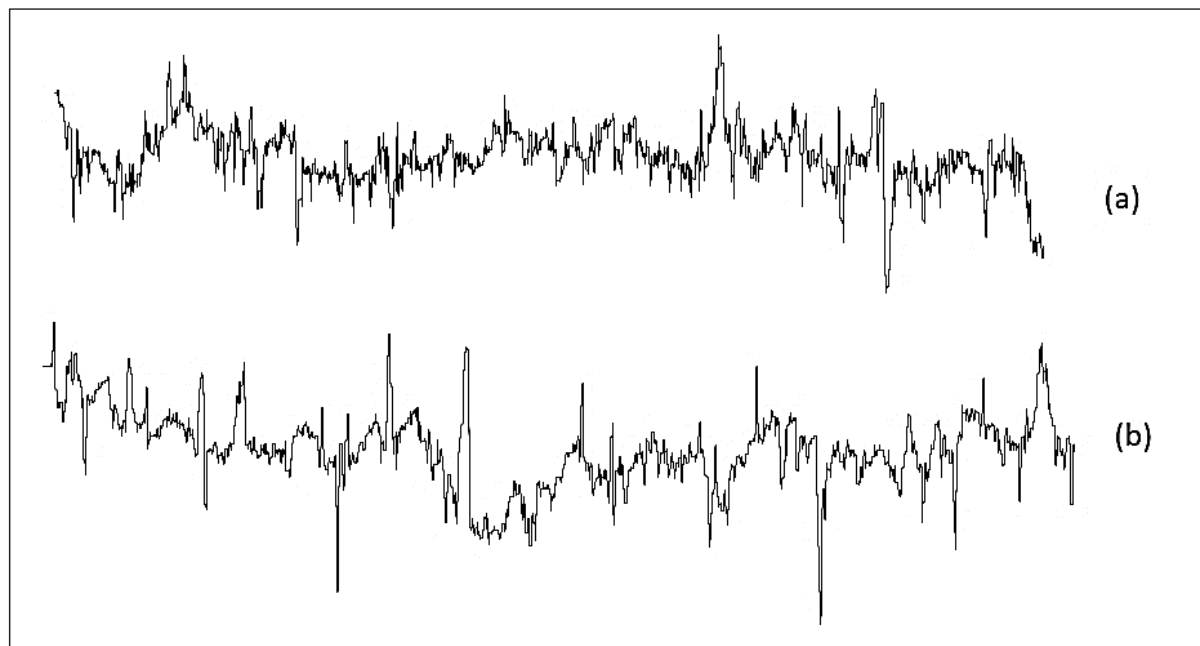
Nas de Figuras 84 e 86 são apresentados os perfis de rugosidades obtidos durante a determinação da rugosidade, por meio do rugosímetro, para cada um dos processos estudados.

Figura 84- Perfil de rugosidade do fresamento tangencial (a) WPC e (b) MP



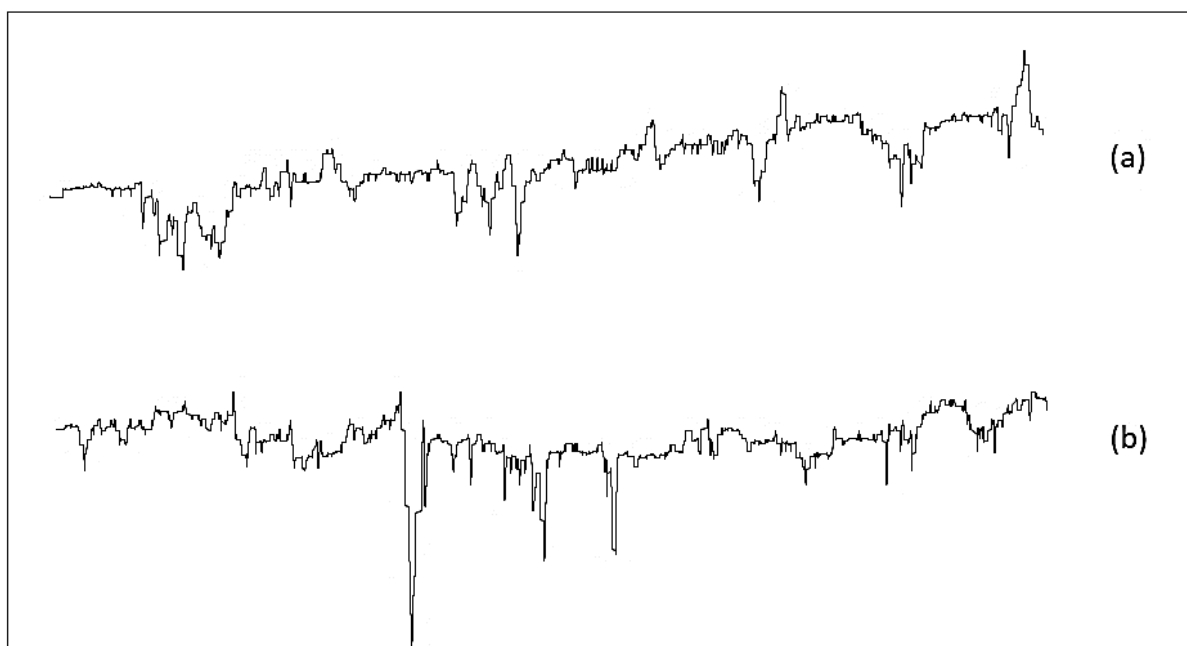
Fonte: Autoria própria

Figura 85- Perfil de rugosidade do fresamento frontal (a) WPC e (b) MP



Fonte: Autoria própria

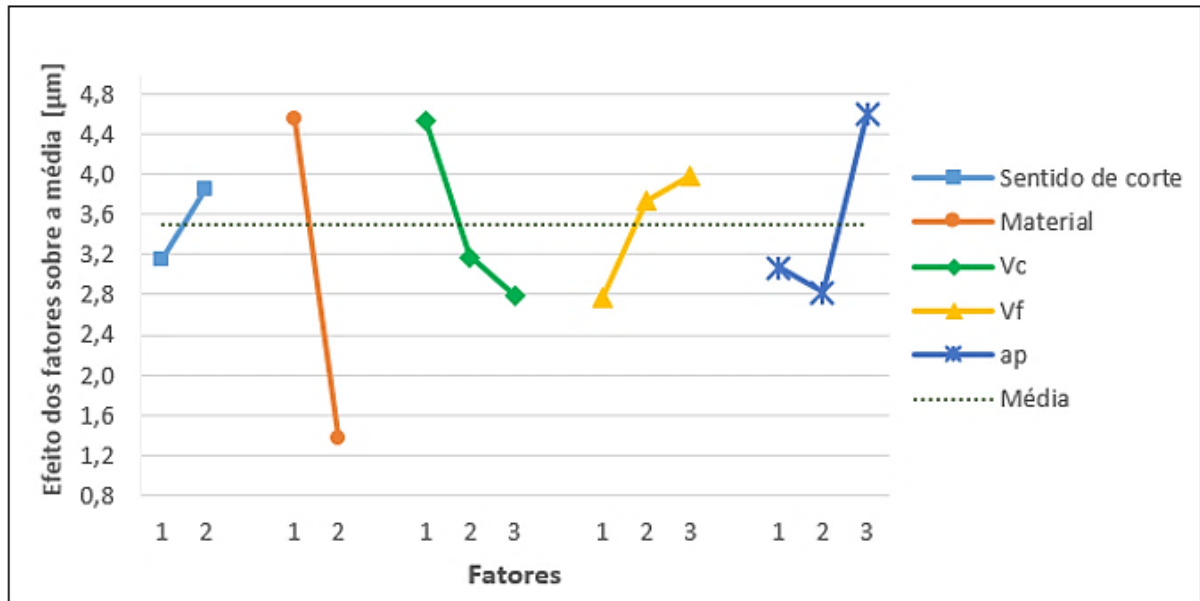
Figura 86- Perfil de rugosidade da furação (a) WPC e (b) MP



Fonte: Autoria própria

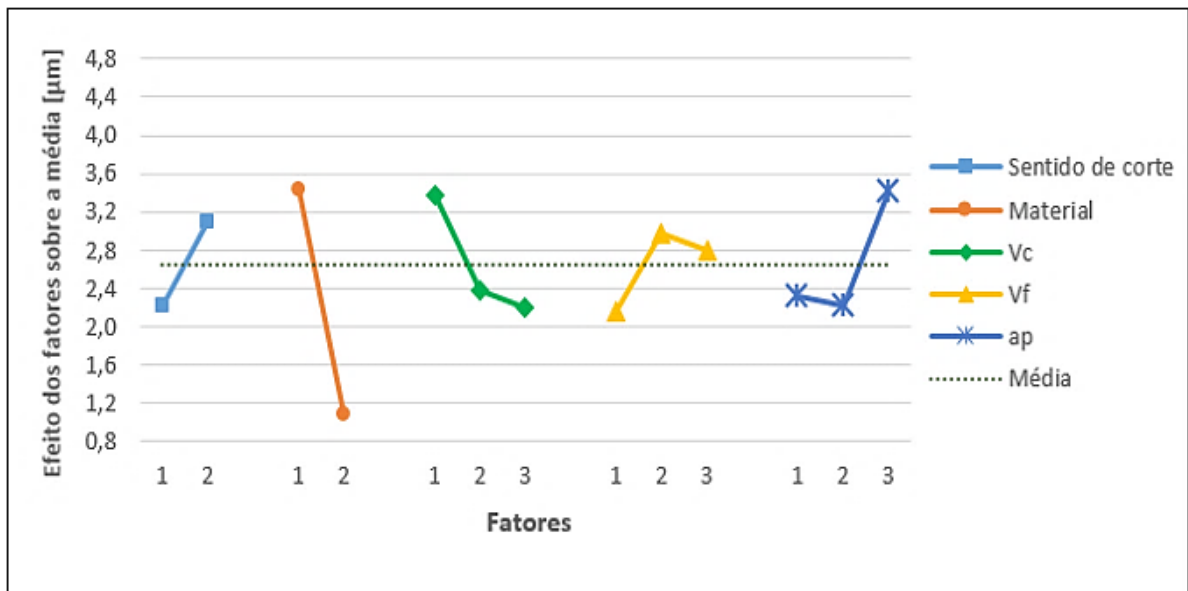
Analisando graficamente (Figuras 87 e 88), observa-se que o ajuste dos parâmetros de corte que proporcionou uma menor rugosidade média, foi igual para ambos os processos de fresamento estudados, sendo ele: sentido de corte no nível 1 (concordante), o material no nível 2 (madeira plástica -MP), a velocidade de corte no nível 3 (8000 rpm), a velocidade de avanço no nível 1 (3 m/mim) e profundidade de corte no nível 2 (5 mm).

