

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL

GABRIEL RIZZON

**ANÁLISE DO DESGASTE EM FERRAMENTAS NO PROCESSO DE SERRAMENTO DE
PAINÉIS DE MADEIRA RECONSTITUÍDA**

**CAXIAS DO SUL
2017**

GABRIEL RIZZON

**ANÁLISE DO DESGASTE EM FERRAMENTAS NO PROCESSO DE SERRAMENTO DE
PAINÉIS DE MADEIRA RECONSTITUÍDA**

Trabalho de conclusão da disciplina de Estágio II apresentado à Universidade de Caxias do Sul como pré-requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.
Área de concentração: Processos de Fabricação

Supervisor: Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann

**CAXIAS DO SUL
2017**

GABRIEL RIZZON

ANÁLISE DO DESGASTE EM FERRAMENTAS NO PROCESSO DE SERRAMENTO DE
PAINÉIS DE MADEIRA RECONSTITUÍDA

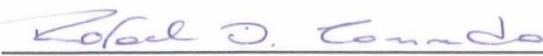
Trabalho de conclusão da disciplina de Estágio II apresentado à Universidade de Caxias do Sul como pré-requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Processos de Fabricação

APROVADO EM 12 / 7 / 2017

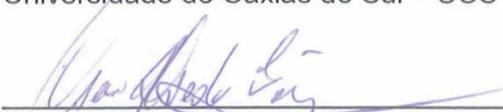
Banca Examinadora:



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



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



Prof. Dr. Oscar Alfredo Garcia de Suarez
Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me iluminado e abençoado o meu caminho até o final desta caminhada.

Ao meu Pai Jorge e minha Mãe Humildes, exemplos de superação e humildade que construíram sua vida através do trabalho e da educação. Só foi possível alcançar este objetivo graças a educação, carinho, amizade e companheirismo que me proporcionaram durante toda minha vida.

Aos meus irmãos Junior e Camila, sempre presentes em todos os momentos, obrigado pela amizade e companheirismo.

A minha namorada e companheira Julia, pessoa fantástica que me acompanhou durante toda esta caminhada e que me ajudou tornar possível este sonho. Graças ao seu amor, carinho, amizade e incentivo foi possível finalizar esta etapa.

A Admar, Josefina e Marina, por serem uma segunda família, sempre me apoiando.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann, pela paciência, colaboração, respeito e tempo dedicado a me orientar, dividindo seu conhecimento e contribuindo para o sucesso do trabalho.

A empresa BRS Indústria de Móveis, pelo incentivo a minha formação acadêmica e também ao investimento nos experimentos propostos e executados no trabalho, me propiciando um crescimento pessoal e profissional.

A empresa Leitz Ferramentas para Madeira, pela disponibilidade e colaboração com o trabalho.

Aos amigos, familiares e colegas que me acompanharam e me ajudaram no decorrer desta jornada, e que de alguma forma contribuíram positivamente para o meu crescimento e conclusão deste desafio.

RESUMO

O presente trabalho refere-se à aplicação do estudo de desgaste das ferramentas adotadas no processo de corte de painéis de madeira reconstituída. O processo analisado é o de serramento com serras circulares. Tal estudo foi desenvolvido na Bontempo Móveis Ltda. O objetivo do trabalho foi avaliar os desgastes das ferramentas de metal duro e diamante. Este estudo avaliou as principais características dos materiais empregados nas ferramentas, levando em consideração fatores como a vida útil da ferramenta, mecanismos de desgaste, acabamento proporcionado e o custo. Foram utilizadas ferramentas com pastilhas de diamante e metal duro, ambas foram submetidas as mesmas condições de corte nos testes aplicados, afim de, comparar somente a influência dos materiais que compõem a ferramenta, sem a variação dos demais fatores como maquinário, velocidades de corte e avanço, geometria da ferramenta, propriedades da madeira, entre outros. Os resultados obtidos apontam a maior durabilidade das ferramentas de diamante, e conseqüentemente seu custo inferior considerando os metros seccionados e desgastes apresentados por ambas ferramentas, mesmo as diamantadas apresentando um investimento inicial mais elevado. A escolha da ferramenta a ser adotada no processo de corte, deve levar em consideração os fatores de maior relevância para a empresa. O método utilizado no trabalho permite uma avaliação correta das ferramentas adotadas neste processo e também se aplica aos demais processos de usinagem presentes nas indústrias.

Palavras-chave: Processos de usinagem. Serramento de madeira. Serras circulares. Painéis de madeira reconstituída.

ABSTRACT

The present work refers to the application of the wear study of the tools adopted in the process of cutting reconstituted wood panels. The process analyzed is sawing with circular saws. Such study was developed at Bontempo Móveis Ltda. The objective of the study was to evaluate the wear of the carbide and diamond tools. This study evaluated the main characteristics of the materials used in the tools, taking into account factors such as tool life, wear mechanisms, proportioned finishing and cost. Tools were used with diamond and carbide inserts, both of which were subjected to the same cutting conditions in the applied tests, in order to compare only the influence of the materials that compose the tool, without the variation of other factors such as machinery, cutting speeds and Advancement, tool geometry, wood properties, among others. The obtained results point to the greater durability of the diamond tools, and consequently their lower cost considering the sectioned meters and wear presented by both tools, even diamonds with a higher initial investment. The choice of the tool to be adopted in the cutting process should take into account the factors of greater relevance to the company. The method used in the work allows a correct evaluation of the tools adopted in this process and also applies to the other machining processes present in the industries.

Keywords: Machining processes. Wood sawing. Circular saws. Panels of reconstituted wood.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Indústria e franquias da marca Bontempo.....	13
Figura 2 – Ambiente residencial com cozinha Bontempo.....	14
Figura 3 – Os três principais eixos da madeira com relação à direção das fibras	17
Figura 4 – Ilustração da composição dos painéis de madeira reconstituída MDP e MDF. ...	18
Figura 5 – Esquema do processo de produção de painéis de madeira reconstituída	19
Figura 6 – Movimentos ativos de usinagem.....	22
Figura 7 – Processos de serramento retilíneo e circular.	23
Figura 8 – Movimentos de corte concordante e discordante.	24
Figura 9 – Principais modelos de máquinas e ferramentas para operação de serramento .	25
Figura 10 – Detalhe das fendas de alívio: (a) externas e (b) internas.	27
Figura 11 – Modelos de dentes para serras circulares, classificados conforme a utilização	28
Figura 12 – Gráfico para definição dos materiais adequados nos processos de usinagem..	29
Figura 13 – Relação custo-benefício das ferramentas de metal duro x diamantadas.....	31
Figura 14 – Desgastes de flanco, cratera e lascamento.....	32
Figura 15 – Regiões da cunha de corte das ferramentas.....	32
Figura 16 – Imagem ilustrativa da máquina Seccionadora SELCO EBTR-108.....	35
Figura 17 – Princípio de corte da máquina Seccionadora SELCO EBTR-108.....	36
Figura 18 – Estereoscópico Universal Entex, modelo TNE-10B	36
Figura 19 – Características da serra circular com pastilhas de metal duro.....	37
Figura 20 - Características da serra circular com pastilhas de diamante (PCD)	38
Figura 21 – Fluxograma das atividades propostas.....	39
Figura 22 – Parâmetros de corte experimentais.....	42
Figura 23 – Altura de corte da serra riscadora.	43
Figura 24 – Lascamento dos painéis devido ao desalinhamento das serras.....	44
Figura 25 – Ajuste lateral e vertical da serra riscadora.....	44
Figura 26 – Software Optplanning, responsável pela geração de planos de corte.	45
Figura 27 – Recurso estatístico Seccionadora SELCO EBTR 108.....	45
Figura 28 – Imagens do desgaste de flanco máximo (VB_{max}) do experimento 1.	47
Figura 29 – Desgaste de flanco em ferramentas de corte.....	49
Figura 30 – Imagens do desgaste de flanco máximo (VB_{max}) do experimento 2.	51
Figura 31 – Imagens do desgaste de flanco máximo (VB_{max}) do experimento 3.	55
Figura 32 – Dados comparativos: experimento 1 X experimento 2.	57
Figura 33 – Gráfico comparativo: perímetro de corte X profundidade de corte.....	58
Figura 34 – Dados comparativos: experimento 1 X experimento 3.	59
Figura 35 – Dados comparativos: serramento com ferramentas de metal duro e diamante.	60

LISTA DE QUADRO E TABELAS

Quadro 1 – Detalhamento das atividades dos experimentos 1,2 e 3.....	40
Tabela 1 – Coleta de dados do experimento 1.....	46
Tabela 2 – Valores desgaste de flanco máximo (VB_{max}) do experimento 1.....	48
Tabela 3 – Coleta de dados do experimento 2.....	50
Tabela 4 – Valores desgaste de flanco máximo (VB_{max}) do experimento 2.....	52
Tabela 5 – Coleta de dados do experimento 3.....	52
Tabela 6 – Valores desgaste de flanco máximo (VB_{max}) do experimento 3.....	56
Tabela 7 – Custo de operação (R\$/m) – Ferramenta metal duro x diamante.....	61
Tabela 8 – Custo de operação (R\$/m ²) – Ferramenta metal duro x diamante.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIPA	Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
FF	Fenol-formaldeído
HSS	<i>High Speed Steel</i>
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
MDP	<i>Medium Density Particleboard</i>
MUF	Melamina-uréia-formaldeído
PCD	Diamante policristalino
TF	Tanino-formaldeído
UF	Uréia-formaldeído

LISTA DE SÍMBOLOS

f	Avanço (mm)
a_e	Profundidade de corte (mm)
a_p	Largura de corte (mm)
V_c	Velocidade de corte (m/s)
V_f	Velocidade de avanço (m/min)
VB	Desgaste de flanco (μm)
VB_{max}	Desgaste de flanco máximo (μm)
L	Distância percorrida de corte (mm)
n	Rotação (rpm)
P	Pressão (Pa)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	PERFIL DA ORGANIZAÇÃO E AMBIENTE DE ESTÁGIO	12
1.2	JUSTIFICATIVA	15
1.3	OBJETIVOS DO ESTÁGIO	15
1.3.1	Objetivo geral	15
1.3.2	Objetivos específicos	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	A MADEIRA	17
2.1.1	Painéis de madeira	18
2.1.1.1	Painel MDP (<i>Medium Density Particleboard</i>).....	19
2.1.1.2	Painel MDF (<i>Medium Density Fiberboard</i>)	20
2.2	PROCESSOS DE USINAGEM.....	21
2.2.1	Grandezas de usinagem	21
2.2.2	Processo de serramento	22
2.2.2.1	Serramento da madeira.....	24
2.2.3	Ferramentas para serramento	25
2.2.3.1	Ferramentas para serramento de madeira	26
2.2.4	Materiais para ferramentas de corte	28
2.2.4.1	Ferramentas de metal duro	30
2.2.4.2	Ferramentas de diamante	30
2.2.5	Desgastes das ferramentas de corte	32
2.2.6	Geometria de cavacos	34
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	35
3.1	MÁQUINAS.....	35
3.2	FERRAMENTAS.....	37
3.3	MATERIAIS.....	38
3.4	ESTRATÉGIA DE APLICAÇÃO	38
3.5	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	40
4	RESULTADOS E ANÁLISE	42
4.1	APLICAÇÕES DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	42
4.2	RESULTADOS DOS PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	46
4.2.1	Procedimento experimental 1: Ferramenta de metal duro	46

4.2.2	Procedimento experimental 2: Ferramenta de diamante	50
4.2.3	Procedimento experimental 3: Ferramenta de diamante	52
4.3	ANÁLISE COMPARATIVA DOS EXPERIMENTOS	57
4.3.1	Comparativo dos experimentos: metal duro X diamante	57
4.3.2	Relação custo-benefício: diamante X metal duro	60
5	CONCLUSÕES.....	62
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	64
	BIBLIOGRAFIA.....	65

1 INTRODUÇÃO

Os processos de usinagem estão presentes em nosso dia-a-dia, onde podem ser evidenciados nos mais diversos produtos e bens de consumo. Segundo Stemmer (1995), toda operação de usinagem consiste na retirada de material em formas de cavaco utilizando ferramentas de corte com movimento rotativo e uma determinada velocidade de avanço, afim de, transformar nas mais diversas formas uma matéria-prima. Atualmente, destacam-se como os principais processos de usinagem nas indústrias moveleiras, as operações de corte, fresamento e furação que se utilizam respectivamente de serras, fresas e brocas como ferramentas de corte. A constante evolução dos projetos de móveis planejados, obriga as indústrias a buscarem cada vez mais ferramentas de usinagem capazes de atender a todas variações presentes no processo produtivo, sejam elas diferentes matérias-primas ou as diversas formas geométricas empregadas, mantendo um alto nível de produtividade.

O segmento de móveis planejados para linha residencial, utiliza basicamente como matéria-prima dois materiais provindos de madeiras reflorestadas (eucalipto e pinus), são eles o MDP (*Medium Density Particleboard*) e o MDF (*Medium Density Fiberboard*). Ambos são fabricados por meio do mesmo processo e empregam a mesma tecnologia produtiva, sendo diferenciados somente na sua composição estrutural, o MDF é composto por fibras de madeira, enquanto o MDP é formado por partículas. Estes materiais passam por processos de usinagem, onde são envolvidas as mais diversificadas ferramentas, afim de, transformar os materiais em um produto final (BERNECK, 2016; MASISA, 2016).

As ferramentas de usinagem variam suas geometrias, finalidades e materiais. As usinagens na madeira, utilizam geralmente ferramentas de aço rápido, metal duro ou diamante. Elas devem resistir ao elevado desgaste dos gumes e também as possíveis falhas durante a usinagem. Dentre os principais fatores que contribuem para o desgaste das ferramentas destacam-se a elevada abrasão da madeira e as imperfeições do material, que podem acarretar a quebra da ferramenta. As ferramentas têm grande influência no custo final da peça, sendo elas responsáveis por garantir a qualidade dos produtos e uma elevada capacidade produtiva. Por isso, o aumento da vida útil das ferramentas é de suma importância para que as indústrias moveleiras se tornem mais competitivas, reduzindo custos com ferramentas e mantendo a qualidade de fabricação (FERNANDES, 2009).

1.1 PERFIL DA ORGANIZAÇÃO E AMBIENTE DE ESTÁGIO

A BRS Indústria de Móveis Ltda, situa-se na cidade de São Marcos na rua José Michelin, 270 no Bairro Industrial da cidade, onde constituiu-se no ano de 1978. Atualmente possui uma área fabril superior a 20.000 m² e aproximadamente 300 colaboradores. O foco

inicial de mercado voltava-se a móveis para jardins como mesas, cadeiras, acessórios para móveis, guarda-sóis, almofadas e colchões. No ano de 1980, a organização galgou rumos diferentes, mudando sua linha de produtos, passando então a desenvolver e planejar dormitórios populares. Pode-se dizer que esse novo projeto objetivava a venda em massa

No ano de 1988, após uma crise a organização passou por uma reestruturação em sua linha de produtos. Nesse período a empresa começou a desenvolver, e a oferecer um móvel com estruturação diferenciada, com um novo sistema de abertura de portas, até então desconhecido no Brasil (*Portas Free Open*). Com uma visão modificada de mercado a organização visou a comercialização de seus móveis planejados por meio do sistema de franquias. Cabe mencionar que essa forma de comércio é adotada até hoje. Atualmente a rede é constituída por 42 franquias exclusivas da marca com mais de 1500 colaboradores. Essas, encontram-se nas principais capitais do Brasil e demais regiões consideradas como grandes polos econômicos do país. No exterior, há uma franquia situada na cidade de Punta Del Este, Uruguai. No ano 2000, a Bontempo deu início as atividades de exportação, exportando inicialmente para os Estados Unidos da América. Desde então a empresa passou a atuar no mercado internacional. Hoje as vendas da organização feitas por meio das franquias representam 95% do faturamento total, os 5% restantes podem ser divididos entre as exportações, empreendimentos hoteleiros e mercado varejista. Na Figura 1, pode-se visualizar imagens da indústria e uma loja da rede de franquias.

Figura 1 – Indústria e franquia da marca Bontempo



Fonte: autor (2017)

Atualmente, a Bontempo é uma marca que personaliza e desenvolve móveis planejados de alto padrão para linha residencial, tendo como principais consumidores o

público de elevado padrão e alto poder aquisitivo. Tem como foco principal a customização de seus produtos, sendo capaz de atender aos desejos de seus clientes e aos mais diversificados projetos. Cabe salientar que a presente organização constitui uma forma de relacionamento bastante particular com seus consumidores, onde, cada cliente é atendido com um projeto personalizado e único. A Bontempo executa projetos para diferentes ambientes residenciais como, dormitórios, cozinhas, *Home Theater*, *Home Office*, lavabos e áreas de serviço. A personalização e o elevado padrão ofertados pela marca, ficam visíveis na Figura 2. A imagem ilustra uma cozinha residencial, da linha de produtos Avanti Cucina, comercializada pela Bontempo.