Figura 87- Gráfico do efeito dos fatores sobre a média da rugosidade média (Ra) no fresamento tangencial



Fonte: Autoria própria

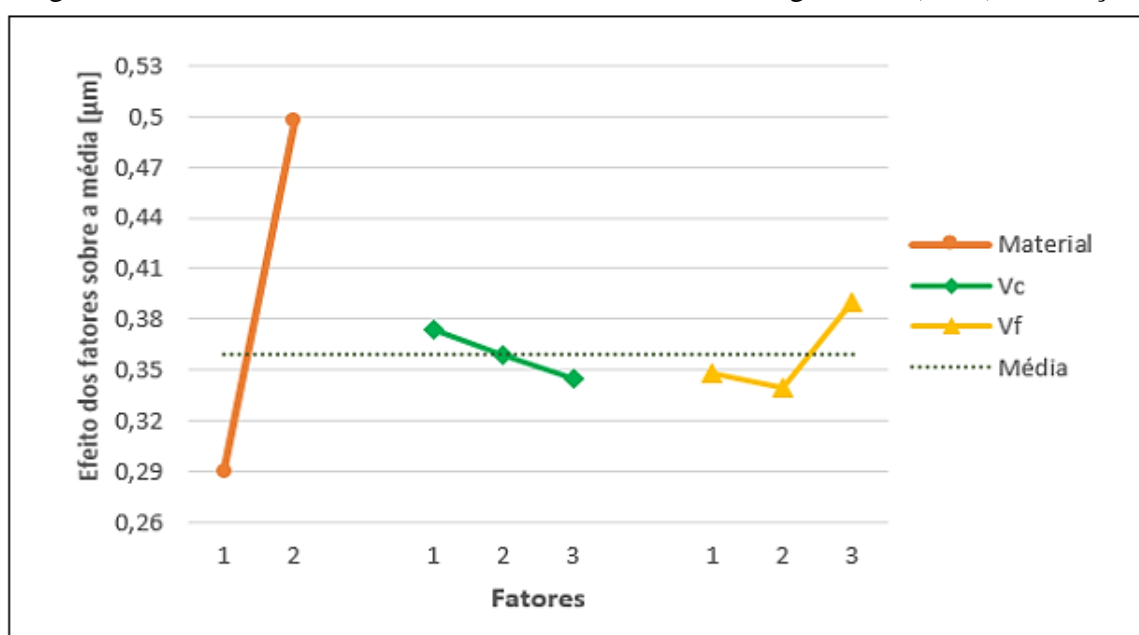
Figura 88- Gráfico do efeito dos fatores sobre a média da rugosidade média (Ra) no fresamento frontal



Fonte: Autoria própria

Na furação (Figura 89) o ajuste que proporcionou menor rugosidade RSm foi o material no nível 1 (madeira plástica-MP), a velocidade de corte no nível 3 (8000 rpm) e a velocidade de avanço no nível 2 (5 m/mim).

Figura 89- Gráfico do efeito dos fatores sobre a média da rugosidade (RSm) na furação



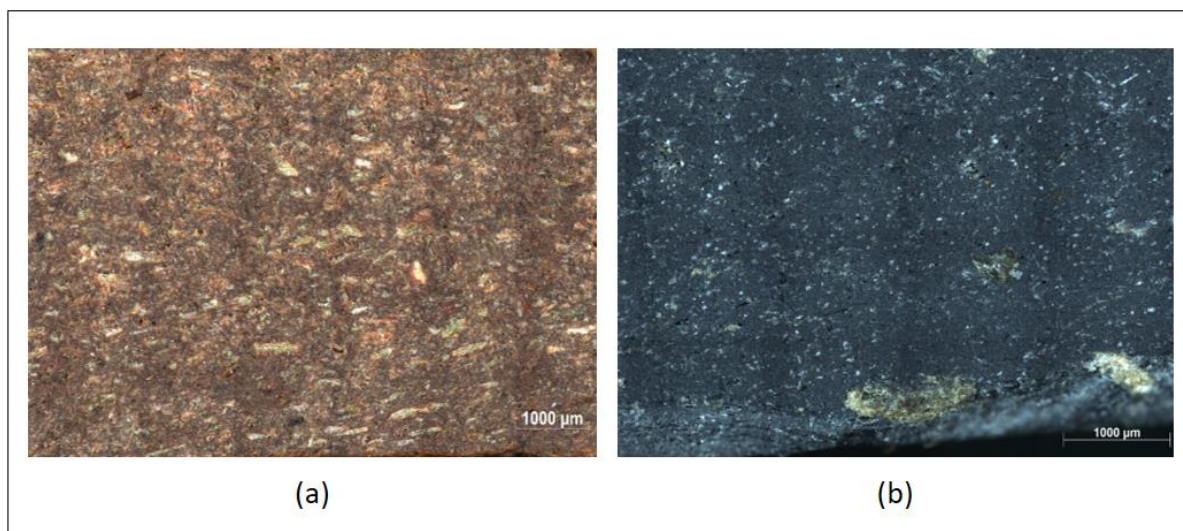
Fonte: Autoria própria

Através da análise estatística dos processos de fresamento (Tabelas F1 e F2 -Apêndice F), verificou-se que o único fator semelhante entre os processos, estatisticamente significativo, foi o tipo de material. Para o fresamento tangencial todos os fatores estudados apresentaram uma influência significativa. Já no fresamento frontal houve ainda o sentido de corte. Para a furação os fatores significativamente influentes foram o tipo de material e a velocidade de avanço (Tabelas F3 - Apêndice F).

Analisando cada um dos fatores e a sua influência no acabamento superficial dos materiais usinagem, nota-se que o tipo de material que apresentou melhores resultados, tanto para o fresamento quanto para a furação foi a madeira plástica. Uma hipótese, para o fato da MP ter apresentado menor rugosidade é a quantidade de reforço de cada material, pois através de análise topográfica percebeu-se que o WPC possui uma maior porcentagem de reforço que a MP (Figura 90). Portanto mesmo havendo o arrancamento das fibras na MP, o que acarretaria

em um maior número de cavidades no material, o plástico madeira possui maior transição entre a matriz e o reforço que a madeira plástica, o que ocasiona uma maior rugosidade.

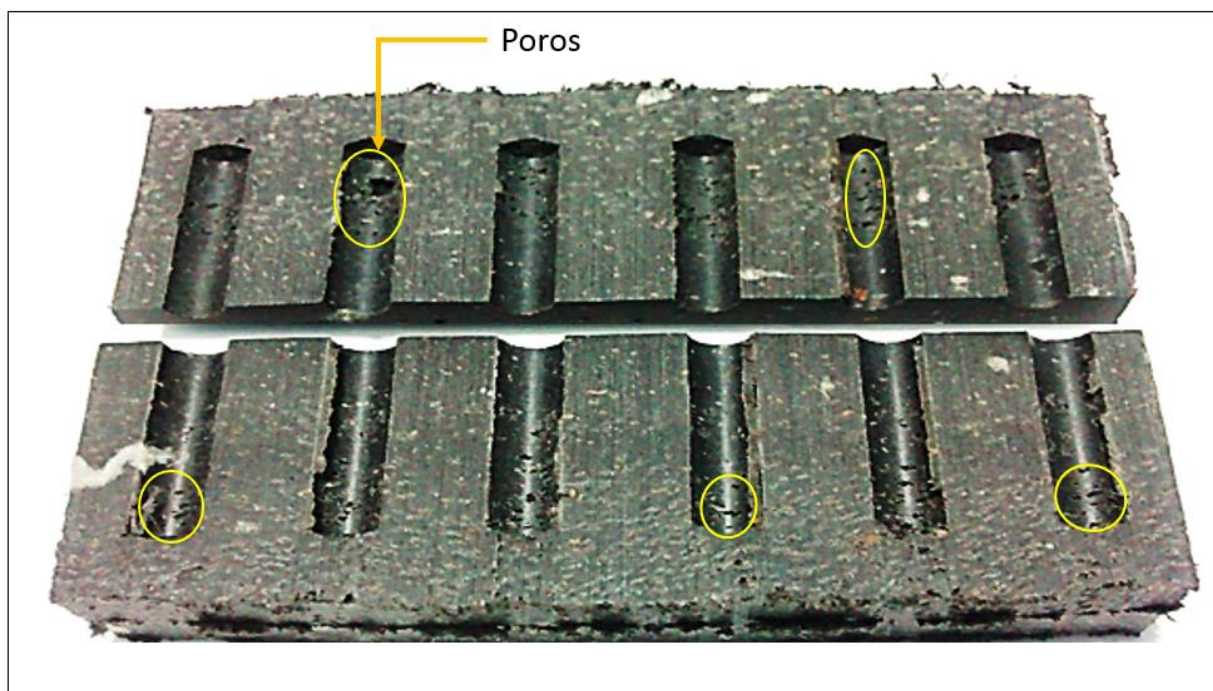
Figura 90- Imagem topográfica (a) WPC e (b) MP



Fonte: Autoria própria

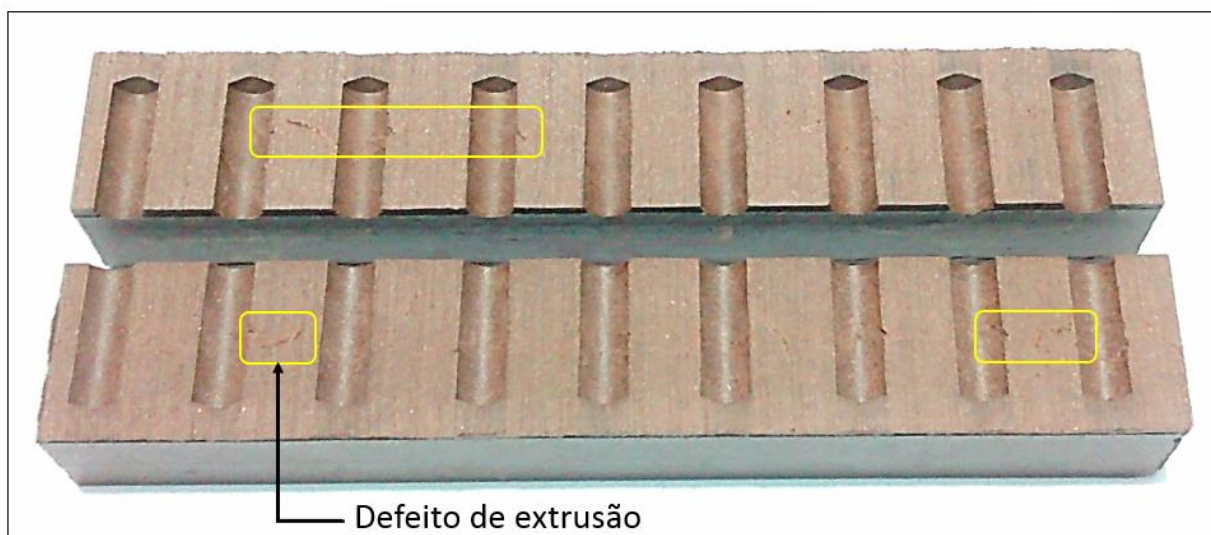
Já na furação, outro fator que poderia ter interferido no resultado da rugosidade, são os poros presentes na madeira plástica. Se comparar a aparência visual dos furos realizados nos materiais estudados (Figuras 91 e 92), é possível observar que a madeira plástica possui uma maior quantidade de poros que o plástico madeira, porém sua rugosidade foi menor. Isso é devido à a concentração dos poros ser no centro do material, como abordado nos Itens 5.1.1 e 5.1.3. Nas bordas/ laterais das amostras de MP a densificação do material é mais homogênea fazendo com que nos testes de qual valor de *cut-off* utilizar fosse o de 0.8, o qual possui um $L_n=4\text{mm}$, com isso o apalpador não percorreu toda a profundidade do furo e, portanto, não atingiu a parte que continha a maior concentração de poros. Já na medição do WPC o teste da escolha do valor de qual *cut-off* utilizar mostrou que o valor mais adequado seria o de 2.5, o qual possui um $L_n=12,5\text{mm}$, portanto o apalpador varreu quase a totalidade da profundidade do furo, sendo que, esse material apresenta um defeito de extrusão na parte central da amostra.

Figura 91- Superfície dos furos usinados na madeira plástica (amostra seccionada)



Fonte: Autoria própria

Figura 92- Superfície dos furos usinados no plástico madeira (amostra seccionada)



Fonte: Autoria própria

De acordo com a literatura existem vários fatores que podem influenciar na rugosidade superficial das amostras usinadas, tais como a velocidade de corte e de avanço, a profundidade de corte, o raio de curvatura da ponta da ferramenta de corte, ângulos de saída e de posição da ferramenta, entre outros.

Em seus estudos Rossi, Kanenobu e Batalha (2004) perceberam que o parâmetro que mais influencia na rugosidade é o avanço, seguido pela rotação do fuso (rotação da fresa) e pela profundidade de corte, nesta ordem. Em geral a literatura recomenda que se empregue: baixa velocidade de avanço, alta velocidade de corte e pequena profundidade de corte (STEMMER, 1993; ROSSI; KANENOBU; BATALHA, 2004). Portanto, os resultados obtidos para a rugosidade estão de acordo com a literatura.

Essa combinação de valores resulta em um bom acabamento superficial, pois segundo Rossi, Kanenobu e Batalha (2004), enquanto o avanço e a profundidade de corte são diretamente proporcionais à rugosidade, a rotação da fresa (velocidade de corte) é inversamente proporcional a esta. Isso quer dizer, que com o aumento da velocidade de corte haverá uma diminuição na rugosidade enquanto que com o aumento do avanço ou da profundidade de corte, a rugosidade irá aumentar.

Com relação ao sentido de corte, pela literatura, já era esperado que o melhor sentido fosse o concordante, devido à a finalização do corte de cada dente ser na mínima espessura, e com isso, gerar melhor acabamento, bem como pela utilização de uma máquina CNC.

Ainda existem outros fatores que irão influenciar no acabamento superficial como o desgaste da ferramenta de corte e a vibração. Com o aumento da vibração, a vida da ferramenta tende a diminuir com maior rapidez, pois microlascamentos são produzidos na aresta de corte (SOUZA e SCHROETER, 2007). O acabamento sofre também influência direta, diminuindo assim a qualidade da superfície com o aumento da vibração (STEMMER, 1993).

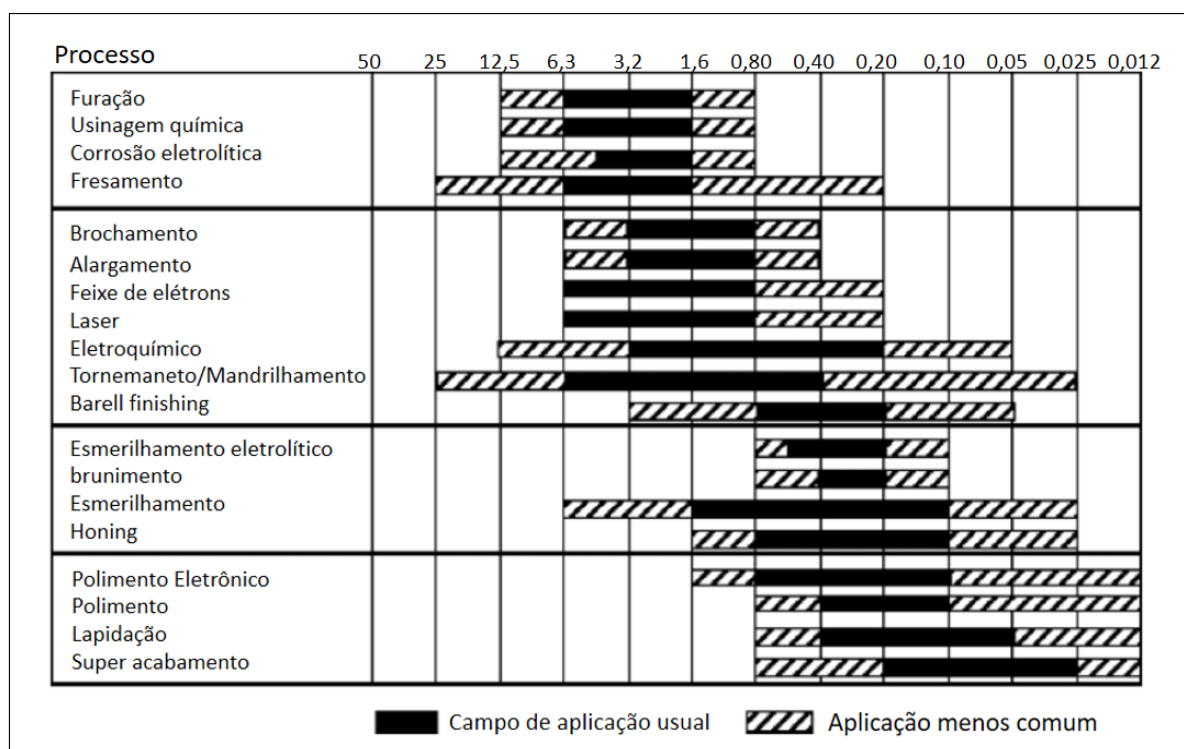
Com relação a vibração o sentido de corte foi contrário, pois o sentido que proporcionou menor vibração foi o discordante já uma menor rugosidade foi o concordante, um fato que pode ter gerado um leve acréscimo no valor médio da rugosidade.

Comparando as médias da Ra para os tipos de fresamento, pode-se observar que o fresamento frontal proporcionou uma menor rugosidade média (Tabela 12).

Tabela 12- Valores médios da rugosidade obtida através dos processos de usinagem

Processo	Rugosidade
	Ra [μm]
Fresamento Tangencial	3,50
Fresamento Frontal	2,64
	RSm [μm]
Furação	0,36

Comparando as médias de rugosidade com o Quadro 6, observa-se que os resultados obtidos para os processos de fresamento estudados estão de acordo com o esperado.

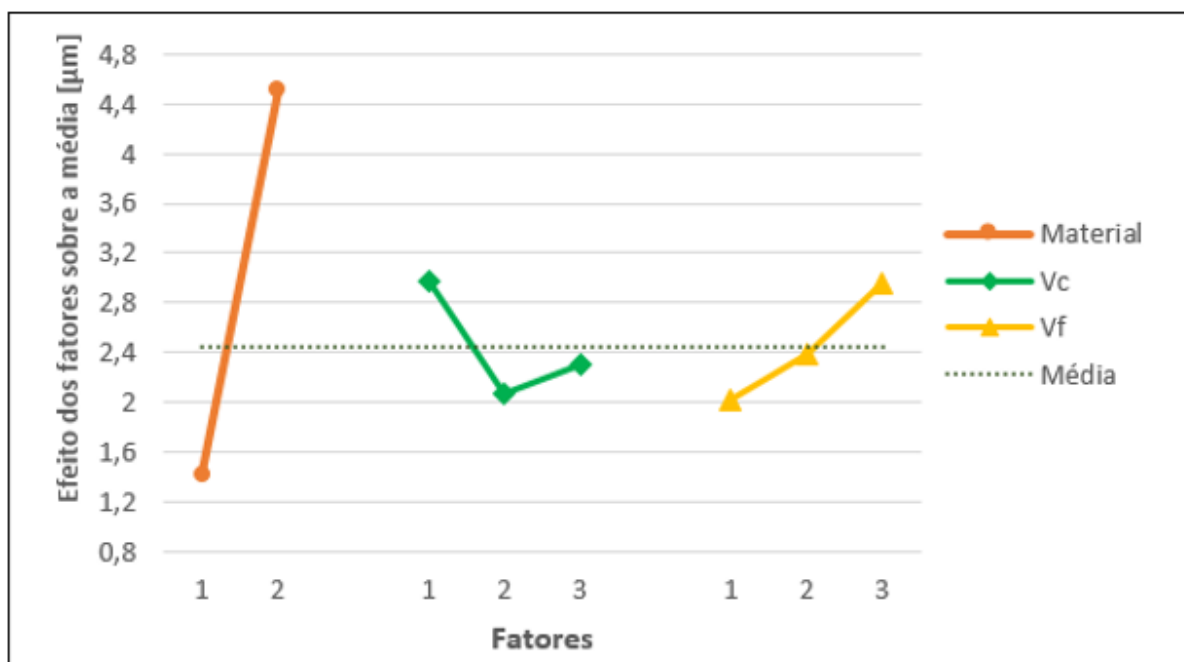
Quadro 6- Faixas típicas de Ra (μm) para alguns dos processos de usinagem

Fonte: Davim (2010)

Observando o Quadro 6, nota-se que o processo de furação possui uma faixa de Ra, mesmo não sendo o parâmetro correto para se determinar o perfil de rugosidade do processo. Porém, isso ocorre, devido ao parâmetro Ra ser o mais utilizado na indústria. Por conta disso, foi realizada uma avaliação da Ra dos furos produzidos, como critério de comparação com os valores de referência apresentados no Quadro 6.

Para a rugosidade média (Figura 93) o ajuste que proporcionou menor rugosidade no processo de furação foi o material no nível 1 (madeira plástica-MP), a velocidade de corte no nível 2 (6000 rpm) e a velocidade de avanço no nível 1 (3 m/mim). Se comparado com o ajuste pelo RSm percebe-se que somente o tipo de material é igual nas duas análises.

Figura 93- Gráfico do efeito dos fatores sobre a média da rugosidade média (Ra) na furação



Fonte: Autoria própria

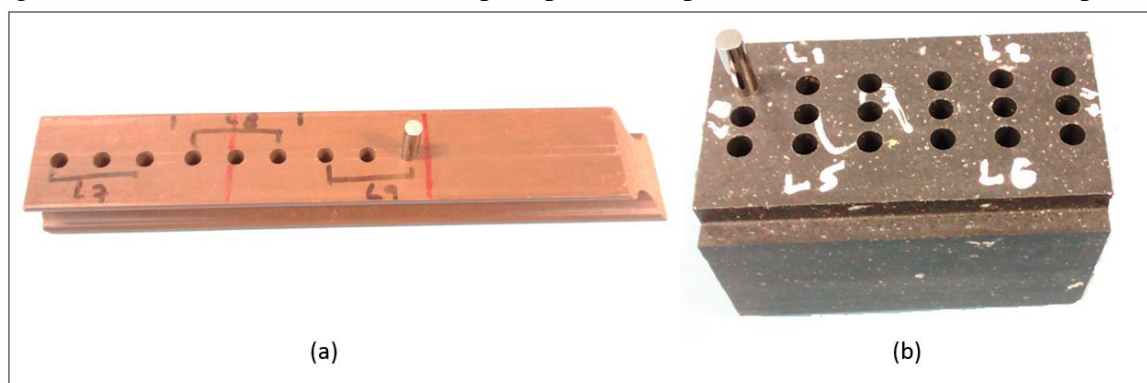
Na análise de variância (Tabela F4 - Apêndice F), verificou-se que somente o tipo de material usinado apresentou influência estatisticamente significativa no processo de furação, por meio da rugosidade média. Comparando com a do RSm, percebe-se que, novamente o tipo de material é o fator em comum entre as análises, porém para o RSm ainda houve a velocidade de avanço (Tabelas F3 - Apêndice F).

Analisando o valor médio de Ra para a furação (de 2,45 µm), com a faixa apresentada no Quadro 6, observa-se que o valor está dentro do esperado.

5.3.6.2 Desvio Dimensional dos Furos

Através da análise com o pino padrão (Figura 94) observou-se que o diâmetro dos furos foi menor que o diâmetro de corte da broca utilizada (Tabela 13).