Figura 2 – Ambiente residencial com cozinha Bontempo



Fonte: adaptado de Bontempo (2016)

As principais matérias-primas utilizadas na linha de produtos são provenientes da madeira. São utilizados hoje dois tipos de materiais oriundos da madeira, sendo eles o MDP (*Medium Density Particleboard*) e o MDF (*Medium Density Fiberboard*), os dois são fornecidos em formatos de chapas planas com diferentes espessuras. Eles possuem processos de fabricação idênticos e com a mesma tecnologia aplicada, somente se diferem quanto à formação estrutural, sendo por partículas de madeira no MDP e por fibras no MDF. Cabe mencionar que os dois processos são compostos pelas mesmas espécies de madeira, e que todas são originárias de florestas plantadas. O material MDP é caracterizado por possuir uma lamina celulósica impregnada com resina melamínica fundida em suas faces, essa lamina pode receber diversos acabamentos, como sólidos, amadeirados, entre outros. O material MDF é geralmente utilizado em produtos que recebem revestimento superficial feito por meio de pintura líquida, disponível nas versões microtextura ou brilhante, e também na fabricação

de peças que possuam usinagens, entalhes ou rebaixas. Outro material composto utilizado é o MDP bruto com aplicação de revestimento em Lamina natural de madeira. Hoje, esta variedade de materiais utilizados possibilita que a marca ofereça ao mercado aproximadamente 150 opções de acabamentos. O foco da empresa na customização de cada projeto, pode ser evidenciado no posicionamento da marca apresentado ao mercado “Espaços Únicos, Possibilidades Infinitas”.

1.2 JUSTIFICATIVA

Com a atual crise político-econômica que atravessa nosso país o mercado se torna cada dia mais competitivo, sendo assim as organizações se veem obrigadas a buscar novas soluções para a manufatura dos seus produtos, que impactem diretamente na redução dos custos de fabricação e conseqüentemente numa maior margem de lucro. Os processos de usinagem possuem grande influência nos custos de fabricação na indústria moveleira. Todo produto fabricado passa pelo menos por um processo de usinagem, sendo assim de suma importância analisar cada processo e buscar aperfeiçoá-los para que se alcance o melhor desempenho possível das ferramentas de usinagem.

No atual cenário das indústrias moveleiras, fica evidente que na grande maioria das organizações, os estudos e análises das ferramentas adotadas nas operações de usinagem, afim de, justificar a utilização das mesmas não são desenvolvidos com a frequência e de maneira adequada. As altas direções consideram o investimento em melhorias nos processos de usinagem algo sem garantia de retorno financeiro, e acreditam que em virtude do tempo necessário para as análises e experimentos o processo produtivo da empresa sofra uma queda de rendimento. Atualmente, as organizações utilizam como parâmetros de usinagem as recomendações dos fornecedores, podendo assim gerar dúvidas quanto aos métodos utilizados para escolha das ferramentas e possíveis subdimensionamentos ou superdimensionamentos dos elementos utilizados.

Neste cenário apresentado fundamenta-se a justificativa do desenvolvimento deste trabalho, visando estabelecer um comparativo entre as ferramentas de metal duro e diamante adotadas no processo de serramento.

1.3 OBJETIVOS DO ESTÁGIO

1.3.1 Objetivo geral

Avaliar o desgaste de ferramentas com pastilhas de diamante e metal duro, aplicadas na usinagem de materiais compostos por madeira.

1.3.2 Objetivos específicos

- Compreender os processos de usinagem através de revisão bibliográfica.
- Desenvolver procedimento teórico para avaliar através de teste experimental o desgaste das ferramentas.
- Executar o teste experimental.
- Comparar os desgastes apresentados nas ferramentas diamantadas e de metal duro.
- Estabelecer comparativo entre ferramentas diamantadas e de metal duro pela relação de custo-benefício.

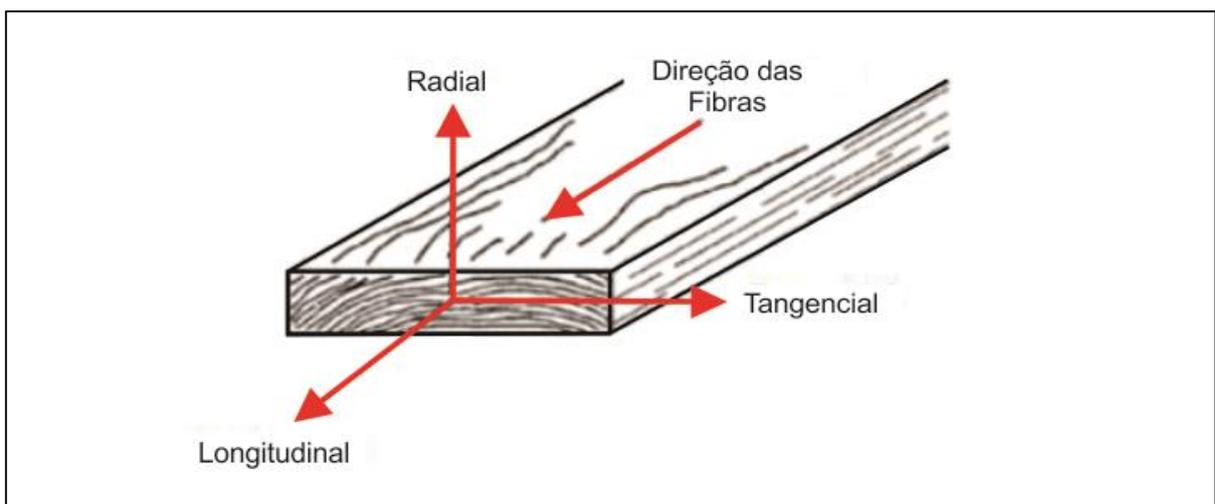
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A MADEIRA

A madeira é um material orgânico complexo, pois é formado por muitas variedades de células e elementos químicos agindo em conjunto para suprir as necessidades de uma planta, sendo ela um organismo vivo. Ao tentar compreender a madeira no âmbito tecnológico, por vezes, é descartado o fator fundamental de que a planta evolui ao decorrer dos anos para suprir suas principais necessidades, como a circulação de água por meio das raízes até suas folhas, a sustentação estrutural da árvore e o acúmulo de matéria bioquímica. Todas as propriedades da madeira sejam elas físicas, químicas ou biológicas, são oriundas do princípio que as mesmas existem para suprir as necessidades da planta viva. Para obtenção destas necessidades, a madeira possui células desenvolvidas e interconectadas capazes de cumprir estas funções (ROSS, 2010).

A madeira pode ser definida como sendo um material anisotrópico, ou seja, um material com propriedades mecânicas únicas e diferenciadas no sentido dos três eixos perpendiculares: longitudinal, radial e tangencial. O eixo longitudinal é paralelo ao sentido das fibras da madeira (grã), já o eixo radial é coincidente aos anéis de crescimento (perpendiculares à grã na direção radial), e o eixo tangencial é perpendicular à grã, mas tangente aos anéis de crescimento. Os principais eixos de direção das fibras da madeira, são ilustrados na Figura 3 (ROSS, 2010).

Figura 3 – Os três principais eixos da madeira com relação à direção das fibras



Fonte: adaptado de Ross (2010)

Segundo a norma ABNT NBR 7190 (1997), são realizados ensaios para a obtenção das propriedades mecânicas das madeiras, afim de caracterizar os tipos de madeira

existentes para a utilização em projetos, os parâmetros adotados para a classificação são: umidade, densidade, estabilidade dimensional, compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras, compressão normal às fibras, tração normal às fibras, cisalhamento, fendilhamento, flexão, dureza, resistência ao impacto na flexão, embutimento, cisalhamento na lâmina de cola, tração normal à lâmina de cola, resistência das emendas dentadas e biseladas. As propriedades que possuem maior influência na fabricação de peças de madeira são a massa específica, o teor de umidade e a presença de defeitos naturais da madeira.

2.1.1 Painéis de madeira

Segundo Mattos, Gonçalves e Chagas (2008), os painéis de madeira são formados por lâminas e diferentes estágios de desagregação da madeira, eles são aglutinados em prensas por meio de pressão e elevadas temperaturas, utilizando resinas na sua composição. O produto substitui a madeira maciça em diversos segmentos, como na fabricação de móveis e pisos. Os painéis surgiram devido a necessidade criada pela falta e pelo custo elevado da madeira maciça. Pode-se dividir os painéis em dois grupos, os fabricados de madeira reconstituída e os produzidos por meio de madeira processada mecanicamente. O painel de madeira reconstituída tem sua produção baseada no processamento químico da madeira, que atravessa diferentes etapas de decomposição. Já o painel de madeira processada mecanicamente tem sua composição por faixas de lâminas ou sarrafos de madeira maciça.

As resinas mais utilizadas frequentemente na produção dos painéis de madeira reconstituída são uréiaformaldeído (UF), melamina-uréia formaldeído (MUF), tanino-formaldeído (TF) e fenolformaldeído (FF) (IWAKIRI,2005).

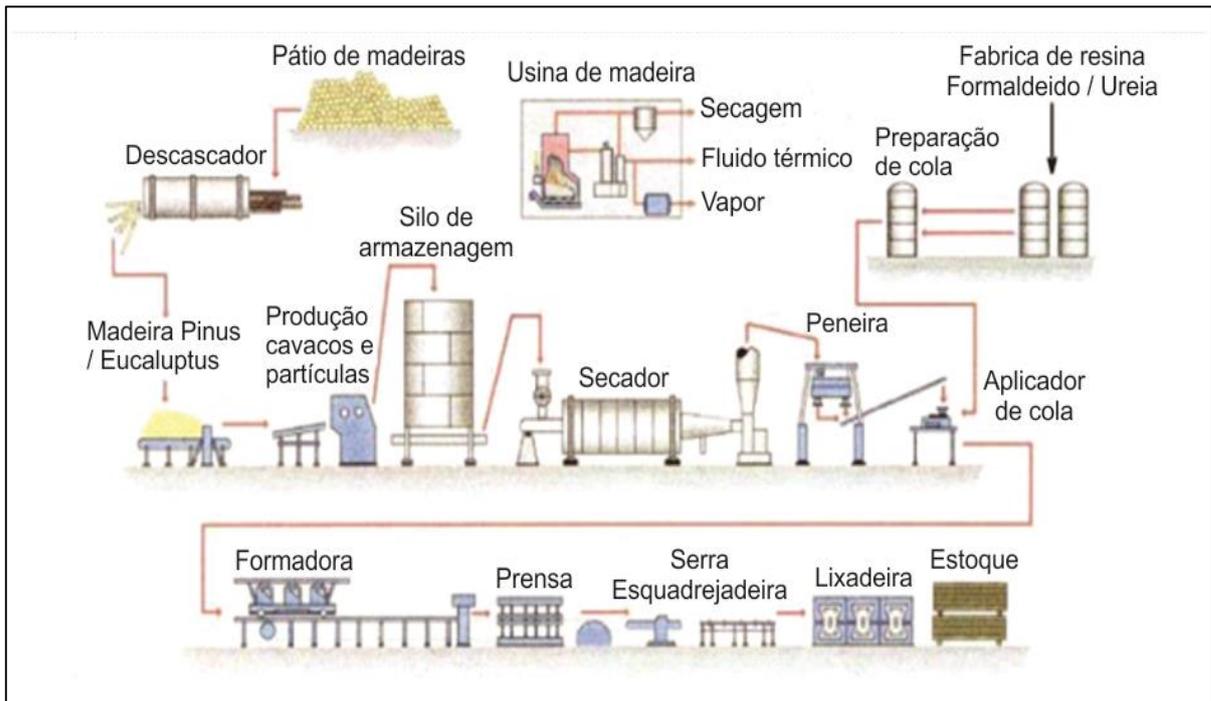
Conforme ABIPA (2013), os dois painéis de madeira mais consumidos hoje no Brasil são o MDP e o MDF, pertencentes ao grupo dos painéis de madeira reconstituída. A composição dos painéis e o processo de fabricação são demonstrados nas Figuras 4 e 5, respectivamente.

Figura 4 – Ilustração da composição dos painéis de madeira reconstituída MDP e MDF



Fonte: adaptado de Masisa do Brasil (2016)

Figura 5 - Esquema do processo de produção de painéis de madeira reconstituída



Fonte: adaptado de Iwakiri (2005)

2.1.1.1 Painel MDP (*Medium Density Particleboard*)

O Painel de madeira MDP, começou a ser desenvolvido em meados de 1941 durante a 2ª guerra mundial na Alemanha. A escassez de madeira obrigou a busca por novas alternativas de utilização desta matéria-prima, foi a partir deste momento que surgiu a ideia da utilização dos resíduos de madeira juntamente com resina provinda do petróleo para a fabricação de painéis de madeira. Após o fim da 2ª guerra mundial, houve uma redução nos avanços de desenvolvimento destes painéis, devido a indisponibilidade de petróleo, o que impactava diretamente na escassez da resina necessária para fabricação do material. Em 1946, com a regularização no fornecimento de resina, houve uma retomada no desenvolvimento e aperfeiçoamento do processo produtivo. Já na década de 1960 o setor passou por uma grande expansão e avanços tecnológicos, o que possibilitou que em 1966 surgisse a primeira indústria de painéis de madeira aglomerados no Brasil (IWAKIRI, 2005).

Atualmente, o MDP é um painel constituído de pequenas partículas de madeira e resina, o processo de união dos materiais é feito por meio de pressão e elevadas temperaturas em prensas. O painel MDP pode ser considerado lignocelulósico, já que é composto de lignocelulose, que pertence a estrutura de resistência da planta, ou seja, da parte fibrosa. O MDP, pode ser considerado a evolução do material conhecido antigamente como aglomerado, diferenciando-se principalmente pela sua maior qualidade superficial (MALONEY, 1993).

Segundo a ABIPA (2013), o painel MDP tem seu processo produtivo controlado por

meio do projeto de Norma ANBT 31:000.18. Os principais requisitos avaliados são: espessura, dimensional, esquadro, retilineidade, teor de umidade, densidade e teor de formaldeído. Os painéis são fabricados utilizando madeiras reflorestadas de Pinus e Eucalipto, a densidade do painel pode variar de 550 a 650 Kg/m³, de acordo com a espessura.

Atualmente, o MDP tem sua maior utilização no setor moveleiro, onde são destinados 89% dos painéis fabricados em território nacional, eles podem ser evidenciados nos mais diversos produtos como portas, divisórias, rodapés, laterais e demais itens que podem compor a estrutura de um móvel (ABIPA, 2013),

2.1.1.2 Painel MDF (*Medium Density Fiberboard*)

Na década de 1960, iniciou-se o desenvolvimento dos painéis MDF, também conhecido como Painel de Fibras de Média Densidade. No entanto, somente na década de 1990 é que houve um aumento na produtividade e comercialização deste produto. No Brasil, a atividade produtiva teve início no ano de 1998, sendo atualmente considerado uma referência mundial em tecnologias para fabricação destes painéis, possuindo linhas produtivas modernas e versáteis (IWAKIRI, 2005).

O MDF é caracterizado por possuir uma excelente estabilidade dimensional, ele está inserido no grupo de painéis de madeira reconstituída, e pode ser denominado pelas siglas *Medium Density Fiberboard* ou Painel de Fibras de Média Densidade. Tem como principal característica a sua fácil usinabilidade, tanto nas faces quanto nas suas bordas, podendo sofrer qualquer processo de usinagem facilmente, isso se deve à sua composição homogênea (ABIPA, 2013).

Conforme ABIPA (2013), os painéis de MDF se utilizam na sua composição de madeiras reflorestadas, geralmente Pinus e Eucalipto. Utiliza-se do mesmo processo de fabricação dos painéis MDP, através de prensagem e compactação por meio de calor e pressão, diferenciando-se apenas na sua formação estrutural que é basicamente composta por fibras de madeira e adição de adesivo sintético.

Ainda segundo ABIPA (2013), o painel MDF tem seu processo produtivo controlado por meio da norma técnica ANBT NBR 15316 (2009). Os principais requisitos avaliados são: espessura, dimensional, esquadro, retilineidade, teor de umidade, densidade e teor de formaldeído. Os painéis são fabricados utilizando madeiras reflorestadas de Pinus e Eucalipto, a densidade do painel pode variar de 650 a 800 kg/m³, e o teor de umidade deve ser menor que 20% na linha de formação.