Figura 94- Materiais estudados com o pino padrão (a) plástico madeira e (b) madeira plástica



Fonte: Autoria própria

Tabela 13- Diâmetro dos furos usinados

Material	Diâmetro[mm]
Plástico madeira	6,52
Madeira Plástica	6,51

Como observado no Item 5.2.1, devido ao aquecimento dos materiais ocorreu uma leve expansão térmica do material, que no caso deste trabalho, foi devido aos processos de usinagem empregados. No caso da furação, a dilatação da matriz polimérica, fez com que a dimensão final dos furos executados fosse menor que o esperado, ou seja, após a retirada da broca o polímero ainda aquecido tendeu a dilatar preenchendo parcialmente o furo realizado.

6 CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos pode-se concluir que os materiais estudados apresentaram boa usinagem mediante os processos de fresamento e furação. Em geral o fresamento frontal apresentou melhor acabamento superficial e o tangencial menor consumo de potência, vibração e aquecimento das peças. Os furos realizados sofreram dilatação e ficaram menores que o esperado.

As velocidades de corte e de avanço e a profundidade de corte não apresentaram semelhança entre os entre itens analisados. Entretanto, observou-se que apesar das recomendações literárias serem para a utilização de avanços menores, para ambos os processos, bem como uma velocidade de corte menor para o processo de furação, os parâmetros empregados mostraram que é possível utilizar valores maiores que os recomendados para usinagem dos materiais estudados.

Uma grande preocupação em usinagem de polímeros é o aquecimento das peças, porém através das análises térmicas e da análise do aquecimento das peças observou-se que os processos de usinagem empregados não degradam os materiais estudados

REFERÊNCIAS

- ABRATE, S; WALTON, D. A. Machining of composite materials. Part I: Traditional methods. **Composites Manufacturing**, v. 3, n. 2, p. 75-83, 1992.
- ALMEIDA, H. S; TOLEDO, J. C. Método Taguchi: Qualidade voltada para o projeto do produto e do processo. **Revista de Administração (São Paulo)**, v. 24, n. 4, 1989.
- ALTINTAS, Y; WECK, M. Chatter stability of metal cutting and grinding. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 53, n. 2, p. 619-642, 2004.
- ALVES, M. C. S; GONÇALVES, M. T.T; VARASQUIM, F. M. F. A; SANTIAGO, L F. F; VARANDA, L. D; BIANCHI, E.D. Análise da influência da velocidade de corte, da granulometria da lixa e da pressão específica de corte no processo de lixamento. In: **VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, 6., 2010, Paraíba, 2010. p11.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A 600-92a**: Standard Specification for Tool Steel High Speed, 2004.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1037-12**: Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials, 2006.
- ASHORI, A. Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 11, p. 4661-4667, July 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12545**: Conceitos da técnica de usinagem - Forças, energia, trabalho e potências - Terminologia. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 4288**: Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6175**: Usinagem- Processos Mecânicos. Rio de Janeiro, 2015.
- BAPTISTA, A. L. B. Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços. **Revista Escola de Minas**, v. 55, n. 2, p. 103-109, 2002.
- BATALIOTTI, M. D. **Avaliação da degradação do polipropileno sob múltiplas extrusões com e sem antioxidante**. 2016. 43 f. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016.
- BERTHELOT, J-M. **Composite materials: mechanical behavior and structural analysis**. Springer Science & Business Media, 2012.
- BOOTHROYD, G; KNIGHT, W. A. **Fundamentals of machining and machine tools**. 2^a edition, New York: Marcel Dekker, 1989.

- BOUMBIMBA, R. M; FROUSTEY, C; VIOT, P; OLIVE, J. M. F. R. R. INOUBLI, R. Preparation and mechanical characterisation of laminate composites made of glass fibre/epoxy resin filled with tri bloc copolymers. **Composite Structures**, v.116, p 414-422, 2014.
- BOWYER, J; FERNHOLZ, K; HOWE, J; BRATKOVICH, S. Wood Plastic Composite Lumber vs. Wood *Decking*. Comparison of Performance Characteristics and Environmental Attributes. **Dovetail Partners Inc.** Minneapolis – USA, 12 p. 2010.
- BUEHLMANN, U; SALONI, D; LEMASTER, R. L. Wood Fiber-Plastic Composites: Machining and Surface Quality. In: **Proceedings of the 15th International Wood Machining Seminar**, Anaheim, CA, 2001.
- CALLISTER JR, W D; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora SA (LTC), 8ª edição, 2013. 817p.
- CAMARGO, R. **Rugosidade superficial nas operações de torneamento**. Centro de formação SENAI, Santa Bárbara d'Oeste, 2002. 96p.
- CATTO, A. L; MONTAGNA, L. S; ALMEIDA, S. H; SILVEIRA, R. M; SANTANA, R. M. Wood plastic composites weathering: Effects of compatibilization on biodegradation in soil and fungal decay. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 109, p. 11-22, 2016.
- CAULFIELD, D. F; CLEMONS, C; JACOBSON, R. E; ROWELL, R. M. Wood thermoplastic Composites. In: **Handbook of wood chemistry and wood composites**. USA, CRC Press. 491p. 2005. Cap 13. p. 365-380.
- CHINDAPRASIRT, P; HIZIROGLU, S; WAISURASINGHA, C; KASEMSIRI, P. Properties of wood flour/expanded polystyrene waste composites modified with diammonium phosphate flame retardant. **Polymer Composites**, v. 36, n. 4, p. 604-612, 2015.
- CHUNG, D. D. L. **Composite materials: science and applications**. 2ª ed. Springer Science & Business Media, 2010. 349p.
- CLEMONS, C. Wood-Plastic Composites in the United States: The Interfacing of Two Industries. **Forest Products Journal**, v.52, n.6, p.10-18, 2002.
- COLOM, X; CARRASCO, F; PAGÈS, P; CAÑAVATE, J. Effects of different treatments on the interface of HDPE/lignocellulosic fiber composites. **Composites Science and Technology**, v.63, p.161-69, 2003.
- CORREA, C. A; FONSECA C.N.P; NEVES S; RAZZINO C.A; HAGE E. Compósitos Termoplásticos com Madeira. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 13, n.3, p. 154-165, 2003.
- DALLAS, D, B. Tool and Manufacturing Engineers Handbook. 3ª ed. **Society of Manufacturing Engineers**. 1484, 1976.
- DAVIM, J. P. (Ed.). **Surface integrity in machining**. 1ª ed. London: Springer London, 2010. 222p.
- DAVIM, J. P. (Ed). **Tribology in manufacturing technology**. Springer, 2012.

- DEHNAD, K. **Quality control, robust design, and the Taguchi method**. Springer Science & Business Media, 2012.
- DE VOS, P; STÅHL, J-E. **Tool deterioration: Best Practices**, Seco Tools AB: versão 1.2. Fagersta, Sweden, 2014
- DELIGIO, T. Wood composites continue to build a marketplace. **Modern Plastics International**, v. 34, n. 8, p. 26, 2004.
- DIAS, R. C. C. **Microescultura por laser de superfícies metálicas para manufatura de laminados híbridos metal/fibra**. 2013. 117f. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo. São Carlos, 2013.
- DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8ª ed. São Paulo: Art Liber, 2013. 272 p.
- DROZDA, T. J; WICK, C. (Eds). **Tool and Manufacturing Engineers Handbook**, Vol. I- Machining. Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1983, p. 1494.
- DURAND, L. P (Ed). **Composite materials research progress**. 1ª ed. New York: Nova Science Publishers, 2008. 307p
- EBERHARDT, G. G. **Avaliação da usinabilidade e qualidade dos furos na usinagem de compósitos à base de resina epóxi com carga de pó de ferro**. 2009. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2009.
- ECOPEX-MATERIAIS ECOLÓGICOS (São Paulo) (Ed.). **Madeira Plástica / Madeira Ecológica: A evolução da madeira, conheça a madeira plástica!**. Disponível em: <<http://www.ecopex.com.br/madeira-plastica/>>. Acesso em: 30 mar. 2015.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Norma **EN 323/2000**. Wood-based panels – Determination of density. Bruxelas, 2003.
- FERNANDES, M. O; CORRÊ, M. M; LEITE, W; WIEBECK, H; VALENZUELA-DIAZ, F. R; TOFFOLI, S. M. Usinagem de plásticos de engenharia: Uma opção de processamento. **In: 9º Congresso Brasileiro de Polímeros**, São Carlos, 2007.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 12ª reimpressão, p. 751, 2006.
- FLIR. FLIR i3 / i5 / i7. Disponível em: <<http://www.flir.co.uk/instruments/display/?id=65813>>. Acesso em: 28 jul. 2015.
- FONSECA, C. B.; DA COSTA, G. F; DIAS, F. M. Reforço com Fibras de Vidro em Painéis Compensados- Uma Alternativa Ecológica. **SEGET: Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia**, v. 8, 2011.
- FUSSE, R. Y; BIANCHI, E. C; FRANÇA, T. V; CATAI, R. E; SILVA, L. R. E; AGUIAR, P. R. Erros geométricos na retificação do aço SAE HVN-3. **Revista Máquinas e Metais**, ano **XI**, n. 464, p. 150-163, 2004.

GAITONDE, V. N; KARNIK, S. R; CAMPOS RUBIO, J; CORREIA, A. E; DAVIM, J. P. Surface roughness analysis in high-speed drilling of unreinforced and reinforced polyamides. **Journal of Composite Materials**, v. 46, n. 21, p. 2659-2673, 2012.

GARCIA, U. **Estudo da aplicação de mínima quantidade de fluido no fresamento de acabamento da liga Ti-6Al-4V**. 2015. 178 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Mecânica, Área de Materiais, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

GAY, D. **Composite materials: design and applications**. 3ª ed. Florida: CRC Press, 2014. 635p.

GUAMÁ, F. F. M. C; COSTA, R. V. A; ROCHA, H. L; ISENSEE, F. V; FUTURO, L. L. Lixo Plástico - De sua produção até a Madeira Plástica. In: **XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. A integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável. Rio de Janeiro, 13-16 out de 2008, p13.

GUTIÉRREZ, J. C. H; RUBIO, J. C. C; FARIA, P. E; DAVIM, J. P. Usinabilidade de Materiais Compósitos Poliméricos para Aplicações Automotivas. **Polímeros**, v. 24, n. 6, p. 711-719, 2014.

HELSEN, L; VAN DEN BULCK, E. Review of disposal technologies for chromated copper arsenate (CCA) treated wood waste, with detailed analyses of thermochemical conversion processes. **Environmental Pollution**, v. 134, n. 2, p. 301-314, 2005.

HUTYROVÁ, Z; ZAJAC, J; MICHALIK, P; MITAL, D; DUPLÁK, J; GAJDOŠ, S. Study of Surface Roughness of Machined Polymer Composite Material. **International Journal of Polymer Science**, v. 2015, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **3685**: Tool-life testing with single-point turning tools, 1993.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **513**: Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges — Designation of the main groups and groups of application, 2015

IRLE, M. A; BARBU, M. C; REH, R; BERGLAND, L; ROWELL, R. M. Wood Composites. In: ROWELL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Florida: CRC Press, 2012. Cap. 10.

JAFARIAN, J. N, BEHRAVESH A. H. Flow behavior of HDPE–fine wood particles composites. **Journal Thermoplastic Composites Material**, v.20, p.439–451, 2007.

JEMIELNIAK, K. Commercial tool condition monitoring systems. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 15, n. 10, p. 711-721, 1999.

JESUS, E. R. B. **Obtenção, usinagem e desgaste de materiais compósitos de matriz metálica processo via metalurgia do pó**. 1998. Dissertação (Mestrado), Tecnologia Nuclear – Materiais, Universidade de São Paulo, 1998.