Atualmente, o MDF é utilizado na indústria moveleira em produtos como portas, frentes de gavetas, tampos, rodapés, mesas, entre outros. Sua principal vantagem em relação ao painel MDP é sua excelente usinabilidade e acabamento, por isso é geralmente adotado em

peças usinadas, chanfradas, boleadas e arredondadas, ou seja, em qualquer peça que venha a sofrer usinagens ou entalhes com geometrias diferenciadas. Desta maneira em determinadas aplicações a madeira maciça, que possui elevado custo e se encontra em escassez, pode ser facilmente substituída pelo MDF sendo mantidas todas as propriedades necessárias (ABIPA, 2013).

2.2 PROCESSOS DE USINAGEM

As operações de usinagem têm como principal finalidade transformar uma matéria-prima em uma peça, gerando diferentes formas, geometrias, dimensões e acabamentos, sendo proporcionados por meio da formação de cavacos. O cavaco pode ser descrito como sendo a quantidade de material removida durante um processo de usinagem, caracterizado por apresentar forma geométrica irregular. Pode-se atribuir ao mecanismo de geração de cavacos alguns fenômenos particulares, entre eles o recalque, o gume posição de corte, a craterização na face de saída da ferramenta e a formação frequente do cavaco em diferentes faixas de velocidade de corte (FERRARESI, 1970).

2.2.1 Grandezas de usinagem

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), o deslocamento entre a ferramenta e um material na usinagem é o fator que proporciona a execução dos processos de usinagem. Estes movimentos devem ser previstos durante o projeto e execução das máquinas-ferramentas que os utilizarão. Por convenção, é adotado que todo movimento é realizado pela ferramenta, considerando assim que a peça manterá uma posição fixa. Desta maneira sempre se tem como referência a peça, simplificando o estudo dos movimentos, principalmente quando a ferramenta possuir uma geometria indefinida.

Destacam-se como principais movimentos na usinagem, os movimentos de corte, avanço e efetivo de corte, pois são ligados diretamente a remoção de material durante um processo de usinagem.

O movimento de corte é considerado o principal movimento de usinagem e pode ser executado de forma manual ou pela máquina-ferramenta. Na ausência do movimento de avanço, o movimento de corte resultaria em uma única remoção de cavaco no percurso de uma rotação ou curso da ferramenta (STEMMER, 1993).

O movimento de avanço representa o deslocamento entre peça e a ferramenta, que quando somado ao movimento de corte, resulta em uma retirada constante de material, ou seja, uma formação contínua de cavacos, percorrendo a ferramenta um trajeto com diversas rotações. O movimento de avanço é composto pelos movimentos de avanço principal e lateral,

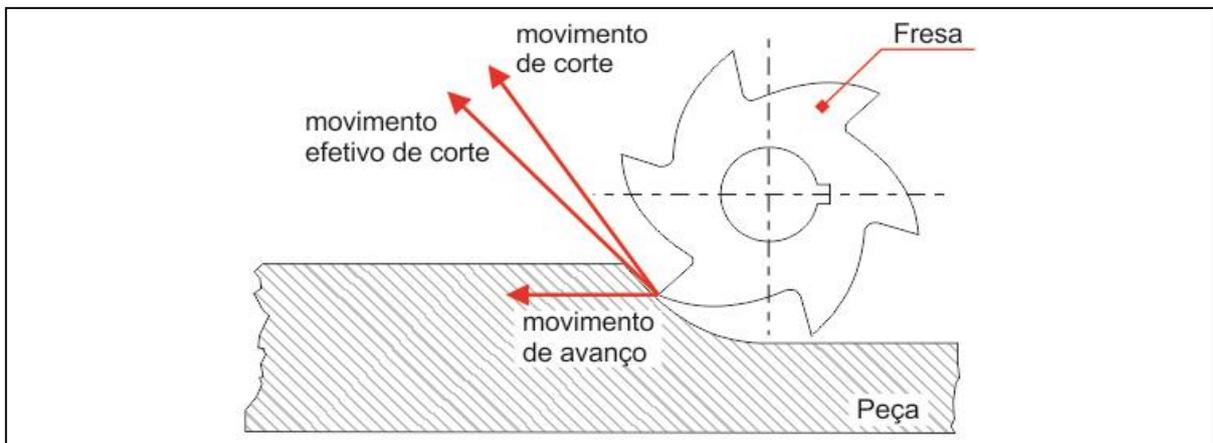
sendo ele a resultante destas duas direções mencionadas (FERRARESI, 1970).

O movimento efetivo de corte, é do qual se originam os processos de usinagem. Quando há um movimento contínuo de avanço, pode-se afirmar que o movimento efetivo é a resultante dos movimentos de corte e avanço, já em movimentos de avanço intermitentes o próprio movimento de corte corresponde ao movimento efetivo de corte (STEMMER, 1993).

Além dos movimentos citados, há também as grandezas de corte que representam os parâmetros adotados na máquina utilizada para usinagem. As grandezas de corte, de avanço (f), profundidade de corte (a_e) e largura de corte (a_p), são destacadas como os principais parâmetros de corte. Dentre os parâmetros adotados no processo de corte, pode-se destacar a velocidade de corte (V_c), sendo ela a velocidade tangencial resultante no momento de rotação da ferramenta em relação a peça, podendo o movimento de avanço (f) ocorrer juntamente ao movimento de corte. A velocidade de usinagem é resultante de duas componentes associadas, sendo elas as velocidades de avanço (V_f) e de corte (V_c) (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

Observa-se na Figura 6 os movimentos de corte mencionados, sendo exemplificados por um processo de fresamento.

Figura 6 – Movimentos ativos de usinagem



Fonte: adaptado de Ferraresi (1970)

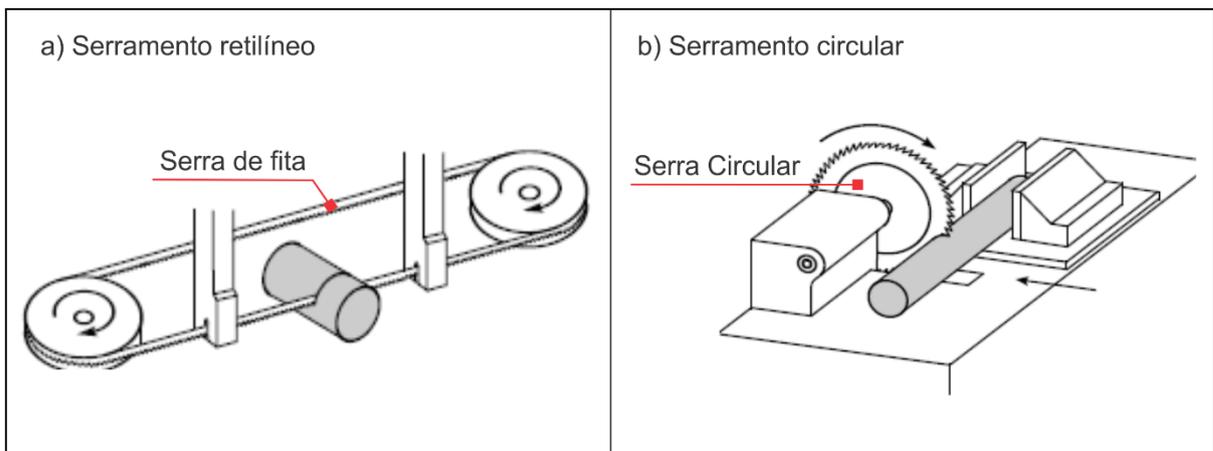
2.2.2 Processo de serramento

O serramento é um processo de usinagem que tem como finalidade recortar ou seccionar materiais, utilizando ferramentas multicortantes de espessura fina. A ferramenta pode efetuar o corte com movimento de rotação e ou deslocamento, já a peça pode se deslocar ou manter-se fixa em uma posição. O processo pode ser executado de duas maneiras, sendo elas o serramento retilíneo e o serramento circular (FERRARESI, 1970).

O Serramento retilíneo tem como característica principal sua movimentação em um

percurso retilíneo, podendo também possuir ou não um movimento alternativo. O corte por meio de uma serra de fita, é um exemplo do serramento retilíneo. O serramento circular é caracterizado pelo movimento de rotação da ferramenta sobre seu próprio eixo, o deslocamento durante o corte pode ser feito pela ferramenta ou pela peça. O corte através de uma serra circular, é um exemplo de serramento circular. A Figura 7 demonstra os dois processos mencionados (FERRARESI,1970).

Figura 7 – Processos de serramento retilíneo e circular



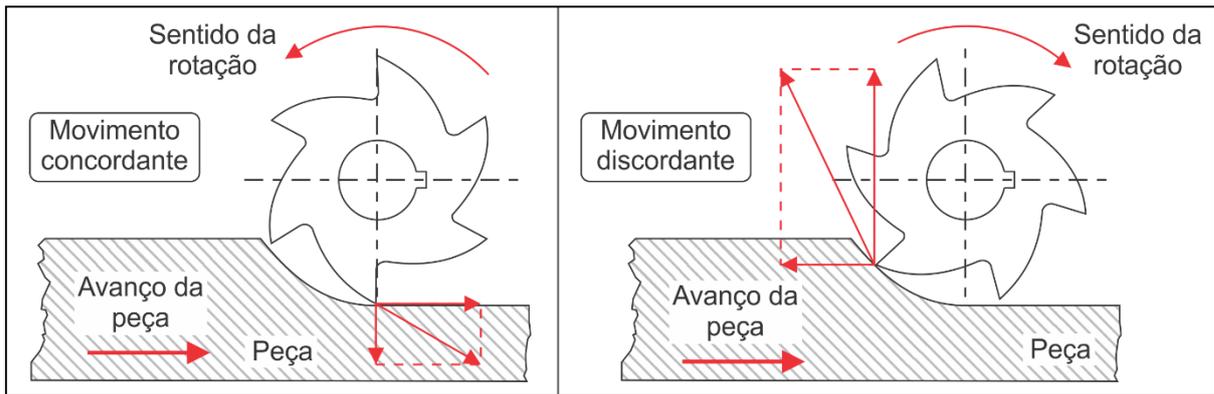
Fonte: adaptado de Ferraresi (1970)

A operação de serramento tem na sua ferramenta, caracterizada pelos diversos gumes de corte, a responsabilidade pelos movimentos de corte e de avanço. O processo pode ser executado por meio de serras alternativas, serras de fita ou com serras circulares. Apesar dos três tipos de serra possuírem diferentes formatos e geometrias, todos efetuam o corte por meio de lâminas cujos dentes operam mecanicamente da mesma maneira (DOYLE et al., 1962).

Segundo Moreira et. al (2013), a operação de serramento com serras circulares foi uma das pioneiras dentre as operações de usinagem utilizadas nas indústrias para a fabricação de seus produtos. O corte feito com discos de serra circular é caracterizado por ser um processo contínuo, ágil e que fornece um acabamento de corte sem rebarbas. Desta forma, o serramento é utilizado em operações de seccionamento de peças, além do corte de sulcos e abertura de ranhuras.

O movimento de corte durante o processo de serramento pode ser classificado como discordante ou concordante. Se o sentido do movimento de avanço for oposto a direção do movimento rotatório da ferramenta, tem-se um movimento discordante. O movimento de corte pode ser descrito como concordante, quando o sentido do movimento de avanço for igual ao sentido de rotação da ferramenta. A Figura 8, ilustra os movimentos de corte citados anteriormente (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

Figura 8 – Movimentos de corte concordante e discordante



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

2.2.2.1 Serramento da madeira

O processo de corte da madeira é caracterizado pela ruptura por tensão, a força executada durante o processo é transmitida a madeira pela ferramenta de corte. A direção e o sentido das forças exercidas no corte são definidos pela geometria da ferramenta, que conseqüentemente determina os esforços gerados no processo. Já as propriedades mecânicas da madeira definem a forma que os esforços serão absorvidos, sendo assim, juntamente as características da ferramenta e da madeira definem a maneira de corte (HOADLEY,2000).

Para seccionar o cavaco da peça de madeira no decorrer de qualquer processo de corte deste material, é necessário primeiramente provocar a ruptura estrutural entre o fio da ferramenta de corte e a peça de madeira. Levando em conta que a resistência da madeira oscila conforme a direção da fibra, o formato do cavaco, a potência de corte e a qualidade da superfície serão modificados pela direção de corte (MCKENZIE, 1960).

A anisotropia da madeira maciça é um fator de grande influência nos processos de usinagem, devido as diferentes propriedades físicas e mecânicas encontradas em cada um dos sentidos de corte. Fatores como a variação de densidade, orientação das fibras, abrasivos contidos no cerne de algumas plantas, defeitos como nós, teor de umidade, plano de corte utilizado, interferem diretamente nas forças desenvolvidas durante o corte (HOADLEY,2000; OLIVEIRA, et al., 2015).

Segundo Gonçalves (2000), o painel MDF possui características similares à madeira maciça, quando comparadas as possibilidades de manufaturar ambas as matérias-primas. Tanto o painel MDF, quanto o MDP, se diferenciam da madeira maciça devido possuírem suas superfícies homogêneas e grande uniformidade na composição das camadas internas e externas. Sendo assim, ambos materiais não possuem orientação das fibras, o que lhes permite serem seccionados em qualquer sentido de corte não influenciando no desgaste das

ferramentas e no acabamento superficial obtido.

A operação de serramento da madeira pode ser executada por meio de serras alternativas, serras de fita ou com serras circulares. Apesar das possibilidades apresentadas, o processo de corte mais utilizado nas indústrias moveleiras é por meio de serras circulares. (GONÇALVES, 2000).

2.2.3 Ferramentas para serramento

As ferramentas adotadas no processo de serramento tem como principal característica o elevado número dentes ou gumes. Embora existam diferentes processos de serramento e geometrias de ferramentas, todas executam o corte através do mesmo princípio utilizando lâminas dentadas (DOYLE et al., 1962).

Os principais processos de serramento, são executados através de serras alternativas, serras de fita ou com serras circulares, A Figura 9, ilustra os processos mencionados.

Figura 9 –Principais modelos de máquinas e ferramentas para operação de serramento



Fonte: adaptado de Moreira et. al. (2011)

O processo de serramento em máquinas com serra alternativa utiliza uma ferramenta com formato de arco, a qual possui uma lâmina fixada sob tração. O movimento de avanço ocorre ao mesmo tempo que o movimento de corte e a lâmina repousa no seu retorno, ou seja, a ferramenta executa o corte somente em um sentido do movimento. Ao recuar, a lâmina é distanciada da peça para evitar danos aos gumes da lâmina de serra. Além de cortes retilíneos, há também possibilidade de cortes angulares (POLLACK, 1988).

Na operação de corte com serra de fita, o movimento é contínuo e normalmente reto seguindo um percurso de rotação. A ferramenta utilizada é uma lâmina com dentes cujas extremidades são unidas por meio de brasagem, devido o corte ser contínuo não há percurso improdutivo durante seu movimento de corte (POLLACK, 1988).

As serras circulares são similares a fresas que executam ranhuras com pequena espessura, basicamente são formadas por um disco e vários dentes no contorno da sua extremidade. A fabricação das ferramentas é determinada em função do material que será cortado. As serras, geralmente são produzidas em aços especiais e o seu diâmetro é compatível ao equipamento que será efetuada a operação. A resistência da lâmina de serra deve ser inferior à resistência do acionamento do equipamento, dessa maneira, caso sejam exercidos esforços excessivos a lâmina de serra deve ser danificada ao invés do equipamento (ARSHINOV; ALEKSEEVICH, 1979).

2.2.3.1 Ferramentas para serramento de madeira

O processo de serramento da madeira deve levar em consideração dois fatores importantes para o processo. O primeiro é a geometria da ferramenta, que deve ter uma pequena área de corte na sua cunha, de maneira que ao aplicar uma força à ferramenta seja obtido uma tensão maior do que a tensão da madeira. Como segundo fator, deve-se considerar as condições de umidade, temperatura e defeitos da madeira (HOADLEY, 2000).

No cenário atual das indústrias moveleiras, destacam-se como principais ferramentas adotadas no serramento, as serras de fita e as serras circulares,

As serras de fita são formadas por lâminas e dentes, a formação dos dentes é composta por entalhes e saliências, o corte é executado através do rompimento das fibras de madeira, a quantidade de material retirado, conhecido como cavaco é gerado em forma de serragem, ou seja, pequenas partículas de madeira (VIDAURRE, 2006).