JOSEPH, K; VARGHESE, S; KALAPRASAD, G; THOMAS, S; PRASANNAKUMARI, L; KOSHY, P; PAVITHRAN, C. Influence of interfacial adhesion on the mechanical properties and fracture behaviour of short sisal fibre reinforced polymer composites. **European Polymer Journal**, v.32, n.10, p.1243-1250, 1996.

- JOSEPH, P.V; RABELLO, M.S; MATTOSO, L.H.C; JOSEPH, K; THOMAS, S. Environmental effects on the degradation behaviour of sisal fibre reinforced polypropylene composites. **Composites Science and Technology**, v.62, p.1357-72, 2002.
- KALPAKJIAN, S. Material removal processes and machine tools. In: AVALLONE, E. A; BAUMEISTER III, T; Sadegh, A. (Eds). **Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers**. 11^a ed. New York: McGraw-Hill Education, 2006, Cap 13, p. 50-72.
- KALPAKJIAN, S; SCHMID, S. **Manufacturing, Engineering and Technology**. 6^a ed. Prentice Hall, 2009. 1200p.
- KATSOULIS, C; KANDOLA, B. K; MYLER, P; KANDARE, E. Post-fire flexural performance of epoxy-nanocomposite matrix glass fibre composites containing conventional flame retardants. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 43, p.1389-1399, 2012.
- KAW, A. K. **Mechanics of composite materials**. 2^a ed. United States of America: CRC Press, 2005. 473p.
- KHASHABA, U. A. Drilling of polymer matrix composites: A review. **Journal of Composite Materials**, v. 47, n. 15, p. 1817-1832, 2013.
- KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1 – Cutting**. 1^a ed. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2011. 506p.
- KLYOSOV, A. A. **Wood-plastic composites**. John Wiley & Sons, 2007. p. 702.
- KOENIG, K.M; SYPKENS, C.W. Wood-plastic composites vie for market share. **Wood and Wood Products**, v.107, n.5, p.49-58, 2002.
- KOMANDURI, R; VON TURKOVICH, B. F. New observations on the mechanism of chip formation when machining titanium alloys. **Wear**, v.69, p. 179-188, 1981.
- KRATOCHVIL, R. **Fresamento de acabamento em altas velocidades de corte para eletrodos de grafita industrial**. 2004. 119f. Dissertação (Mestrado)- Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2004.
- KRISHNARAJ, V; ZITOUNE, R; DAVIM, J. P. **Drilling of polymer-matrix composites**. Heidelberg: Springer, 2013. 110p.
- LEE, D. G; KIM, P. J; CHOI, J. K. **Temperature Rise and Surface Roughness of Carbon Fiber Epoxy Composites During Cut-Off Grinding**. *Journal of Composite Materials* v.34, 2000. pp. 2061-2080.
- LEVY NETO, F; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. Editora: Edgard Blucher, São Paulo, 2006.
- LI, Y; MAI, Y; YE, L. Sisal fiber and its composites: a review of recent developments, **Composites Science and Thecnology**, v.60, p. 2037-2055, 2000.
- LIMA, A C. **Caracterização e propriedades de compósitos de tecido de juta reforçando matriz de polietileno reciclado**. 2009. 109 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2009.

- LIUKKO, T; SALILA, T; PLATT, S; KÄRKI, T. Wood Plastic Composites in Europe: an Introduction to Wood Plastic Composite Markets and Products. **Baltic Forestry**, v.13, n.1, p.131-136, 2007.
- MACHADO, A. R; ABRÃO, A. M; COELHO, R. T; DA SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. 1ª edição. São Paulo: Editora Blucher, p.371, 2009.
- MAGOSS, E. General regularities of wood surface roughness. **Acta Silvatica & Lignaria Hungarica**, v.4, n.1, p.81-93, 2008.
- MARKARIAN J. Material and processing developments drive wood plastic composites forward. **Plastics, Additives and Compounding**, v.5, p. 24-28, July 2003.
- MARKETS AND MARKETS (Ed.). **Wood Plastic Composite Market by Type (Polyethylene, Polyvinylchloride, Propylene, and Others), Applications (Building & Construction Products, Automotive Components, Industrial & Consumer goods, and Others) and Region: Trends & Forecasts (2014 - 2019)**. USA, Markets and Markets, 2014, p.168.
- MATTOSO, L.H.C. Conferência internacional de compósitos reforçados com fibras vegetais. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.9, n.2, p.16, 1999.
- MELO, A. C. A; MACHADO, A. R; SILVA S. M. M. L; GUIMARÃES, G. Estudo da variação da temperatura de corte no fresamento frontal. In: **2º COBEF, Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia-MG**. 2003.
- MIOTTO, J. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro**. 2009. Tese (Doutorado), Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo.
- MOCELLIN, F. **Avaliação da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em Ensaio de Furação**. 2002. 112f. Dissertação (Mestrado) Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). 2002.
- MOLINA, J. C; CARREIRA, M. R; CALLIL JUNIOR, C. Análise do comportamento mecânico de perfis retangulares de madeira plástica (Wood Plastic Composite). **Minerva**, v.6, n.1, p. 47-57, 2007.
- MONDARDO, F. H. **Compósitos de polipropileno e farinha de madeira**. 2006. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Pelotas, 2006.
- MOTHÉ, C. G; DIAS, F. T. G; MOTHÉ, M. G. Avaliação térmica e mecânica da degradação de materiais poliméricos na proteção ao meio Ambiente. In: **Congresso Brasileiro de Polímeros**. 2009.
- MOURA, M. F. S. F; MORAIS, A. B; MAGALHÃES, A. G. **Materiais compósitos: materiais, fabrico e comportamento mecânico**. 2. ed. Porto: Publindústria, 2005.369p.
- NAJAFI, S. K. **Use of recycled plastics in wood plastic composites - A review**, Waste Management, n.33, p 1898-1905, June 2013. Disponível em:<
http://www.medsci.cn/sci/show_paper.asp?id=85fd5594600>. Acesso em junho de 2014.
- NISKA, K. O; SAIN. M. (Ed). **Wood-Polymer Composites**, USA. Woodhead Publishing e CRC Press LLC. 2008 p. 384.

OLYMPUS CORPORATION. **Parâmetros de rugosidade (2D)**. Disponível em:<http://www.olympus-ims.com/pt/knowledge/metrology/roughness/2d_parameter/>. Acesso em: 25 nov. 2016.

OPTIMAT LTD AND MERL LTD (UK). **Wood Plastic Composites Study: Technologies and Uk Market Opportunities**. Banbury: The Waste And Resources Action Programme, 2003. 101 p.

OSG SULAMERICANA. **Ferramentas Especiais High Tech**. Disponível em:<http://www.osg.com.br/v4/fotos/download/HIGHTECH_BROCAS.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2016.

PAREDES, R. S. C. **Projeto Robusto**. Curitiba- UFPR (Departamento de Engenharia Mecânica) Notas de Aula. Disponível em:<[http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EME714/Projeto Robusto.pdf](http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EME714/Projeto%20Robusto.pdf)>. Acesso em: 03 mar. 2016.

PHADKE, M. S. **Quality engineering using robust design**, 1st edition, New York, Prentice Hall, 1989, 333 p.

PIMENTA, C. D; SILVA, M. B; RIBEIRO, R. B; ELIAS, F. A. Método Taguchi aplicado na identificação dos fatores causadores da descarbonetação do arame de aço SAE 51B35, durante tratamento térmico de esferoidização. **Gepros: Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 7, n. 2, p. 97, 2012.

PÓVOA, A. H. **Fresamento Frontal: Influência das condições de usinagem nos esforços de corte e na rugosidade da peça**. 31f. Universidade Federal de São João del-Rei, Departamento de Engenharia Mecânica, São João del-Rei, 2009

PRITCHARD, G. Two technologies merge: wood plastic composites. **Reinforced Plastics**, v. 48, n. 6, p.26-29, jun. 2004.

QUINTANA, G; CIURANA, J. Chatter in machining processes: A review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 5, p. 363-376, 2011.

R DEVELOPMENT CORE TEAM . **R: A language and environment for statistical computing**. Version 2.10.0. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2009. Disponível em: <http://www.R-project.org>.

REZENDE, M. C; COSTA, M. L; BOTELHO, E. C. **Compósitos estruturais: tecnologia e prática**. 1ª ed, São Paulo: Artliber, 2011. 396p.

ROHLOFF, R. C. **Efeito dos parâmetros de corte no fresamento do aço inoxidável AISI 420 para moldes e matrizes**. 2012. 83f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia mecânica, Setor de Ciências Agrárias, Instituto Superior Tupy, Joinville, 2012.

ROSSI, G. C; KANENOBU, A. K; BATALHA, G. F. Relação entre parâmetros de corte e rugosidade da superfície usinada numa operação de fresamento de topo. In: **1º Workshop - Novos Desenvolvimentos em Engenharia de Fabricação**, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

SAHEB, D. N; JOG, J. P. Natural fiber polymer composites: a review. **Advances in Polymer Technology**, v.18, n.4, p.351-63, 1999.

SALONI, D; BUEHLMANN, U; LEMASTER, R. L. Tool wear when cutting wood fiber-plastic composite materials. **Forest Products Journal**, v. 61, n. 2, p. 149, 2011.

SANTOS, R. G. **Desenvolvimento de um método para comparar os limites de estabilidade dinâmica em máquinas-ferramentas utilizando o diagrama de lóbulos**. 2011. 137f. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

SANTOS, S. C; SALES, W. F. Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais. **São Paulo: Artliber**, v. 246, 2007, p.246.

SCHNEIDER, E. L; MARQUES, A. C; FALLER, R. R; KINDLEIN JÚNIOR, W. Análise dos Parâmetros de Usinagem no Acabamento Superficial de Polímeros. **UNOPAR Científica Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 7, n. 1, p. 25-30, Nov. 2008

SCHUT, J.H. Wood is Good for Compounding, Sheet & Profile. **Plastics Technology**, v.45, n.3, p.46 -47, march 1999.

SECO TOOLS (Ed.). **Catalogue & Technical Guide – INCH**. Disponível em: <https://www.secotools.com/CorpWeb/north_america/Literature_brochures/navigator_inch/Milling%20Navigator%20Inch.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2016.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. 2ª ed. Oxford: oxford University Press, Inc. 2005. 651p.

SIDDHPURA, M; PAUROBALLY, R. A review of chatter vibration research in turning. **International Journal of Machine tools and manufacture**, v. 61, p. 27-47, 2012.

SOMSAKOVA, Z; ZAJAC, J; MICHALIK, P; KASINA, M. Machining of wood plastic composite (pilot experiment). **Materiale plastice**, v. 49, n. 1, p. 55-57, 2012.

SOUZA, A J. **Fundamento da usinagem dos materiais: processo de fresamento usinagem**. Rio Grande do Sul: UFRS, 2011. 89 p. Apostila. Disponível em: <https://chasqueweb.ufrgs.br/~ajSouza/ApostilaUsinagem_Parte1.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2015.

SOUZA, A J. **Processo de Fresamento: Operações de Corte**. Rio Grande do Sul: UFRS, 2016a. 10 p. Apostila. Disponível em: <https://chasqueweb.ufrgs.br/~ajSouza/processos_usinagem.htm>. Acesso em: 20 fev. 2016a

SOUZA, A J. **Formação, Tipos e Geometrias de Cavaco**. Rio Grande do Sul: UFRS, 2016b. 09 p. Apostila. Disponível em: <https://chasqueweb.ufrgs.br/~ajSouza/processos_usinagem.htm>. Acesso em: 20 fev. 2016b

SOUZA, A. J; SCHROETER, R. B. Análise da influência dos parâmetros de corte nos sinais monitorados de força e vibração, e na variação da rugosidade da superfície torneada. In: **4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Águas de São Pedro, Brazil, CD ROM**. 2007.