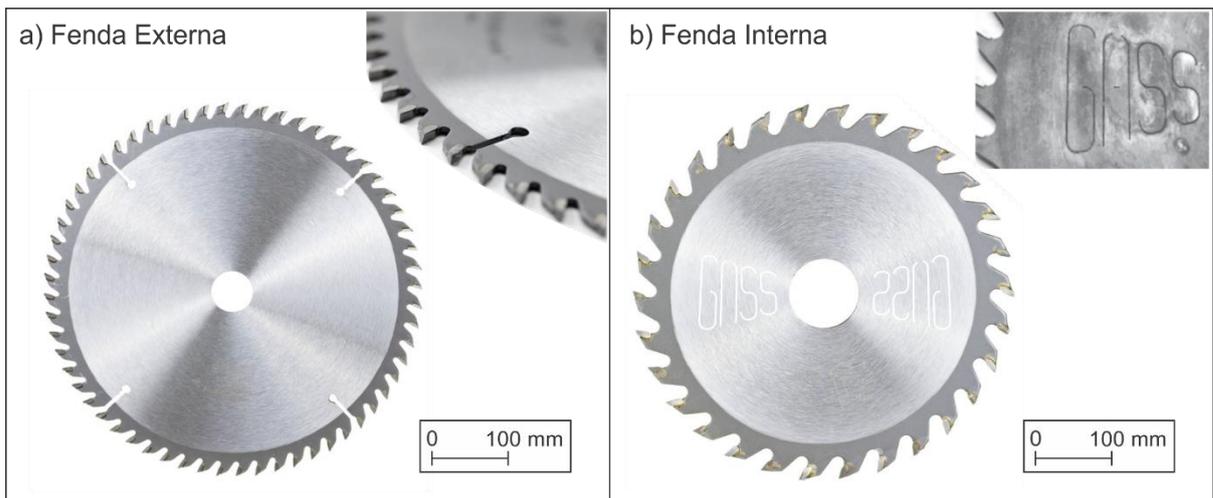
Embora a serra de fita seja bastante utilizada, hoje nas indústrias a operação de serramento da madeira é executada em grande escala através das serras circulares, as mesmas apresentam diversas variações de diâmetros, quantidade de dentes, espessuras e geometrias dos dentes. A quantidade de dentes é influenciada por fatores como a operação a ser executada, qualidade superficial, altura dos dentes, propriedades da madeira, tipo de cavaco gerado e velocidades exercidas no corte. Pode-se afirmar que com o aumento do diâmetro do disco, sua espessura tende a diminuir. Os discos com pequenas espessuras são denominados discos finos, sendo assim, quando apresentam uma espessura 200 vezes menor que o diâmetro da ferramenta (GONÇALVES, 2000).

Uma característica fundamental da serra circular é a sua espessura, ela é composta de duas espessuras, sendo uma relativa a largura do inserto e a outra referente ao disco. Esta diferença de espessuras é necessária para que exista uma folga entre as faces laterais do disco e da peça, com o objetivo de reduzir o atrito e desgaste da ferramenta (ARSHINOV; ALEKSEEVICH, 1979).

No corte da madeira e metais não ferrosos, a operação de serramento é executada

em altas velocidades de corte, gerando o aumento da temperatura nos gumes. No corpo da serra podem ser abertas fendas, que tornam possível o alívio de tensão do disco durante o corte. As fendas são classificadas em externas (a) ou internas (b), conforme ilustrado na Figura 10 (MOREIRA et. al.,2011).

Figura 10 – Detalhe das fendas de alívio: (a) externas e (b) internas



Fonte: adaptado de Wirutex (2015)

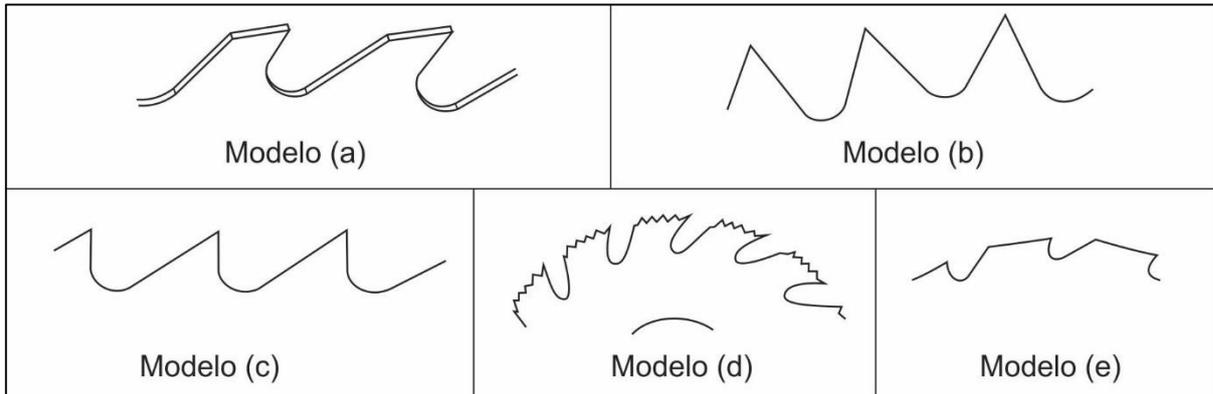
A madeira “verde”, com maior teor de umidade, necessita de discos com um número inferior de dentes quando comparado aos discos aplicados no corte de madeira seca com acabamento. Verificando os processos e parâmetros adotados no serramento de madeiras secas, há uma redução da quantidade de dentes na medida que cresce a altura de corte para diversificados diâmetros de disco (GONÇALVES; RUFFINO, 1989).

Conforme Kminiak, Gasparík e Kvietková (2015) comprovaram em seu estudo, o acabamento superficial é superior quanto maior for o número de dentes da serra. Já a presunção de que a qualidade superficial da peça reduz com o desgaste das ferramentas não foi confirmada pelos resultados obtidos.

Segundo Gonçalves (2000), diferentes geometrias dos dentes de serras podem ser classificadas de acordo com o seu uso, a Figura 11 ilustra alguns modelos de perfis que são definidos a seguir:

- a) adequado para cortes longitudinais de desdobro, refilamento e de resserra;
- b) aplicado em cortes transversais, de serramento ou destopo;
- c) utilizado pra cortes com 35 mm de altura máxima, nos cortes longitudinais de acabamento e madeira seca;
- d) indicado para cortes longitudinais e transversais com acabamento fino;
- e) ferramenta com limitante do avanço, utilizado em peças com elevada espessura, sendo adotada em máquinas de avanço automático.

Figura 11 – Modelos de dentes para serras circulares, classificados conforme a utilização



Fonte: adaptado de Gonçalves (2000)

A geometria dos dentes das serras circulares e o método de afiação são influenciados pelas exigências mecânicas do corte e pela qualidade da superfície exigida na peça. Outros fatores como a matéria-prima da peça e o material da ferramenta, também variam e influenciam na geometria dos gumes da ferramenta. Para obter o melhor desempenho possível de uma serra circular, os parâmetros de corte devem ser adotados conforme o material a ser cortado e a qualidade superficial exigida (KRILEK; KOVÁČ; KUCERA, 2014).

2.2.4 Materiais para ferramentas de corte

Para a definição do material utilizado na construção de uma ferramenta, devem ser considerados fatores como o processo de usinagem executado, material a ser usinado, funcionamento da máquina, geometria e dimensões da ferramenta, custo de matéria-prima da ferramenta, condição de operação e usinagem (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

As ferramentas devem conter as propriedades necessárias para resistirem as diversas solicitações que estão propensas a receber no processo de corte. A usinagem da madeira requer resistência à abrasão, tenacidade, rigidez e resistência a oxidação. Cada processo de usinagem da madeira possui diferentes solicitações, por isso é importante identifica-los e definir quais as exigências primárias e secundárias, afim de, definir o material adequado para a operação. Atualmente, não há nenhum material capaz de cumprir todos as exigências dos processos de corte simultaneamente (STEMMER, 1995; GONÇALVES, 2000).

A elaboração adequada das ferramentas de corte é de suma importância para a sua vida útil, o acabamento das faces usinadas é influenciado por fatores como a rigidez e o comportamento vibratório do ferramental. As ferramentas de corte podem ser classificadas como inteiriças, calçadas ou com dentes postiços (STEMMER, 1995).

Segundo Stemmer (1995), as ferramentas inteiriças, são caracterizadas pela utilização de somente um material em toda sua construção. A concepção destas ferramentas é

fundamental para a viabilidade da usinagem. A elevada rigidez é um fator determinante, afim de, evitar o comportamento vibratório acentuado da ferramenta.

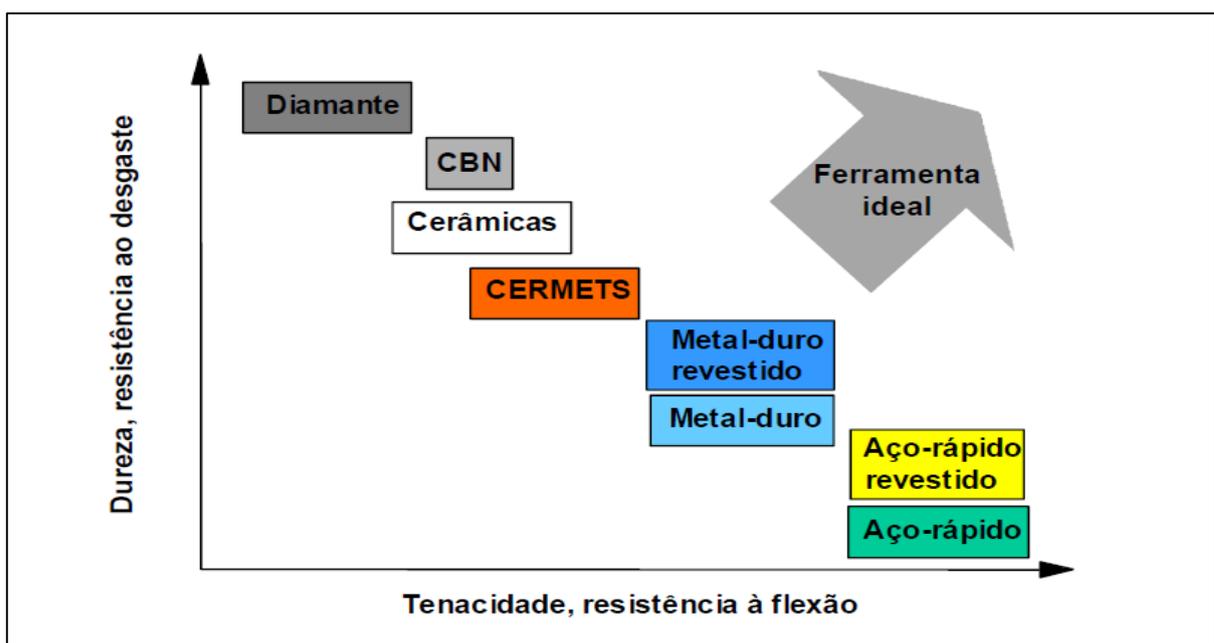
As ferramentas com pastilhas intercambiáveis são formadas por um corpo de aço rápido, os dentes podem ser alojados mecanicamente ou brasados com pastilhas de corte em materiais como o aço rápido, metal duro, cerâmico, diamante policristalino, entre outros. O corpo é fabricado com material geralmente de um custo inferior, que pode ser reaproveitado após o desgaste dos gumes da ferramenta. Estas ferramentas são adotadas em processos de precisão, sendo assim, as pastilhas são afiadas montadas na serra, afim de, evitar erros cumulativos vinculados as pastilhas intercambiáveis (STEMMER, 1995).

As ferramentas com dentes postiços ou cassetes, são compostas por um corpo de aço rápido onde os dentes postiços são fixados, eles podem ser inteiriços de aço rápido ou com pastilhas de metal duro. Este sistema tem a possibilidade de utilizar pastilhas nos mais diversos tamanhos e geometrias (STEMMER, 1995).

Os materiais aplicados em ferramentas são identificados em função das suas propriedades químicas, desta maneira, pode-se destacar materiais como aços rápidos, aços rápidos revestidos, metal duro, metal duro revestido, materiais cerâmicos, nitreto boro cúbico e diamante, utilizados nas mais diversas aplicações e ferramentas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

O gráfico ilustrado na Figura 12, demonstra a relação das propriedades mecânicas dos materiais citados anteriormente, de maneira que auxilie na escolha do material adequado para ferramenta, conforme a exigência do processo de usinagem a ser adotado.

Figura 12 – Gráfico para definição dos materiais adequados nos processos de usinagem



Fonte: adaptado de Klocke e König (1997)

Atualmente, os materiais mais empregados na fabricação de ferramentas para usinagem no setor moveleiro são, os aços rápidos (HSS), o metal duro e o diamante policristalino (PCD). Segundo Gonçalves (2000), as serras circulares são as ferramentas predominantes nos processos de serramento da madeira, pode-se classifica-las pelo tipo de dentes adotado, sendo postiços ou fixos. Os fixos são fabricados por meio de estampagem, processo que define a geometria dos dentes, e utilizam o Aço rápido como material. As serras de dentes postiços possuem modelos produzidos para aplicações diferenciadas, mas geralmente as ferramentas com pastilhas de metal duro ou diamantadas são as mais utilizadas no serramento da madeira.

2.2.4.1 Ferramentas de metal duro

O metal duro é um material composto basicamente por pequenas partículas de carbonetos de metais refratários, juntamente sintetizados com metais como o ferro, níquel ou cobalto. Os carbonetos são de Tungstênio geralmente combinados com outros carbonetos de titânio, tântalo e nióbio. Tem como característica alta dureza e resistência a compressão, também podem ser destacadas a sua elevada dureza tanto em temperatura ambiente até altas temperaturas, a alta tenacidade e suas elevadas propriedades mecânicas. Os teores de cobalto e o tamanho do grão do carboneto de tungstênio influenciam diretamente todas propriedades do material (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001; FERRARESI, 1970).

O metal duro geralmente é utilizado em ferramentas na forma de pastilhas fixas ao porta ferramentas através de brasagem ou intercambiáveis mecanicamente. As lâminas de serras circulares possuem estes dois tipos de fixação, porém os insertos de metal duro brasados no corpo de aço são frequentemente os mais utilizados. Geralmente as serras com lâminas de metal duro possuem diâmetros entre 160 e 2200 mm e podem possuir ou não revestimentos em TiN e TiAlN (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001; GONÇALVES, 2000).

Conforme catálogo da Sandvik (2017), as ferramentas de metal duro são divididas em seis grupos, de acordo com sua aplicação, sendo eles os grupos P, M, K, N, S e H. O grupo P engloba ferramentas para usinagem de aços. Já o grupo M é designado para usinagem de aços inoxidáveis. O grupo K é utilizado na usinagem de ferros fundidos cinzentos e nodulares. O grupo N é aplicado na usinagem de materiais não ferrosos. O grupo S é adotado na usinagem de ligas resistentes a altas temperaturas e ligas de titânio. O grupo H abrange aços temperados e ferro fundido endurecido.

2.2.4.2 Ferramentas de diamante

O diamante pode ser considerado o material disponível na natureza de maior dureza.

Devido ao seu elevado custo e dificuldade de obtenção, desenvolveu-se uma ferramenta com uma camada de diamante sintético policristalino (PCD), esta camada pode ser aplicada em pastilhas de metal duro de forma direta ou através de brasagem (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001; STEMMER, 1993).

As ferramentas de diamante podem ser adotadas na usinagem de metais leves, cobre, latão, bronze, estanho, plásticos, madeira, entre outros. Com a utilização do diamante se obtém uma excelente qualidade superficial nas peças usinadas, não há tendência a colagem, as forças de corte são reduzidas e a vida da ferramenta se torna bem superior aos demais materiais. A utilização deste tipo de ferramenta é descartada em processos com temperaturas acima de 900°C, devido a grafitação do diamante (STEMMER, 1993).

As ferramentas diamantadas possuem pontos positivos e negativos. Como positivos destacam-se a alta condutividade térmica, que dificulta o aquecimento da ferramenta, a elevada dureza (4 vezes maior que o metal duro), a grande resistência ao desgaste por abrasão e também a sua alta tenacidade, tais fatores proporcionam maior vida útil a ferramenta e garantem um elevado desempenho e acabamento durante toda sua vida útil. Em contrapartida, destacam-se como pontos desfavoráveis a anisotropia, que interfere nos cuidados durante a lapidação do diamante policristalino, de maneira que a região mais resistente do material coincida com a região aplicada no corte, e principalmente a reação ao ferro em determinadas temperaturas ocasionando um desgaste por difusão (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

Apesar do custo elevado das ferramentas diamantadas em relação as ferramentas de metal duro, a sua maior vida útil pode tornar viável a sua utilização, devido ao ganho de produtividade com menos setups dos ferramentais, conforme ilustra a Figura 13 (WIRUTEX, 2015).