SOUZA, E. M. **Influência dos parâmetros de usinagem da madeira de *Eucalyptus* sp. no consumo de energia específica de corte em serra circular**. 2014. 63f. Dissertação (Mestrado)- Ciência e Tecnologia da Madeira: Processamento e Utilização da Madeira, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 3ª Edição, Florianópolis: editora da UFSC, 1993, 249 p.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. 2ª Edição, Florianópolis: editora da UFSC, 1995, 314 p.

STEPHENSON, D. A; AGAPIOU, J. S. **Metal Cutting: Theory and Practice**. 2ª ed. Florida: CRC Press. 2006. 846p.

STOETERAU, R. L. **Processos de Usinagem: Fabricação por Remoção de Material**. Santa Catarina: UFSC, 2004. 180f. Apostila. Disponível em: <<https://solidboxprojectss.files.wordpress.com/2013/01/usinagem-apostila-toda-ilustrada-ufsc.pdf>>. Acesso em: 10 março 2016.

SUAREZ, M.P; COSTA, E.S; MACHADO, A. R. Influência dos Parâmetros de Corte no Acabamento de Canais em Alumínio Aeronautico 7075-T7. In: **V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM**, Salvador, p.10, 2008.

TAGUCHI, G; CHOWDHURY, S; WU, Y. **Taguchi's quality engineering handbook**. Wiley-Interscience, 2005, pp. 1804

TAGUCHI, G; JUGULUM, R. **The Mahalanobis-Taguchi strategy: A pattern technology system**. John Wiley & Sons, 2002.

TAHARA, S. **Planejamento de Experimentos (DOE)**. 2008. USP – NUMA (Departamento de Engenharia de Produção). Disponível em: <http://www.portaldeconhecimentos.org.br/index.php/por/Conteudo/Planejamento-de-Experimentos-DOE#eztoc113642_1>. Acesso em: 03 mar. 2016.

TANCRET, F; SOURMAIL, T; YESCAS, M.A; EVANS, R.W; MCALEESE, C; SINGH, L; SMEETON, T; BHADSHIA, H.K.D.H. Design of a creep resistant nickel base superalloy for power plant applications: Part 3–Experimental results. In **Materials Science and Technology**, v.19, p. 296-302, 2003.

TAYLOR, A; YADAMA, V; ENGLUND, K. R; HARPER, D; KIM, J. Wood plastic composites-a Primer. **IoA University of Tennessee**, Knoxville, TN, 2009.

TRENT, E.M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**, 4ª ed., Butterworth-Heinemann, Woburn, USA, 2000.

TRIGUEIRO, A; BOCARDI, R (Ed.). **Madeira plástica evita derrubada de árvores para fabricar móveis**. 2012. Disponível em: <<http://g1.globo.com/jornal-da-globo/noticia/2012/09/madeira-plastica-evita-derrubada-de-arvores-para-fabricar-moveis.html>>. Acesso em: 12 maio 2014.

TSAO, C. C. Drilling process for composites. In: HOCHENG, H. **Machining technology for composite materials: Principles and practice**. 1ªed. Woodhead publishing limited, 2012. Cap. 2, p. 17-64.

WANG, Y. **Morphological Characterization of Wood plastic Composite (WPC) with Advanced imaging Tools: Developing Methodologies for Reliable Phase and Internal Damage Characterization**. PhD Thesis. Oregon State University. Corvallis, OR. p.123, 2007.

WECHSLER A, HIZIROGLU S. Some of the properties of wood–plastic composites. **Journal Building and Environment**, v. 42, n. 2637, p.44, 2007.

WEIDENFELLER, B. M.H., SCHILLING, F. R. **Thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat capacity of particle filled polypropylene**. Composites Part A: applied science and manufacturing, 35, 2004. pp. 423–429.

WESTRUPP, F. L. **Análise da viabilidade da usinagem de compósito de matriz de epóxi com cargas de ferro visando a sua utilização em moldes de injeção**. 2008. 94f. Dissertação (Mestrado) - Programa Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

WISEWOOD (São Paulo). **Wisewood: soluções sustentáveis**. Disponível em: <<http://www.wisewood.com.br/peças.php>>. Acesso em: 25 dez. 2014.

WOLCOTT, M. P; ENGLUND, K. A technology review of wood-plastic composites. **In: 33^o International Particleboard/Composite Materials Symposium**. 103-111p. 1999.

XIAO, K.Q.; ZHANG, L.C. The role of viscous deformation in the machining of polymers. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 44, p. 2317-2336, 2002.

YAMAJI, F. M. **Produção de compósito plástico-madeira a partir de resíduos da indústria madeireira**. 2004. 182 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

YAMAJI, F. M; BONDUELLE, A. Utilização da serragem na produção de compósitos plástico-madeira. **Revista Floresta**, v.34, n.1, p.59, 2004.

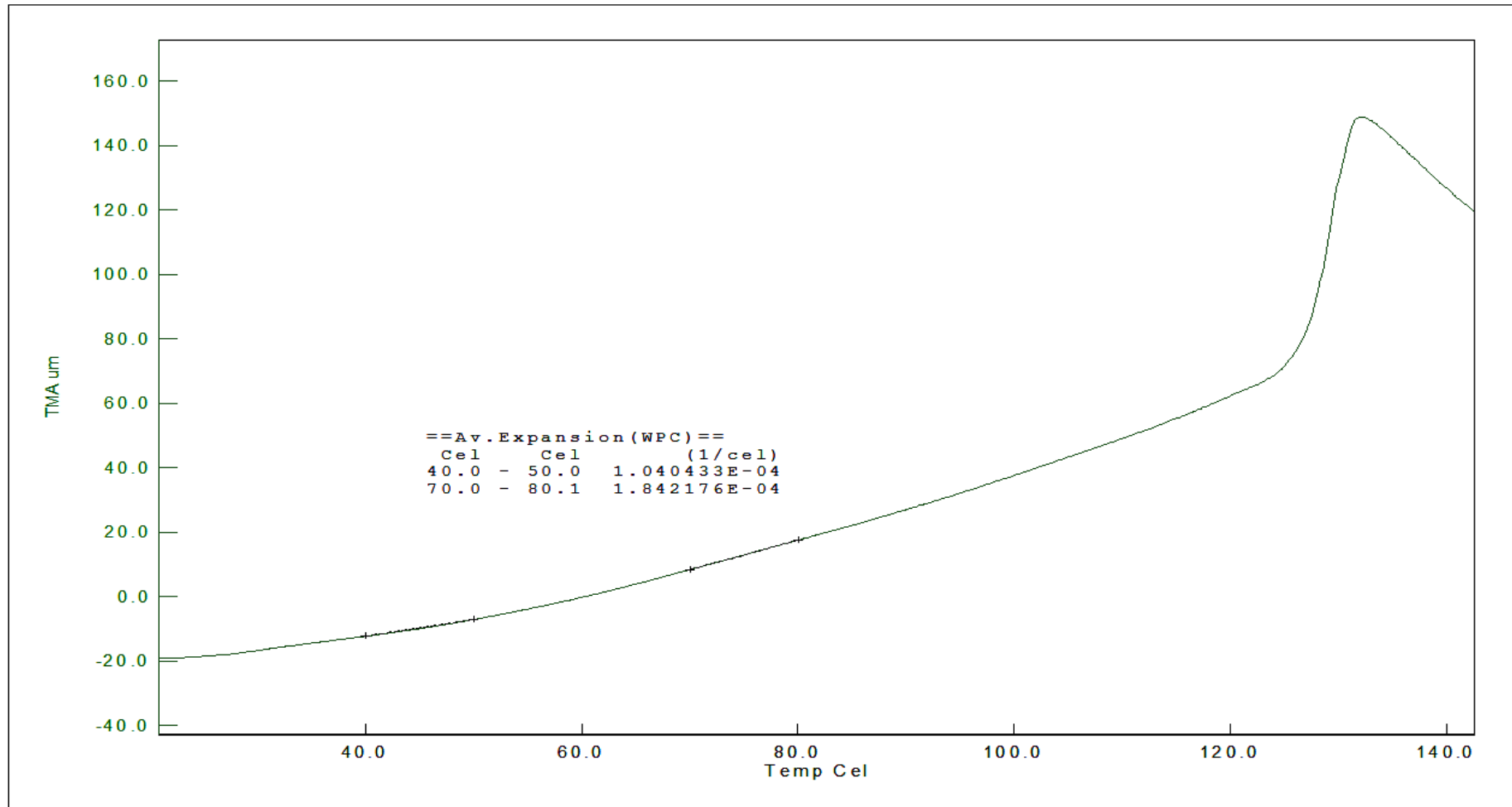
YANG, H. S; KIM, H. J; PARK, H. J; LEE, B. J; HWANG, T. S. Effect of compatibilizing agents on rice-husk flour reinforced polypropylene composites **Composite Structures**, v.77, n. 1, pp. 45–55, 2007.

YOUNGQUIST, J. A. Wood-base Composites and Panel Products. In: **Handbook-The Encyclopedia of Wood**. Madison, WI: U.S.Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Skyhorse Publishing 496 p. 2013. Cap. 10. p. 1-31.

APÊNDICE A- Análise Termomecânica

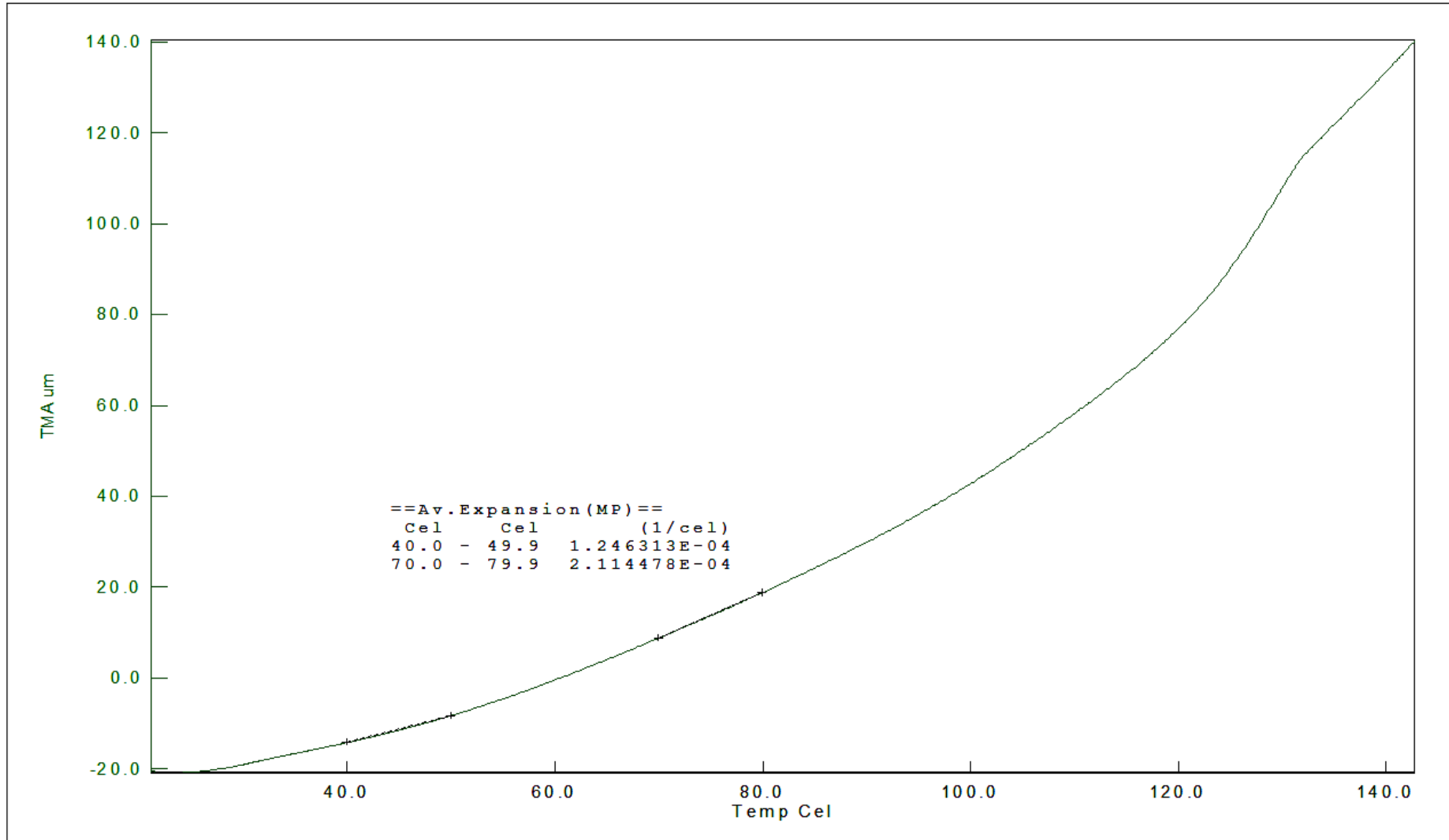
Nas Figuras A1 e A2 são apresentados os resultados obtidos pela análise térmica – Termomecânica (TMA).