Figura 13 – Relação custo-benefício das ferramentas de metal duro x diamantadas



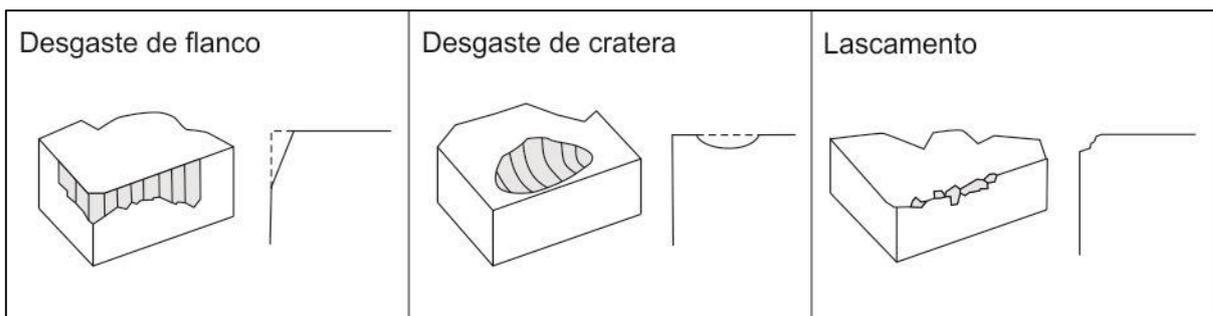
Fonte: adaptado de Wirutex (2015)

2.2.5 Desgastes das ferramentas de corte

As principais formas de desgastes nas ferramentas de corte são: desgaste de cratera, desgaste de flanco (VB) e lascamento. O desgaste de cratera é gerado na face da ferramenta. A sua origem depende da combinação dos mecanismos de desgaste denominados difusão e adesão. A difusão é originada pelas altas temperaturas, enquanto a adesão ocorre no contato de duas superfícies metálicas quando se aplica uma carga, em baixas temperaturas e velocidade de corte. O desgaste de flanco (VB), acontece no flanco da ferramenta, originado pelo contato da ferramenta com a peça, e acaba danificando o acabamento da peça usinada. Já o lascamento ocorre por uma falha acidental da ferramenta, originada pelas excessivas solicitações térmicas ou mecânicas, na sua cunha de corte (STEMMER, 1993).

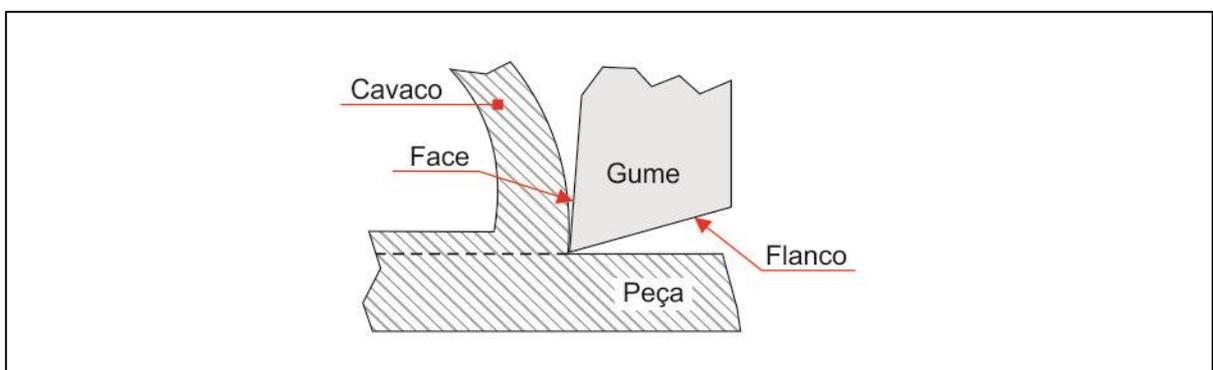
Os desgastes das ferramentas e as regiões que compõem a cunha de corte, são ilustrados, respectivamente, nas Figuras 14 e 15.

Figura 14 – Desgastes de flanco, cratera e lascamento



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

Figura 15 – Regiões da cunha de corte das ferramentas



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

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), existem diversos mecanismos causadores do desgaste das ferramentas, pode-se destacar os seguintes:

- a) gume postiço: Durante a usinagem pode-se formar no contato entre o cavaco e a

face de saída da ferramenta uma camada aderente ao gume da ferramenta, que modifica o comportamento da ferramenta e acelera o seu desgaste;

- b) abrasão mecânica: É geralmente responsável pelos desgastes frontal e de cratera, sendo gerado pela abrasão e propiciado pela presença de partículas duras no material da peça e pelas temperaturas elevadas de corte;
- c) adesão: Ocorre no contato de duas superfícies metálicas através de baixas velocidades e temperaturas, e cargas moderadas formando a partir deste contato um extrato metálico que gera a aderência;
- d) difusão: Consiste no deslocamento de átomos de um metal a outro, sendo ocasionado por elevadas temperaturas na região de corte. O desgaste de cratera geralmente é ocasionado por este mecanismo;
- e) oxidação: Ocorre através de altas temperaturas somadas a presença de ar e água. O desgaste gerado pela oxidação se apresenta geralmente nas faces de contato da ferramenta com o cavaco, devido a entrada de ar nessa região, sendo assim um possível causador do desgaste de entalhe.

Na usinagem da madeira e seus derivados, os fatores mais relevantes em relação ao desgaste da ferramenta são: a resistência do gume, resistência a abrasão, resistência interna e um comportamento reproduzível do desgaste. Fatores como a resistência ao calor e a oxidação são fundamentais na usinagem dos metais, mas na usinagem da madeira tem menor influência no desgaste das ferramentas (GONÇALVES; RUFFINO, 1989).

Um dos principais problemas enfrentados durante a usinagem da madeira é a perda de afiação das ferramentas de corte. Com esta perda, fatores como a qualidade do corte e a rugosidade das superfícies usinadas são diretamente afetados, além disso, a energia consumida para usinagem se torna maior, aumentam os custos de manutenção das ferramentas e por consequência a produtividade é reduzida e o custo para manufatura aumenta (GOTTLOB, 1996).

Conforme Bosetti e Bruschi (2010 apud MOREIRA et. al, 2013), a serra circular tem seu desgaste evidenciado de duas formas. A primeira acontece de forma súbita com a fratura dos dentes da serra, ocasionado no aumento de torque. Este desgaste afeta principalmente a qualidade de acabamento do corte. Outra forma de desgaste recorrente é o desgaste gradual e progressivo, por conta das altas temperaturas e suas variações no decorrer do serramento. Esse desgaste tem influência direta no desgaste da cunha de corte e nas rebarbas no corpo da peça.

A vida de uma ferramenta de corte pode ser determinada no ambiente industrial através de parâmetros como o tempo de máquina utilizando a ferramenta, tempo efetivo de corte, volume de metal removido nas reafiações, número de peças usinadas, velocidade de corte equivalente e relativa (STEMMER, 1993).

2.2.6 Geometria de cavacos

A geração do cavaco tem influência direta no desgaste das ferramentas, nas forças e temperaturas obtidas durante o corte. Estes fatores acabam impactando em questões econômicas e na qualidade dos produtos (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

Nos processos de usinagem da madeira, fatores como a dimensão e a forma dos cavacos são geralmente influenciadas pela resistência mecânica da madeira a compressão, cisalhamento e flexão. Outros fatores como a geometria da ferramenta e a orientação das fibras da madeira no sentido de corte também influenciam nos formatos dos cavacos gerados (GONÇALVES, 2000).

As diferentes formas de corte da madeira, apresentam diferentes geometrias de cavacos. Segundo Gonçalves (2000), no corte caracterizado pela abertura de ranhuras rasas utilizando serras circulares, podem ser obtidos três tipos de cavacos, que também são influenciados pelos parâmetros de usinagem adotados. O cavaco do tipo I é formado a partir da ruptura por fendilhamento das fibras e tem como características a baixa resistência a tração e o baixo desgaste da ferramenta de corte, pois a ruptura ocorre à frente da aresta de corte. Nesta formação de cavacos a qualidade superficial da região usinada é prejudicada. O tipo II é originado quando a ruptura se dá por cisalhamento, formando um cavaco contínuo. Esta formação de cavaco produz uma superfície usinada de boa qualidade, porém gera um maior desgaste da ferramenta devido ao contato contínuo do gume da ferramenta com a peça. Já o tipo III é obtido pela compressão e cisalhamento da madeira, gerando superfícies amassadas e arrancadas com um aspecto áspero na forma de felpas.

Nas operações de corte, executadas por serras circulares na região mais próxima possível do centro da peça, o cavaco tem formato uniforme e as superfícies usinadas apresentarão elevada qualidade caso os ângulos de saída das ferramentas sejam elevados e suas arestas de corte estejam bem afiadas (GONÇALVES, 2000).

O corte evidenciado em processos de torneamento ou fatiamento, apresenta um cavaco contínuo de pequena espessura. Durante o processo de corte pode-se evidenciar três zonas de ruptura, sendo elas a zona de cisalhamento, de tensão e compressão perpendicular (GONÇALVES, 2000).

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo será apresentado o planejamento experimental dos testes realizados. Serão abordados os materiais dos corpos de prova, assim como das serras circulares e equipamentos utilizados para os experimentos e métodos adotados. Os testes foram aplicados na empresa BRS Indústria de Móveis, já as análises dos desgastes foram executadas nos Laboratórios da Universidade de Caxias do Sul.

Atualmente, o critério adotado na BRS Indústria de Móveis para análise do desgaste e tempo de troca das ferramentas de corte é visual, levando em consideração o acabamento dos materiais seccionados. Hoje, estão presentes no processo produtivo da organização diferentes processos de usinagem, que geralmente adotam ferramentas de metal duro ou diamante. No caso da operação de serramento, a empresa utiliza como ferramentais de corte serras circulares com pastilhas de metal duro. Os experimentos foram executados, utilizando ferramentas com pastilhas de metal duro e diamante, afim de confrontá-las e assim determinar qual a ferramenta mais adequada nesta aplicação.

3.1 MÁQUINAS

Os testes foram executados na máquina de usinagem Seccionadora, modelo SELCO EBTR 108, do Grupo italiano BIESSE. A Figura 16 demonstra as características gerais do equipamento.

Figura 16 – Imagem ilustrativa da máquina Seccionadora SELCO EBTR-108

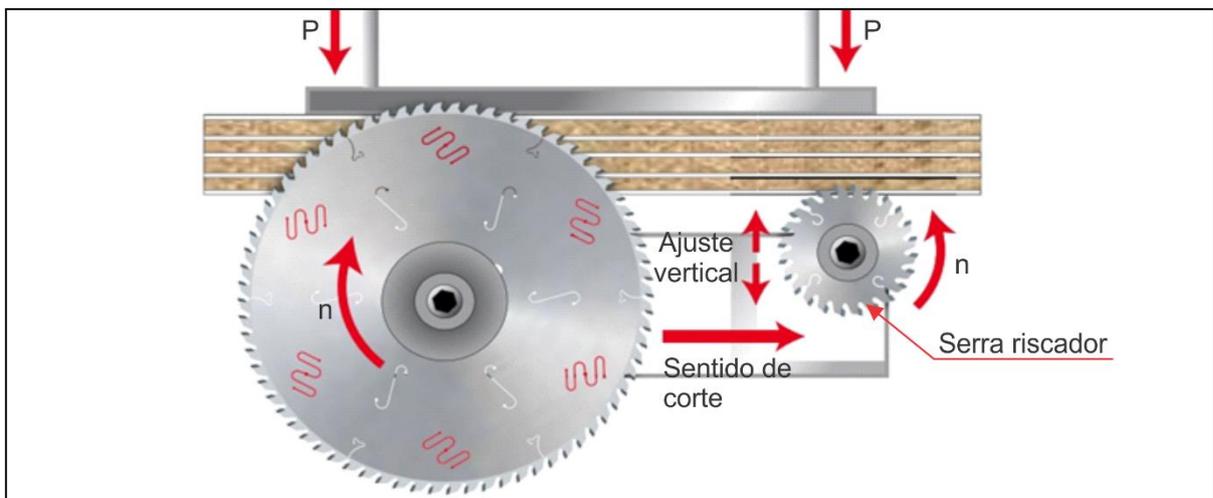
<p>SECCIONADORA SELCO EBTR-108</p>	
<p>Marca: BIESSE Modelo: 57321 Nº de série: VB0003 Amperagem: 55 A Tensão: 380 V Potência: 29 KW Frequência: 60 Hz</p>	

Fonte: adaptado Biesse (2016)

A máquina adota duas serras na operação de corte dos painéis, sendo uma serra circular de maior diâmetro para efetuar o corte total dos painéis, e outra serra circular de menor diâmetro que executa um corte que pode variar de 1,0 a 3,0 mm de altura na parte inferior dos

painéis. A serra de menor diâmetro, conhecida como serra riscadora, percorre a trajetória de corte à frente da serra com maior diâmetro, desta forma evitando que na saída de corte da serra de maior diâmetro ocorram danificações no material como a quebra da lamina, rebarba ou acabamento serrilhado. A serra riscadora é quem sofre os maiores desgastes durante a operação, sendo assim o objeto de análise do experimento. O método de corte mencionado pode ser evidenciado na Figura 17.

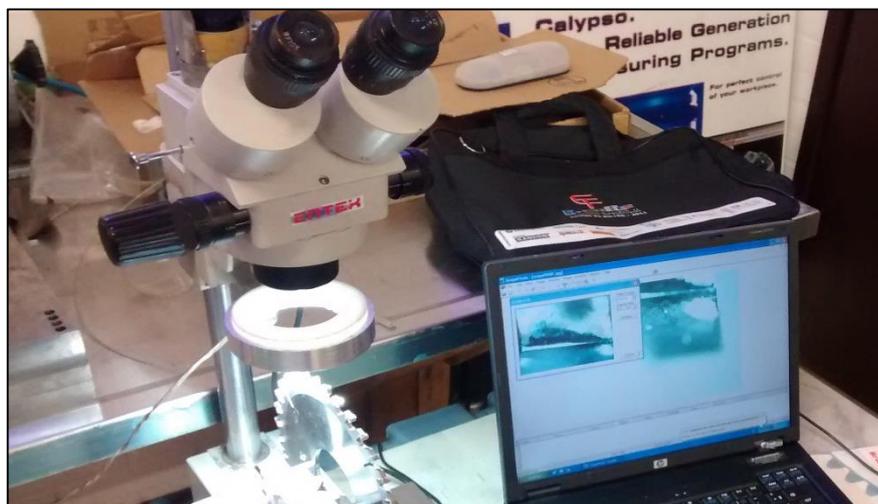
Figura 17 –Princípio de corte da máquina Seccionadora SELCO EBTR-108



Fonte: adaptado Biesse (2016)

Para a avaliação e medição do desgaste das ferramentas foi utilizado um estereoscópio universal, modelo TNE-10B, da marca Entex, com capacidade de magnificação de até 45X. As imagens foram obtidas por uma câmera CCD acoplada, em conjunto com o software ScopePhoto que opera o equipamento. A Figura 18 demonstra o equipamento.

Figura 18 – Estereoscópio Universal Entex, modelo TNE-10B



Fonte: autor (2017)

3.2 FERRAMENTAS

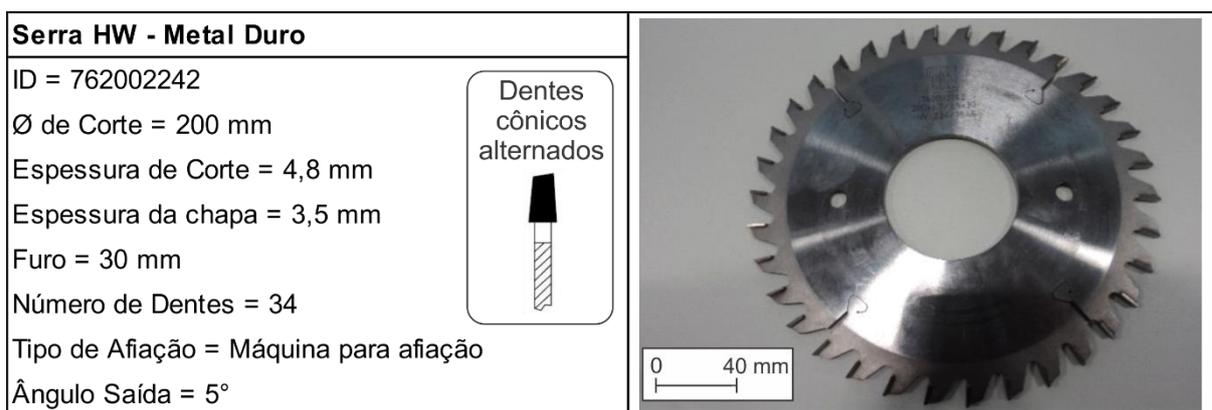
O conjunto de serras instalado na máquina seccionadora, responsável pelo corte dos painéis, é composto por duas ferramentas, sendo uma de maior diâmetro responsável pelo seccionamento total dos materiais, e a outra de menor diâmetro que executa a abertura de sulcos na parte inferior dos materiais seccionados, sendo assim conhecida como serra riscadora. O experimento foi direcionado a análise de desgaste da serra riscadora.

As serras circulares utilizadas no experimento foram fornecidas pela empresa Leitz Ferramentas Para Madeira Ltda, empresa Alemã com filial situada em São Leopoldo - RS. Foram utilizadas nos experimentos, ferramentas com pastilhas de metal duro e ferramentas com pastilhas de diamante policristalino (PCD).

As características da serra circular com pastilhas de metal duro estão indicadas na Figura 19. As serras têm diâmetro externo de 200 mm com 34 dentes, largura do disco de 3,5 mm, largura do inserto de 4,8 mm, e furo central para fixação de diâmetro 30 mm.

Segundo o fornecedor, esta serra é indicada para cortes de derivados da madeira (MDP, MDF, compensados), para seccionar chapas únicas ou pacotes em seccionadoras e esquadrejadeiras com riscador. Seu corpo é constituído em aço carbono SAE 1070, o qual é tratado termicamente através do processo de revenimento. As pastilhas de corte são fabricadas em metal duro da classe K10, que são brasadas com lâminas de prata junto ao corpo da serra. Os dentes têm formato cônico alternado e a sua afiação é feita em máquina específica para esta finalidade, utilizando rebolos de diamante como material de afiação.

Figura 19 – Características da serra circular com pastilhas de metal duro



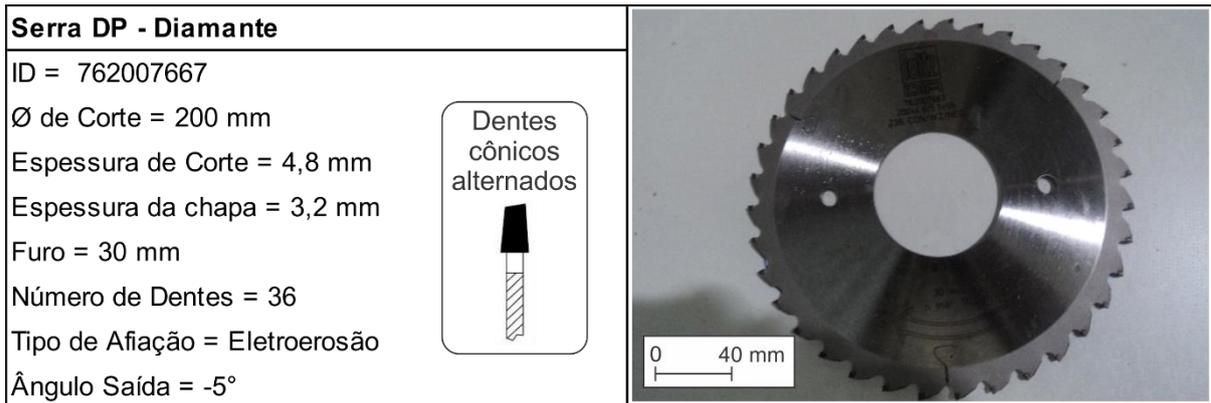
Fonte: autor (2017)

As características da serra circular com pastilhas de diamante policristalino (PCD) são indicadas na Figura 20. As serras têm diâmetro externo de 200 mm e 36 dentes, largura do disco de 3,2 mm, largura do inserto de 4,8 mm, e furo central para fixação de diâmetro 30 mm.

Segundo o fornecedor, esta serra é utilizada para cortes de derivados da madeira

(MDP, MDF), para seccionar chapas únicas e pacotes em seccionadoras com riscador. Seu corpo é constituído em aço carbono SAE 1070, o qual é tratado termicamente através do processo de revenimento. As pastilhas são feitas em diamante policristalino (PCD) de elevada dureza e são brasadas com lâminas de prata junto ao corpo da serra. Os dentes têm formato cônico alternado e a afiação é feita em máquinas de eletroerosão.

Figura 20 – Características da serra circular com pastilhas de diamante (PCD)



Fonte: autor (2017)

3.3 MATERIAIS

Tanto o MDF quanto o MDP, são fornecidos em formato de chapa plana, nas dimensões de 2750 mm de comprimento, e 1850 mm de largura, com espessuras variáveis de 6 a 22 mm. Os mesmos foram fornecidos pela empresa Arauco do Brasil S.A. O Painel MDF é um painel fabricado a partir da aglutinação de fibras de madeira com resinas sintéticas e ação conjunta de temperatura e pressão, sua forma estrutural é in natura, ou seja, não há nenhum revestimento superficial. Ele possui consistência e algumas características mecânicas similares às da madeira maciça. Grande parte de seus parâmetros físicos de resistência são superiores aos do painel MDP, tendo como características a boa estabilidade dimensional e a grande capacidade de usinagem (ABIPA,2013).

O painel MDP, é composto por partículas de madeira e resinas, devido sua composição ser por partículas maiores quando comparadas as fibras do MDF há uma maior porosidade e espaços vazios na sua estruturação, o MDP já possui um revestimento superficial nas faces principais das chapas, sendo denominado este revestimento de Melamina (ABIPA,2013).

3.4 ESTRATÉGIA DE APLICAÇÃO

No momento de definição dos experimentos, a empresa possuía um controle para mapear o momento de troca das ferramentas, sendo informados neste controle o horário e a

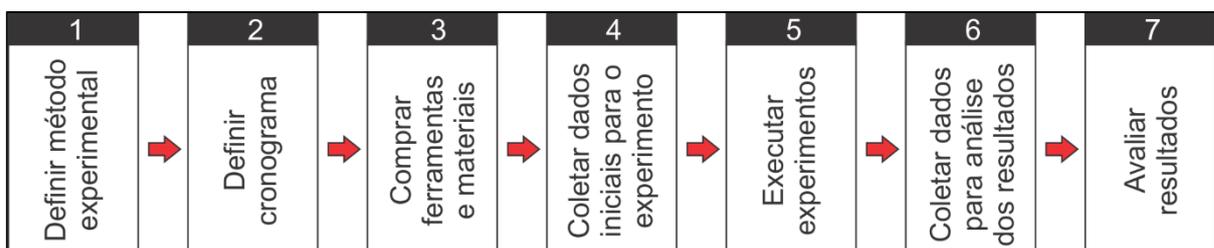
data de colocação e retirada da ferramenta, no mesmo documento haviam o número de afiações já feitas na ferramenta.

Baseado neste controle, a operação de serramento na máquina SELCO EBTR 108, utilizando ferramentas com pastilhas de metal duro, necessitou de 155 trocas da ferramenta no ano de 2015. O ano de 2015 teve em torno de 250 dias úteis, sendo assim, foram efetuadas em média uma troca de ferramenta a cada 1,6 dias. Já as serras com pastilhas de diamante policristalino (PCD), que já foram utilizadas pela empresa, suportaram aproximadamente 30 dias de utilização, antes de serem retiradas para reafiação. Estes parâmetros serviram como base para o início do experimento.

Os experimentos foram todos aplicados no processo de serramento na máquina Seccionadora SELCO EBTR 108. Utilizou-se como materiais para corte os painéis MDF e MDP. Também foram utilizadas ferramentas com pastilhas de metal duro e diamante novas.

O principal parâmetro controlado para que se obtivesse igualdade nas condições dos testes, foi o dimensionamento da área de corte (A_c) percorrida pela ferramenta durante o processo de serramento, devido a variação do trajeto percorrido pela serra em cada plano de corte executado. A área de corte (A_c), foi obtida através da profundidade de corte (a_e) da ferramenta e a distância percorrida (L) pela mesma durante a operação. A profundidade de corte (a_e), foi obtida pelo dimensionamento da ranhura executada pela serra riscadora no corte. A serra circular analisada atua como riscador no processo de serramento, ou seja, executa a abertura de uma ranhura com profundidade que pode variar de 1,0 a 3,0 mm de profundidade, independentemente da espessura dos materiais a serem seccionados. Através da máquina seccionadora, foi possível determinar o perímetro de corte (L) percorrido pelas ferramentas durante a sua utilização. O Software Optiplanning, que é um otimizador de corte que aumenta o aproveitamento no serramento dos painéis, forneceu o perímetro de corte (L) em cada plano executado, afim de, garantir a veracidade dos dados obtidos comparando ambos. Desta maneira, tornou-se possível aplicar as ferramentas em condições totalmente igualitárias, sendo possível determinar as quantidades exatas de corte para cada um dos materiais seccionados (MDP e MDF). De acordo com a estratégia de aplicação dos experimentos, a Figura 21 ilustra o fluxograma de execução dos processos.

Figura 21 – Fluxograma das atividades propostas



Fonte: autor (2017)

3.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental 1 foi executado no corte dos materiais MDP e MDF, utilizando a serra circular com pastilhas de metal duro. A ferramenta foi colocada em operação pela primeira vez e utilizada até o momento de troca para reafiação, conforme critério visual de acabamento adotado pela empresa. No momento de troca do ferramental, mensurou-se qual a área de corte percorrida pela ferramenta do início de sua utilização até o momento da sua retirada. Desta maneira, no experimento 2 a ferramenta com pastilhas de diamante foi submetida a mesma área de corte alcançada pela ferramenta de metal duro no serramento dos painéis MDP e MDF, sendo retirada de operação ao atingir o dado mencionado. Após as operações de corte, foram analisados e comparados os desgastes de flanco (VB), e demais desgastes de ambas as ferramentas (metal duro e diamante), que foram utilizadas até o período de corte limite para reafiação da ferramenta de metal duro. As variáveis controladas adotadas e o cronograma executado para os experimentos 1 e 2, podem ser verificados no quadro 1.

No terceiro experimento, a serra circular com pastilhas de diamante foi utilizada no corte dos materiais MDP e MDF. A utilização da serra foi estendida até a mesma se aproximar do momento de troca para reafiação. Após a retirada da serra, foram analisados os desgastes de flanco (VB), e demais desgastes apresentados, que foram comparados aos desgastes da ferramenta de metal duro verificados no primeiro experimento, os quais também foram mensurados no momento de troca para reafiação. As variáveis controladas adotadas e o cronograma executado para o experimento 3, pode ser verificado no quadro 1.

Quadro 1 – Detalhamento das atividades dos experimentos 1,2 e 3

(continua)

Nº	Ferramenta	Materiais	Experimento	Resultados	Data
1	Serra circular pastilhas de metal duro	MDP e MDF	Utilização da ferramenta até o momento de troca para reafiação e dimensionamento do perímetro e a área total de corte atingida.	Avaliação dos desgastes apresentados pelas ferramentas, após terem sido submetidas as mesmas condições de corte.	09/03/17 à 23/03/17
2	Serra circular pastilhas de diamante		Utilização da ferramenta até atingir a área de corte mensurada no experimento 1.		31/03/17 à 17/04/17

(conclusão)

Nº	Ferramenta	Materiais	Experimento	Resultados	Data
3	Serra circular pastilhas de diamante	MDP e MDF	Utilização da ferramenta até se aproximar do momento de troca para reafiação e dimensionamento do perímetro e a área total de corte atingida.	Comparação dos resultados obtidos para as ferramentas de metal duro e diamante, quando utilizadas até o momento de troca para reafiação.	31/03/17 à 30/06/17

Fonte: autor (2017)

Por fim, levando em consideração a área de corte e os metros seccionados que ambas as ferramentas foram capazes de cortar até o momento de reafiação, foi possível estabelecer o custo de cada ferramenta por metro seccionado, também levando em consideração os desgastes apresentados por ambas. Desta maneira, tornou-se possível avaliar qual das ferramentas apresenta um melhor custo-benefício, sendo assim, a mais indicada para a aplicação em estudo.

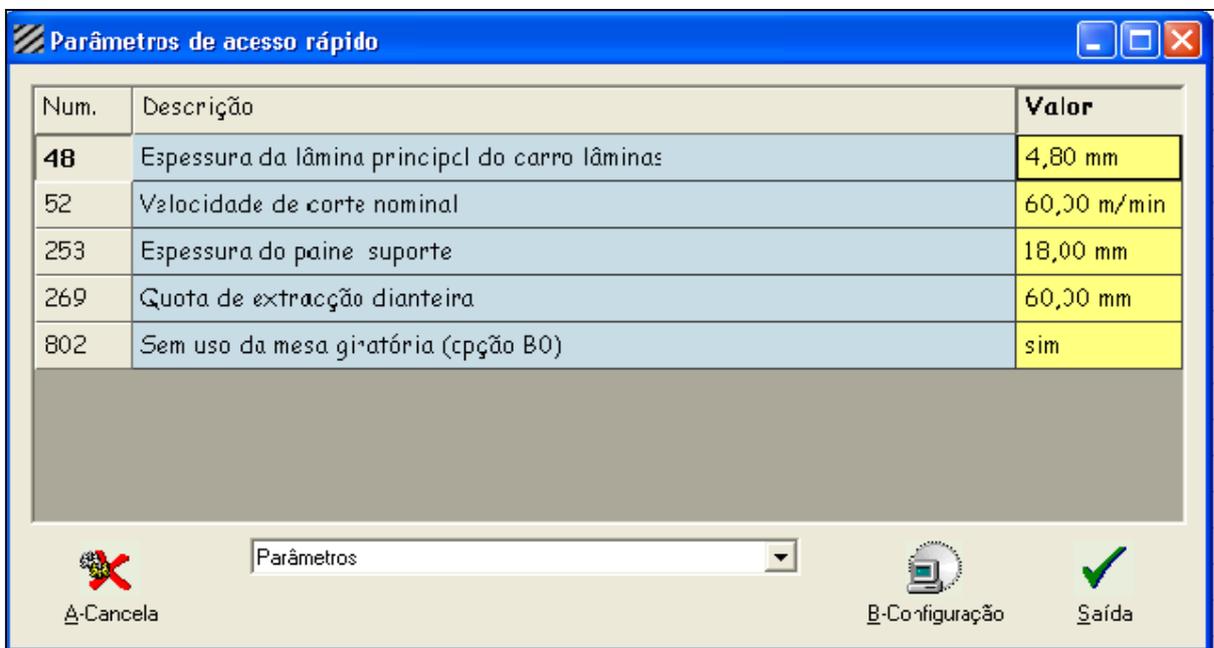
4 RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nos testes realizados experimentalmente. Os testes foram efetuados conforme o planejamento apresentado no capítulo anterior.

4.1 APLICAÇÕES DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental foi desenvolvido de maneira que se obtivesse igualdade das condições experimentais. Para que isso fosse possível, os experimentos foram executados no mesmo maquinário do processo produtivo da BRS Indústria de móveis, com acompanhamento contínuo das operações executadas e coleta de dados. Todos parâmetros indicados para os experimentos foram confrontados com os parâmetros já adotados pela empresa. As condições de corte, adotadas no maquinário estavam de acordo com o que fora proposto nos experimentos. A Figura 22 ilustra os parâmetros de corte adotados na máquina para os experimentos.

Figura 22 – Parâmetros de corte experimentais



Num.	Descrição	Valor
48	Espessura da lâmina principal do carro lâminas	4,80 mm
52	Velocidade de corte nominal	60,00 m/min
253	Espessura do paine suporte	18,00 mm
269	Quota de extração dianteira	60,00 mm
802	Sem uso da mesa giratória (opção B0)	sim

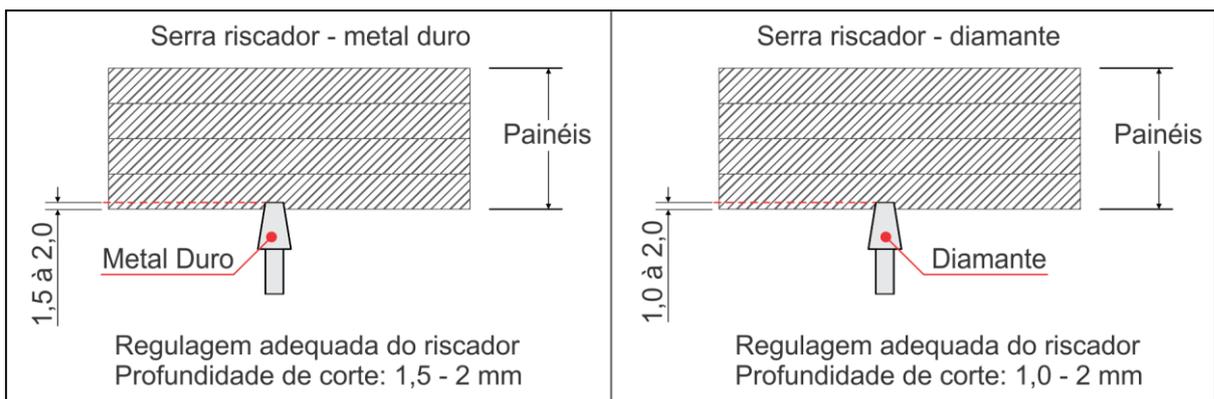
The screenshot shows a software window titled "Parâmetros de acesso rápido" with a table of parameters. Below the table, there is a dropdown menu set to "Parâmetros" and three buttons: "Cancelar" (with a red X icon), "Configuração" (with a gear icon), and "Saída" (with a green checkmark icon).