Figura A1- Curva TMA do plástico madeira



Fonte: Autoria própria

Figura A2- Curva TMA da madeira plástica

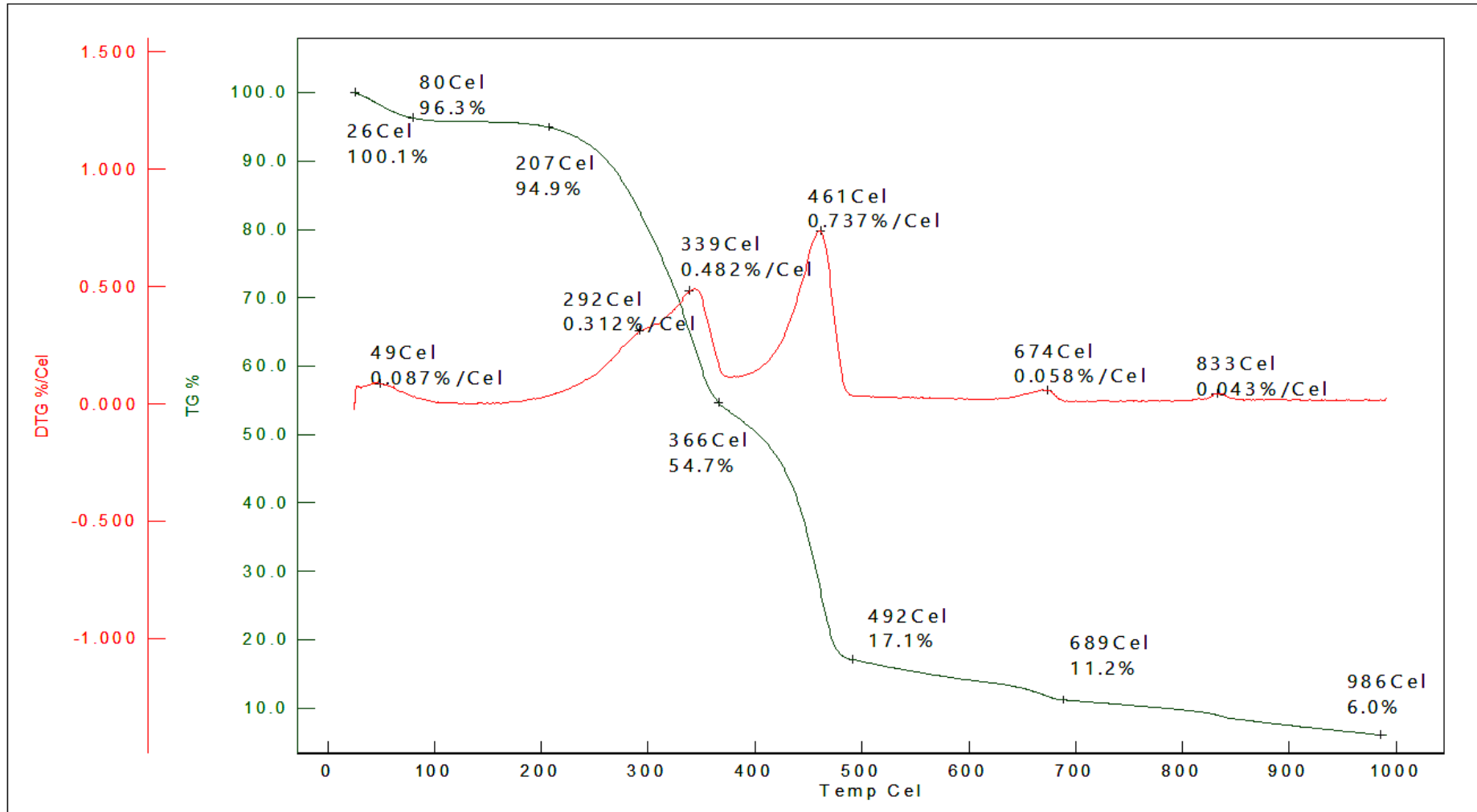


Fonte: Autoria própria

APÊNDICE B- Análise Termogravimétrica

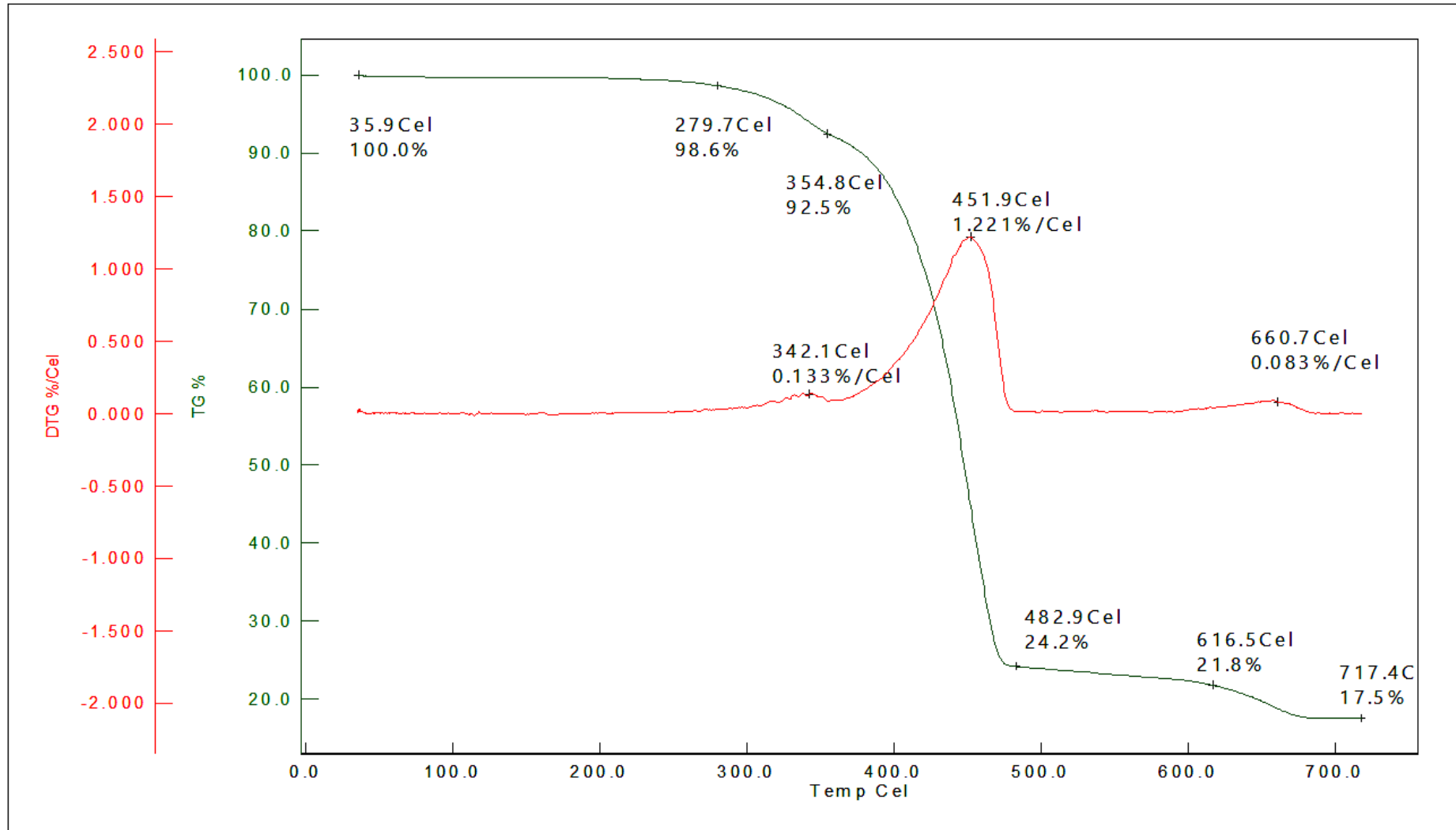
Nas Figuras B1 e B2 são apresentados os resultados obtidos pela análise térmica - Termogravimetria TGA (TG/DTG).

Figura B1- Curva de TGA (TG/DTG) do plástico madeira



Fonte: Autoria própria

Figura B2- Curva de TGA (TG/DTG) da madeira plástica



Fonte: Autoria própria

APÊNDICE C- Consumo de potência



Nas Tabelas C1 a C3 são apresentados os resultados obtidos pela análise estatística, para o consumo médio da potência, pelos dois critérios utilizados, ou seja, através da tabela de distribuição $F_{5\%}$, onde $F_{\text{calculado}} > F_{\text{critico}}$ existe a influência significativa do fator ou pelo critério proposto por Phadke (1989), onde um $F_{\text{calculado}} > 2$ já deve ser considerado, pois isso significa que o valor obtido é no mínimo duas vezes maior que o erro.

Através da análise de variância (Tabela C1), verificou-se que somente o tipo de material não apresentou uma influência significativa no processo e que a velocidade de avanço foi o fator que apresentou uma maior influência no processo no consumo de potência no fresamento tangencial.

Tabela C1- Análise de variância (ANOVA) dos efeitos das médias para o consumo de potência no fresamento tangencial

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados do Fator	Graus de Liberdade	Soma Média Quadrática	$F_{\text{calculado}}$	F_{critico}
Sentido de corte	6112,49	1	6112,49	13,15	5,12
Material	548,44	1	548,44	1,18	5,12
Vc	25201,58	2	12600,79	27,11	4,26
Vf	57571,99	2	28785,99	61,94	4,26
ap	6819,37	2	3409,69	7,34	4,26
Soma dos Quadrados do Erro	4182,64	9	464,74		
Soma Total do Quadrado	100436,52				



*Vc=Velocidade de corte; Vf= velocidade de avanço; ap= profundidade de corte.

 $F_{\text{calculado}} > F_{\text{critico}}$  $F_{\text{calculado}} > 2$

Através da análise de variância (Tabela C2), verificou-se que o único fator que não influenciou significativamente no consumo de potência no processo de fresamento frontal é a profundidade de corte e que o tipo de material usinado apresenta a maior influência no processo.

Tabela C2- Análise de variância (ANOVA) dos efeitos das médias para o consumo de potência no fresamento frontal



Fonte de Variação	Soma dos Quadrados do Fator	Graus de Liberdade	Soma Média Quadrática	F _{calculado}	F _{crítico}
Material	143102,29	1	143102,29	101,43	4,96
Vc	30607,85	2	15303,93	10,85	4,10
Vf	61988,97	2	30994,49	21,97	4,10
ap	5181,53	2	2590,76	1,84	4,10
Soma dos Quadrados do Erro	14107,92	10	1410,79		
Soma Total do Quadrado	52,55				

 $F_{\text{calculado}} > F_{\text{crítico}}$  $F_{\text{calculado}} > 2$

Por meio da análise de variância (Tabela C3), verificou-se que a velocidade de corte foi o fator que apresentou uma maior influência na furação e que a velocidade de avanço é o fator que não possui influência significativa no consumo de potência no processo de furação.

Tabela C3- Análise de variância (ANOVA) dos efeitos das médias para o consumo de potência na furação

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados do Fator	Graus de Liberdade	Soma Média Quadrática	F _{calculado}	F _{crítico}
Material	882,37	1	882,37	4,13	10,13
Vc	4628,29	2	2314,14	10,82	9,55
Vf	304,22	2	152,11	0,71	9,55
Soma dos Quadrados do Erro	641,55	3	213,85		
Soma Total do Quadrado	6456,44				

 $F_{\text{calculado}} > F_{\text{crítico}}$  $F_{\text{calculado}} > 2$

APÊNDICE D-Vibração média



Nas Tabelas D1 a D3 são apresentados os resultados obtidos pela análise estatística, para a vibração média do sistema, pelos dois critérios utilizados, ou seja, através da tabela de distribuição $F_{5\%}$, onde $F_{\text{calculado}} > F_{\text{critico}}$ existe a influência significativa do fator ou pelo critério proposto por Phadke (1989), onde um $F_{\text{calculado}} > 2$ já deve ser considerado, pois isso significa que o valor obtido é no mínimo duas vezes maior que o erro.

Por meio da análise de variância (Tabela D1), verificou-se que tanto a velocidade de avanço como a profundidade de corte são fatores que não influenciam significativamente na vibração durante o processo de fresamento tangencial e que o tipo de material usinado é o fator de maior influência no processo.

Tabela D1- Análise de variância (ANOVA) dos efeitos das médias na vibração no fresamento tangencial

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados do Fator	Graus de Liberdade	Soma Média Quadrática	$F_{\text{calculado}}$	F_{critico}
Sentido de corte	7,96	1	7,96	3,03	5,12
Material	182,82	1	182,82	69,62	5,12
Vc	25,30	2	12,65	4,82	4,26
Vf	9,43	2	4,72	1,80	4,26
ap	5,69	2	2,85	1,08	4,26
Soma dos Quadrados do Erro	23,64	9	2,63		
Soma Total do Quadrado	254,84				



*Vc=Velocidade de corte; Vf= velocidade de avanço; ap= profundidade de corte.

 $F_{\text{calculado}} > F_{\text{critico}}$  $F_{\text{calculado}} > 2$

Através da análise de variância (Tabela D2), verificou-se que somente o tipo de material usinado apresenta influência significativa no processo de fresamento frontal.

Tabela D2- Análise de variância (ANOVA) dos efeitos das médias na vibração no fresamento frontal



Fonte de Variação	Soma dos Quadrados do Fator	Graus de Liberdade	Soma Média Quadrática	F _{calculado}	F _{crítico}
Material	996,65	1	996,65	72,22	4,96
Vc	1,19	2	0,60	0,04	4,10
Vf	31,52	2	15,76	1,15	4,10
ap	38,64	2	19,32	1,40	4,10
Soma dos Quadrados do Erro	138,01	10	13,80		
Soma Total do Quadrado	1221,33				

 $F_{\text{calculado}} > F_{\text{crítico}}$  $F_{\text{calculado}} > 2$

Por meio da análise de variância (Tabela D3), verificou-se que somente a velocidade de corte não apresentou uma influência significativa no processo de furação.

Tabela D3- Análise de variância (ANOVA) dos efeitos das médias na vibração na furação

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados do Fator	Graus de Liberdade	Soma Média Quadrática	F _{calculado}	F _{crítico}
Material	0,02	1	0,02	26,61	10,13
Vc	0,002	2	0,001	1,52	9,55
Vf	0,004	2	0,002	2,57	9,55
Soma dos Quadrados do Erro	0,002	3	0,001		
Soma Total do Quadrado	0,03				

 $F_{\text{calculado}} > F_{\text{crítico}}$  $F_{\text{calculado}} > 2$

APÊNDICE E- Aquecimento das peças durante a usinagem



Nas Tabelas E1 e E2 são apresentados os resultados obtidos pela análise estatística, para o aquecimento das peças durante a usinagem, pelos dois critérios utilizados, ou seja, através da tabela de distribuição $F_{5\%}$, onde $F_{\text{calculado}} > F_{\text{critico}}$ existe a influência significativa do fator ou pelo critério proposto por Phadke (1989), onde um $F_{\text{calculado}} > 2$ já deve ser considerado, pois isso significa que o valor obtido é no mínimo duas vezes maior que o erro.

Através da análise de variância (Tabela E1), verificou-se que os únicos fatores estatisticamente significativos no aquecimento das peças durante o processo de fresamento tangencial foram o tipo de material usinado e a profundidade de corte empregada.

Tabela E1- Análise de variância (ANOVA) dos efeitos das médias no aquecimento das peças durante o processo de fresamento tangencial

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados do Fator	Graus de Liberdade	Soma Média Quadrática	$F_{\text{calculado}}$	F_{critico}
Sentido de corte	14,16	1	14,16	0,85	5,12
Material	90,04	1	90,04	5,38	5,12
Vc	1,84	2	0,92	0,06	4,26
Vf	2,95	2	1,48	0,09	4,26
ap	66,97	2	33,49	2,00	4,26
Soma dos Quadrados do Erro	150,68	9	16,74		
Soma Total do Quadrado	326,65				

*Vc=Velocidade de corte; Vf= velocidade de avanço; ap= profundidade de corte.

 $F_{\text{calculado}} > F_{\text{critico}}$  $F_{\text{calculado}} > 2$

Através da análise de variância (Tabela E2), verificou-se que os únicos fatores que tiveram influência significativa no aquecimento das peças durante o processo de fresamento frontal foram o tipo de material usinado e a velocidade de avanço.

Tabela E2- Análise de variância (ANOVA) dos efeitos das médias no aquecimento das peças durante o processo de fresamento frontal

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados do Fator	Graus de Liberdade	Soma Média Quadrática	F _{calculado}	F _{crítico}
Material	962,03	1	962,03	32,76	4,96
Vc	112,40	2	56,20	1,91	4,10
Vf	292,14	2	146,07	4,97	4,10
Ap	4,30	2	2,15	0,07	4,10
Soma dos Quadrados do Erro	293,61	10	29,36		
Soma Total do Quadrado	1684,97				



F_{calculado} > F_{crítico}



F_{calculado} > 2

APÊNDICE F- Rugosidade


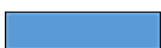
Nas Tabelas F1 A F3 são apresentados os resultados obtidos pela análise estatística, para a rugosidade média (R_a) e para a largura média dos elementos do perfil de rugosidade (R_{Sm}), pelos dois critérios utilizados, ou seja, através da tabela de distribuição $F_{5\%}$, onde $F_{calculado} > F_{critico}$ existe a influência significativa do fator ou pelo critério proposto por Phadke (1989), onde um $F_{calculado} > 2$ já deve ser considerado, pois isso significa que o valor obtido é no mínimo duas vezes maior que o erro.

Através da análise de variância (Tabela F1), verificou-se todos os fatores apresentaram influência significativa no processo de fresamento tangencial, sendo o fator de maior influência no processo o tipo de material usinado.

Tabela F1- Análise de variância (ANOVA) dos efeitos das médias na rugosidade média (R_a) no fresamento tangencial

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados do Fator	Graus de Liberdade	Soma Média Quadrática	$F_{calculado}$	$F_{critico}$
Sentido de corte	2,28	1	2,28	3,29	5,12
Material	40,63	1	40,63	58,68	5,12
Vc	10,12	2	5,06	7,31	4,26
Vf	4,96	2	2,48	3,58	4,26
ap	11,01	2	5,51	7,95	4,26
Soma dos Quadrados do Erro	6,23	9	0,69		
Soma Total do Quadrado	75,22				



*Vc=Velocidade de corte; Vf= velocidade de avanço; ap= profundidade de corte.

 $F_{calculado} > F_{critico}$  $F_{calculado} > 2$

Por meio da análise de variância (Tabela F2), verificou-se que somente o sentido de corte e o tipo de material usinado apresentaram influência estatisticamente significativa no processo de fresamento frontal, sendo o fator material o de maior influência no processo.

Tabela F2- Análise de variância (ANOVA) dos efeitos das médias na rugosidade média (Ra) no fresamento frontal

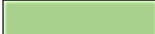

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados do Fator	Graus de Liberdade	Soma Média Quadrática	F _{calculado}	F _{crítico}
Sentido de corte	3,48	1	3,480	2,20	5,12
Material	22,33	1	22,33	14,08	5,12
Vc	4,92	2	2,46	1,55	4,26
Vf	2,20	2	1,10	0,69	4,26
ap	5,36	2	2,68	1,69	4,26
Soma dos Quadrados do Erro	14,27	9	1,59		
Soma Total do Quadrado	52,55				

 F_{calculado} > F_{crítico}  F_{calculado} > 2

Por meio da análise de variância (Tabela F3), verificou-se que o tipo de material usado e a velocidade de avanço foram os fatores que apresentaram influência estatisticamente significativa no processo de furação, quando analisada a largura média dos elementos do perfil de rugosidade (RSm).

Tabela F3- Análise de variância (ANOVA) dos efeitos das médias na rugosidade (RSm) na furação



Fonte de Variação	Soma dos Quadrados do Fator	Graus de Liberdade	Soma Média Quadrática	F _{calculado}	F _{crítico}
Material	0,086	1	0,086	154,56	10,13
Vc	0,001	2	0,001	1,08	9,55
Vf	0,004	2	0,002	3,82	9,55
Soma dos Quadrados do Erro	0,002	3	0,001		
Soma Total do Quadrado	0,093				

 F_{calculado} > F_{crítico}  F_{calculado} > 2

Quando analisada a rugosidade média, no processo de furação, por meio da análise de variância (Tabela F4), verificou-se que somente o tipo de material usinado apresentou influência estatisticamente significativa no processo de furação.

Tabela F4- Análise de variância (ANOVA) dos efeitos das médias na rugosidade média (Ra) na furação

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados do Fator	Graus de Liberdade	Soma Média Quadrática	F _{calculado}	F _{crítico}
Material	19,24	1	19,24	38,57	10,13
Vc	1,34	2	0,67	1,34	9,55
Vf	1,33	2	0,67	1,34	9,55
Soma dos Quadrados do Erro	1,50	3	0,50		
Soma Total do Quadrado	23,41				

 $F_{\text{calculado}} > F_{\text{crítico}}$  $F_{\text{calculado}} > 2$