Fonte: autor (2017)

No momento de definição das condições adotadas no processo de serramento, já pode ser observada uma divergência quanto aos parâmetros utilizados pela empresa e aos indicados pelo fornecedor de ferramentas. Segundo o fornecedor Leitz Ferramentas para Madeira, a altura de corte inicial para a serra de metal duro deve ser de 1,5 mm, já para a

serra de diamante deve-se adotar uma altura inicial de 1,0 mm. Na medida em que a ferramenta começa a apresentar desgaste de gume ocasionando o lascamento dos painéis MDP e MDF, sua altura de corte deve ser ajustada, podendo em ambas as ferramentas atingir uma altura limite de 2 mm. Quando a serra atingir a altura limite e voltar a apresentar lascamento nas peças, a mesma deve ser retirada para reafiação. A empresa utilizava a serra riscadora, movimentando sua altura de corte até o limite do deslocamento da máquina que é de 3 mm, sendo assim, a vida útil da serra estava sendo reduzida e o seu desgaste sendo acelerado, impossibilitando o número máximo de afiações proposto pelo fabricante. Pelo histórico recente, documentado pela empresa, as serras de metal duro estavam suportando no máximo 10 reafiações, já o fornecedor indica de 15 a 20 reafiações da ferramenta, se utilizada da forma correta. A partir dos experimentos, a empresa passou a adotar os parâmetros na altura de corte indicados pelo fornecedor. A Figura 23 ilustra as faixas de altura de corte adotadas para as serras riscadoras de metal duro e diamante.

Figura 23 – Altura de corte da serra riscadora



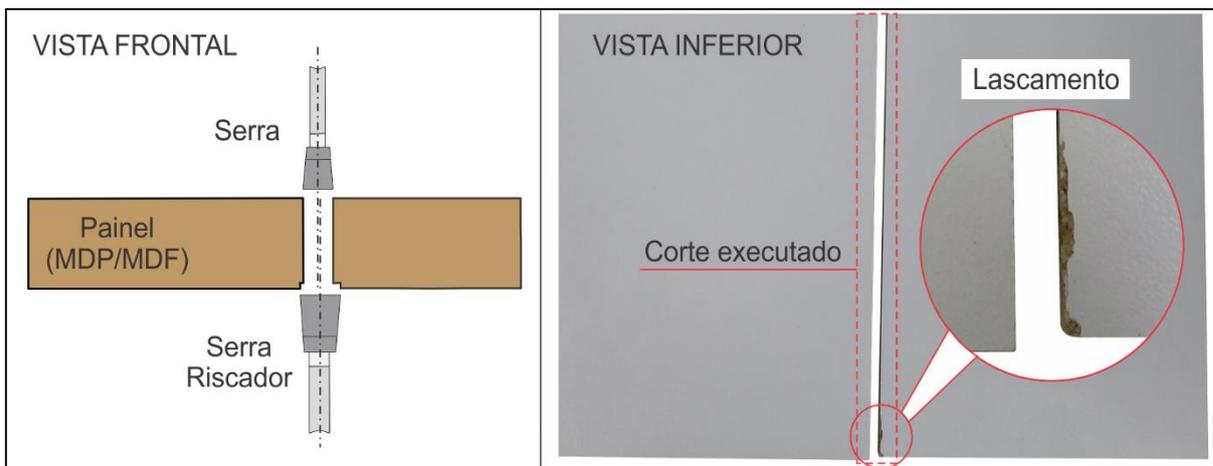
Fonte: autor (2017)

Outro fator relevante observado, é referente ao ajuste lateral da serra riscadora em relação a serra principal de corte. A máquina possui ajuste lateral de alinhamento do riscador, desta maneira, nem sempre é necessário elevar a altura de corte para solucionar um possível lascamento dos painéis, podendo tal causa ser decorrente do desalinhamento das serras, e não do desgaste dos gumes. O desalinhamento das serras tem como característica principal o lascamento na parte inferior dos painéis em somente um dos lados de corte. A figura 24, demonstra o lascamento característico dos painéis de madeira em virtude do desalinhamento das serras.

O recurso de ajuste lateral foi adotado no processo produtivo, de maneira que ao surgirem lascamentos nos painéis, conforme ilustrado na Figura 24, fossem feitos ajustes laterais de alinhamento do riscador. Tal ajuste proporcionou uma maior vida útil as ferramentas, pois possibilitou que as serras fossem utilizadas em uma determinada altura de

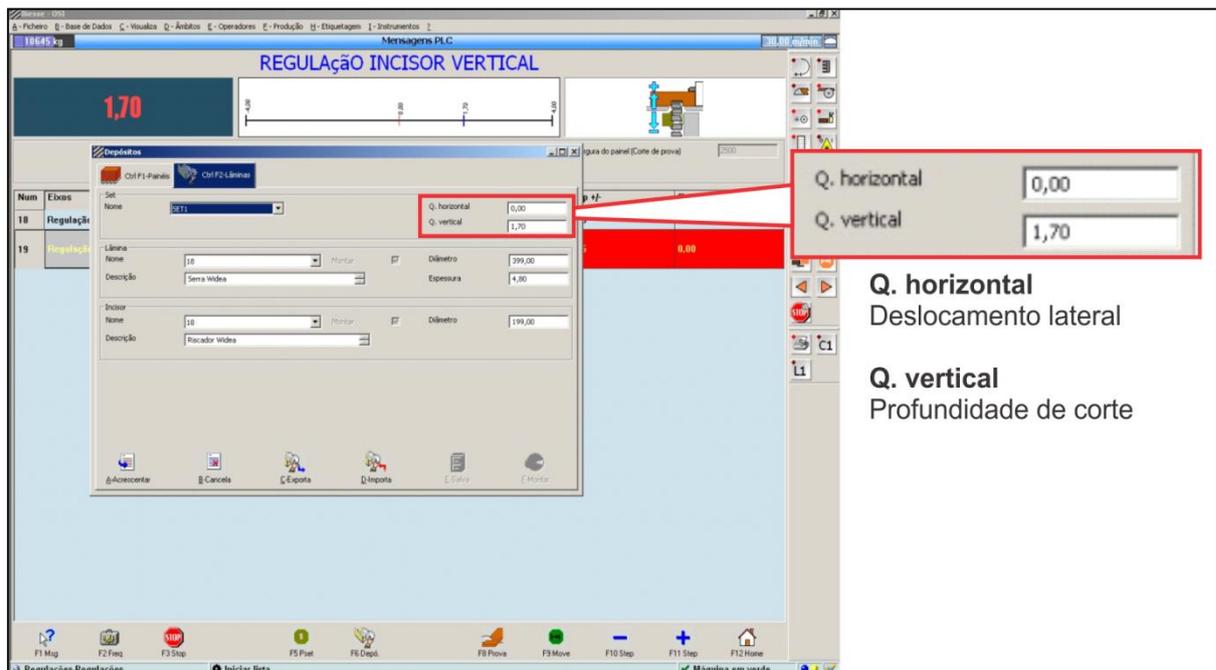
corte durante um maior período de tempo. Anteriormente, possíveis lascamentos gerados pelo desalinhamento eram solucionados com o ajuste vertical da serra riscadora. Com o aumento na profundidade de corte, o formato de dente cônico provoca o aumento da espessura de corte e assim evita o contato do desgaste de flanco com a superfície seccionada, solucionando os sinais de lascamento no corte. A Figura 25, demonstra os recursos de ajuste lateral e vertical da serra riscadora no software da máquina.

Figura 24 – Lascamento dos painéis devido ao desalinhamento das serras



Fonte: autor (2017)

Figura 25 – Ajuste lateral e vertical da serra riscadora



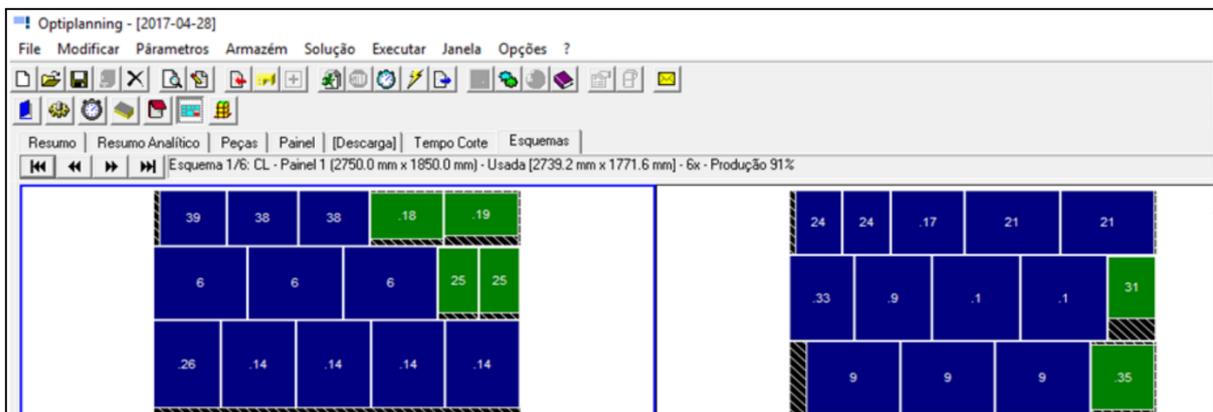
Fonte: autor (2017)

Segundo Lucas Filho (2004), a qualificação dos operadores através de treinamentos

aliados a utilização de parâmetros corretos de usinagem, influenciaram nos resultados positivos obtidos no seu estudo, dos quais destacam-se o aumento de vida útil das ferramentas, melhor acabamento de usinagem e menores desgastes nas ferramentas.

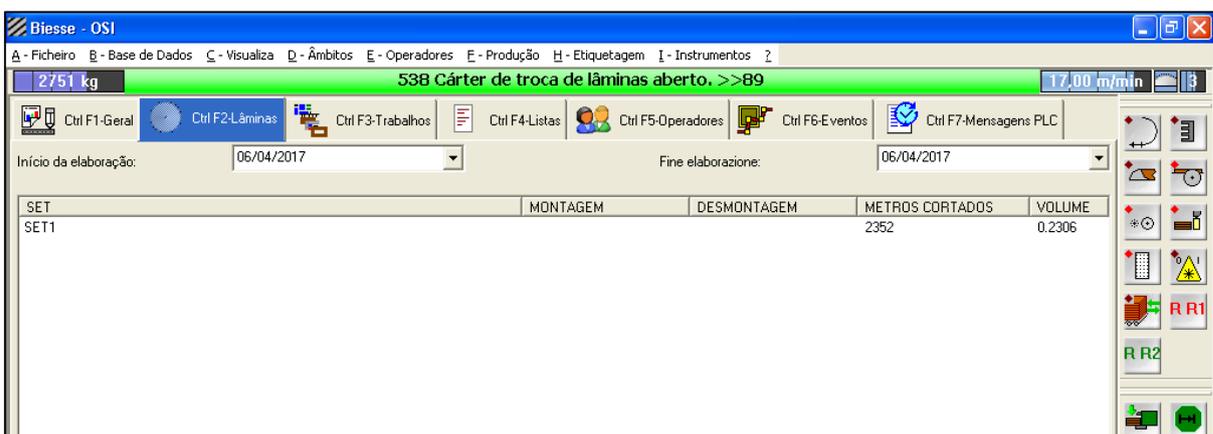
Conforme planejado no método experimental, para que a área de corte fosse mensurada corretamente e possibilitasse uma igualdade entre as ferramentas, o recurso estatístico da Seccionadora SELCO EBTR foi utilizado para a coleta de dados, o mesmo calcula o perímetro de corte (L) da serra riscadora em cada plano de corte executado. Já a profundidade de corte foi dimensionada no decorrer do processo de corte..O recurso não era utilizado pela empresa, e no decorrer de sua utilização pode ser adotado como uma ferramenta para indicar o momento correto de troca das ferramentas, através da área de corte executada durante sua utilização. Tais dados obtidos, foram confrontados aos dados fornecidos pelo Optimizador responsável pela geração dos planos de corte. As Figures 26 e 27, demonstram respectivamente um plano de corte gerado pelo software Optplanning e os dados do perímetro de corte fornecidos pela máquina seccionadora.

Figura 26 – Software Optplanning, responsável pela geração de planos de corte



Fonte: autor (2017)

Figura 27 – Recurso estatístico Seccionadora SELCO EBTR 108



Fonte: autor (2017)

4.2 RESULTADOS DOS PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.2.1 Procedimento experimental 1: Ferramenta de metal duro

Neste tópico serão apresentados os dados coletados durante o procedimento experimental 1. A ferramenta de metal duro utilizada no experimento, foi colocada em operação no dia 09/03/17 e retirada de uso no dia 23/03/17, totalizando uma área de corte de aproximadamente 38,3 m² e um perímetro percorrido de 20.727 m . A serra operou com velocidade de corte de 60 m/min, com profundidade de corte inicial de 1,5 mm e final de 2 mm. A ferramenta foi retirada ao apresentar sinais de lascamento nas peças seccionadas, quando a mesma estava na altura limite estipulada anteriormente.

Conforme a previsão inicial, baseada em dados do ano de 2016, as serras apresentariam em média uma durabilidade de 3 dias úteis. Esta média não se comprovou nos testes realizados, no qual a serra permaneceu em utilização durante 11 dias úteis, sendo assim, quase 4 vezes mais duradoura que a média apresentada anteriormente. Este dado não serve como um comparativo proporcional, pois descarta a variação diária da área de corte seccionada, mas deve ser considerado pois esta variação mencionada é baixa. O resultado obtido, deve-se ao controle de parâmetros estabelecido no procedimento experimental e executado durante os experimentos. A Tabela 1, demonstra os dados coletados para obtenção do perímetro e área de corte no experimento 1.

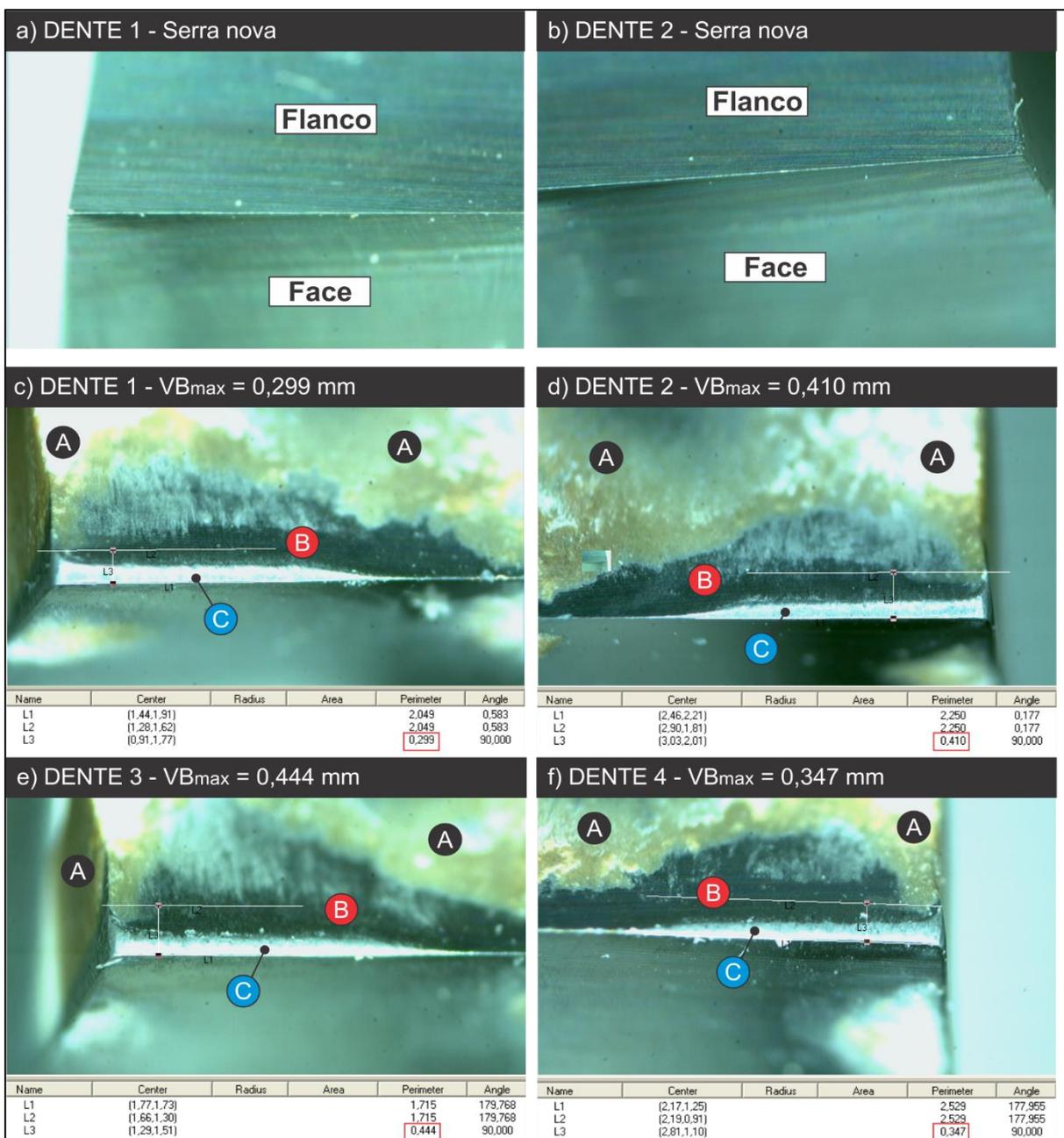
Tabela 1 – Coleta de dados do experimento 1

Data		Perímetro (m)			Altura de corte (mm)	Área de corte (m ²)
		MDP	MDF	MDP + MDF		
1	09/03/17	563	27	590	1,5	0,885
2	10/03/17	2943	50	2993	1,6	4,7888
3	13/03/17	2557	0	2557	1,7	4,6026
4	14/03/17	1378	0	1378	1,8	2,2428
5	15/03/17	1713	0	1713	1,9	3,2547
6	16/03/17	2463	60	2523	1,9	4,7937
7	17/03/17	2439	0	2439	1,9	4,6341
8	20/03/17	1890	0	1890	2	3,78
9	21/03/17	772	0	772	2	1,544
10	22/03/17	1425	0	1425	2	2,85
11	23/03/17	2425	22	2447	2	4,894
Total		20.727 m				38,3 m²

Fonte: autor (2017)

Após ser retirada de operação no momento indicado para reafiação, a serra de metal duro foi analisada no microscópio com a finalidade de observar os desgastes decorrentes da sua utilização. Para coleta das imagens, utilizou-se uma ampliação de 15X e o auxílio do Software ScopePhoto para dimensionar os desgastes. Foram feitas imagens em 4 dentes aleatórios, afim de, se obter uma maior amostragem comparativa entre os desgastes apresentados. A Figura 28 ilustra imagens dos dentes da serra antes de sua utilização (itens a e b) e imagens após sua utilização (itens c,d,e e f) que possibilitaram dimensionar o desgaste de flanco máximo (VB_{max}).

Figura 28 – Imagens do desgaste de flanco máximo (VB_{max}) do experimento 1



Fonte: autor (2017)

Nos itens (a e b) da Figura 28, pode-se constatar que a afiação das ferramentas foi executada no sentido perpendicular ao sentido de corte. A afiação é feita através de um rebolo que utiliza diamante como material de afiação. O movimento de afiação do rebolo é rotativo, por isso tais marcas não afetam o desempenho da ferramenta.

Quando as ferramentas de corte apresentam desgaste excessivo ou uma afiação inadequada, o ângulo de saída pode ser reduzido ou tornar-se negativo, esta mudança na geometria do gume provoca um afundamento na face da madeira durante o corte, gerando elevadas forças de atrito e conseqüentemente reduzindo a vida útil da ferramenta (HOADLEY, 2000; GONÇALVES, 2000).

Nos itens (c,d,e e f) da Figura 28, são visíveis três regiões distintas nos dentes da ferramenta utilizada. Na região (A), com uma tonalidade mais clara, observa-se a área onde o gume da ferramenta sofreu desgaste de flanco e conseqüentemente perda de material. Na região (B), localizada no flanco da ferramenta, observa-se uma tonalidade mais escura que pode ter sido ocasionada pelo aquecimento da ferramenta, já que a sua utilização foi estendida até o fim da vida útil. A região (C), com uma tonalidade amarelada, apresenta material depositado que aderiu a ferramenta durante o corte, ou seja, resíduos dos painéis MDP e MDF. Os resíduos também estão presentes na região lateral dos dentes da serra.

Conforme descrito acima, Moreira et. al. (2011) destaca que quando as ferramentas de corte se aproximam do fim de sua vida útil, o elevado desgaste no gume da ferramenta pode aumentar as forças de corte exercidas, conseqüentemente as temperaturas nesta região tendem a aumentar, sendo responsáveis pela adesão do material seccionado.

Segundo Lucas Filho (2004), os experimentos executados em seu estudo demonstraram que a adesão de resinas e outras substâncias nas pastilhas de metal duro, causaram o aumento nas forças de corte, aquecimento da ferramenta, deformação plástica e quebras no gume das ferramentas.

O desgaste de flanco observado nas imagens da Figura 28 apresentou uniformidade entre os dentes da serra analisados. Desta maneira é possível afirmar que o processo produtivo (máquina e matéria-prima) não apresentou irregularidades, pois não foram evidenciadas quebras ou falhas nos gumes da ferramenta. O desgaste de flanco máximo (VB_{max}) variou de 0,299 mm (mínimo) à 0,444 mm (máximo), apresentando um desgaste médio de 0,375 mm. A Tabela 2 evidencia os valores dimensionados.

Tabela 2 – Valores desgaste de flanco máximo (VB_{max}) do experimento 1

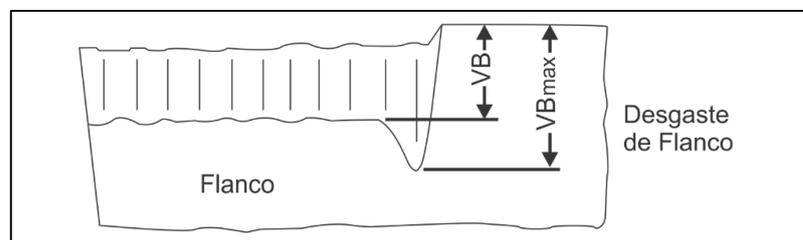
Desgaste de Flanco máximo (VB_{max})				
1	2	3	4	Média
0,299 mm	0,410 mm	0,444 mm	0,347 mm	0,375 mm

Fonte: autor (2017)

Os desgastes mensurados apresentaram uma variação significativa de aproximadamente 50%, com um intervalo de 0,145 mm entre o valor máximo e o mínimo. Esta diferença do desgaste pode ser atribuída a variação dos materiais MDP e MDF, os mesmos demonstram oscilação na quantidade de substâncias abrasivas presentes na sua composição. Segundo o fornecedor, a medida mínima de desgaste de flanco para possibilitar a reafiação é de 0,2 mm, já o limite máximo indicado é de 0,4 mm. Tal limite serve como parâmetro para evitar que a ferramenta exceda seu período correto de utilização, levando a possível quebra do gume ou desgaste excessivo. Considerando o desgaste máximo mensurado de 0,444 mm, a ferramenta apresentou um desgaste acima do limite estipulado, desta maneira seriam possíveis no máximo até 10 reafiações da ferramenta.

O desgaste de flanco observado na Figura 28 é característico em operações de corte, tendo uma região menor e constante correspondente ao VB, que no decorrer do gume apresenta um crescimento regular, atingindo um pico próximo a extremidade onde pode-se determinar o VB_{max} . Ambos desgastes, VB e VB_{max} estão evidentes e bem definidos nas imagens obtidas, sendo muito similares aos apresentados na literatura, conforme ilustrado na Figura 29.

Figura 29 – Desgaste de flanco em ferramentas de corte



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

O mecanismo responsável pelo desgaste de flanco é a abrasão mecânica. O desgaste é originado pela abrasão e ocasionado pela presença de partículas com elevada dureza no material da peça e pelas elevadas temperaturas atingidas no corte dos materiais. É considerado o tipo de desgaste mais comum, ele aponta que a ferramenta terá uma vida útil previsível e estável. É geralmente adotado como parâmetro de troca para ferramentas de corte (STEMMER, 1993; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

Nas ferramentas de metal duro o principal desgaste evidenciado é o desgaste de flanco. O desgaste excessivo pode resultar na quebra do gume, acabamento superficial inadequado e no aumento das forças de corte exercidas. Os principais elementos que influenciam o VB são, o teor de abrasividade do material usinado e o tempo de trabalho da ferramenta. A composição dos painéis MDP e MDF apresenta um fator importante que agrava o desgaste das ferramentas. Geralmente constituídos por madeiras Pinus e Eucaliptus,

também são encontrados nos painéis outros tipos de madeira com uma maior abrasividade, impurezas e substâncias de elevada dureza, além da presença de resinas à base de uréia que influenciam no desgaste excessivo e possíveis quebras da ferramenta. Esta variação de condições dos materiais dificulta a definição de um parâmetro para o momento de troca das ferramentas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001; GONÇALVES, 2000; HOADLEY, 2000)

4.2.2 Procedimento experimental 2: Ferramenta de diamante

Neste tópico, serão apresentados os dados coletados durante o procedimento experimental 2. A ferramenta de diamante utilizada no experimento, foi colocada em operação no dia 31/03/17 e retirada de uso no dia 17/04/17, totalizando uma área de corte de aproximadamente 38,3 m² e um perímetro percorrido de 26.679 m . A serra operou com velocidade de corte de 60 m/min, com altura de corte inicial de 1,2 mm e final de 1,5 mm. Mesmo sendo indicada a utilização inicial com altura de corte de 1 mm, não foi possível adotar este parâmetro, pois nesta altura surgiram lascamentos nos painéis seccionados, sendo assim necessário ajustar até 1,2 mm a altura de corte inicial, de maneira que o corte apresentasse o acabamento desejado.

A ferramenta foi retirada ao atingir a mesma área de corte executada no experimento 1. O parâmetro foi determinado para que os desgastes das ferramentas de metal duro e diamante fossem comparados em uma mesma área de corte aplicada. A Tabela 3, aponta os dados coletados para obtenção do perímetro e área de corte no experimento 2.

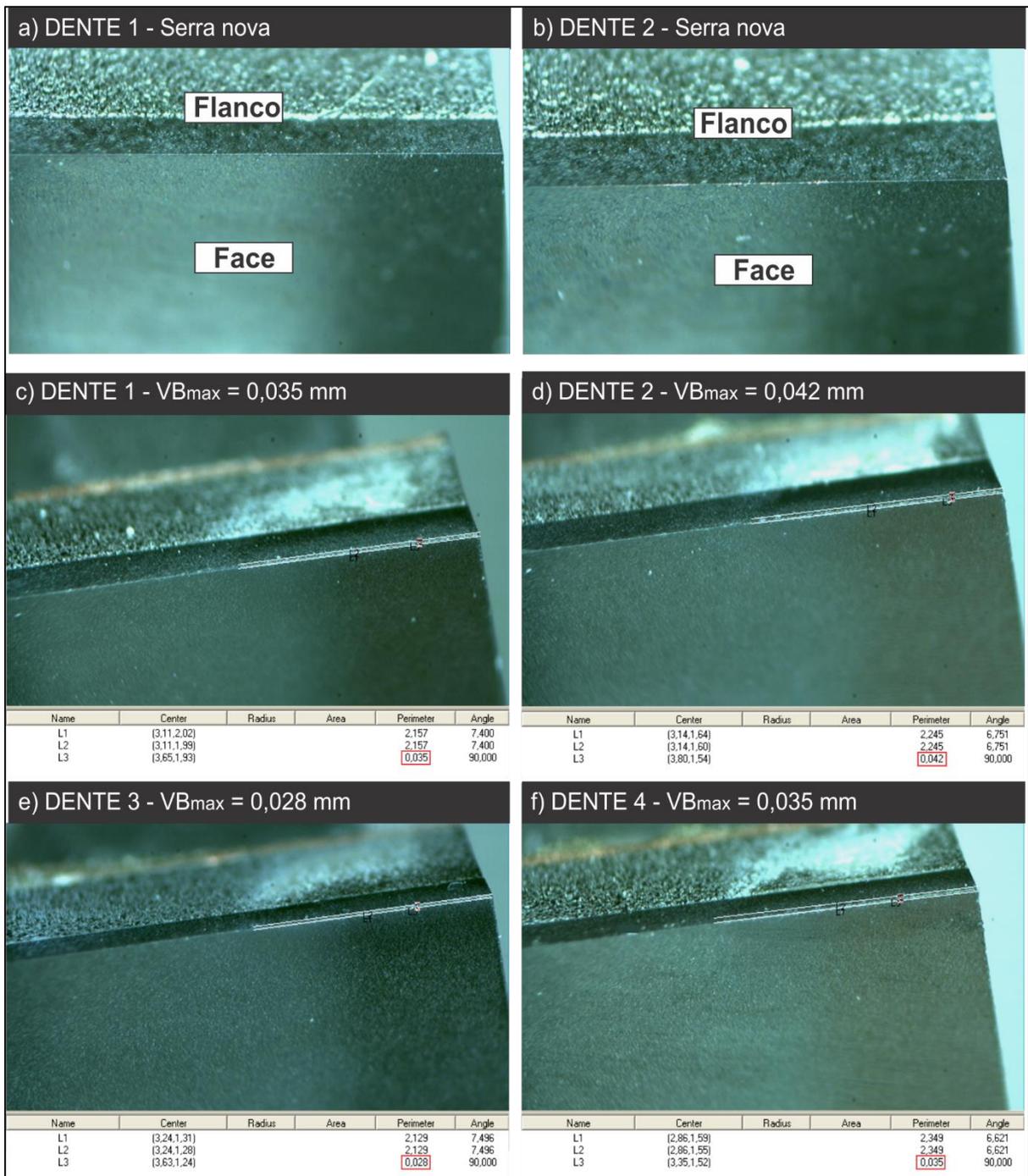
Tabela 3 – Coleta de dados do experimento 2

Data		Perímetro (m)			Altura de corte (mm)	Área de corte (m ²)
		MDP	MDF	MDP + MDF		
1	31/03/17	1809	70	1879	1,2	2,2548
2	03/04/17	2655	0	2655	1,3	3,4515
3	04/04/17	5101	0	5101	1,4	7,1414
4	05/04/17	1782	0	1782	1,45	2,5839
5	06/04/17	1670	22	1692	1,5	2,538
6	07/04/17	1673	0	1673	1,5	2,5095
7	10/04/17	3458	0	3458	1,5	5,187
8	11/04/17	1219	72	1291	1,5	1,9365
9	12/04/17	2064	0	2064	1,5	3,096
10	13/04/17	1774	0	1774	1,5	2,661
11	17/04/17	3310	0	3310	1,5	4,965
Total		26.679 m				38,3 m²

Fonte: autor (2017)

Após ser retirada de operação, a serra de diamante foi analisada no microscópio. Para coleta das imagens, utilizou-se uma ampliação de 15X e o auxílio do Software ScopePhoto para dimensionar os desgastes. Foram feitas imagens em 4 dentes aleatórios, afim de, se obter uma maior amostragem comparativa entre os desgastes apresentados. A Figura 30 ilustra imagens da serra antes da sua utilização (itens a e b) e após a utilização (itens c,d, e e f), as quais possibilitaram dimensionar o desgaste de flanco máximo (VB_{max}).

Figura 30 – Imagens do desgaste de flanco máximo (VB_{max}) do experimento 2



Analisando as imagens obtidas, pode-se observar um desgaste de flanco uniforme entre os dentes da serra analisados. O processo produtivo (máquina e matéria-prima) não apresentou irregularidades, pois não foram evidenciadas falhas ou outros tipos de desgaste nos gumes da ferramenta. O desgaste de flanco máximo (VB_{max}), variou de 0,028 mm (mínimo) à 0,042 mm (máximo), apresentando um desgaste médio de 0,035 mm. A Tabela 4 evidencia os valores dimensionados.

Tabela 4 – Valores desgaste de flanco máximo (VB_{max}) do experimento 2

Desgaste de Flanco máximo (VB_{max})				
1	2	3	4	Média
0,035 mm	0,042mm	0,028 mm	0,035 mm	0,035 mm

Fonte: autor (2017)

As dimensões dos desgastes de flanco apresentaram uma média de 0,035 mm, o desgaste apresentado estava em sua fase inicial conservando a geometria da ferramenta e o ângulo de afiação. A dimensão é considerada muito baixa, pois a medida mínima de desgaste para possibilitar a reafiação é de 0,2 mm, sendo assim a ferramenta ainda possuía uma longa vida útil neste momento. Devido a serra de diamante possuir uma maior resistência ao desgaste em comparação a ferramenta de metal duro, já eram esperados desgastes inferiores para uma mesma área de corte usinada. Por este motivo no experimento 3, a ferramenta de diamante teve sua utilização prolongada até se aproximar do fim da sua vida útil, ou seja, o momento de sua reafiação.

4.2.3 Procedimento experimental 3: Ferramenta de diamante

A ferramenta de diamante utilizada no experimento 3, foi colocada em operação no dia 31/03/17 e retirada no dia 30/06/17, totalizando uma área de corte de aproximadamente 305,4 m² e um perímetro percorrido de 184.167 m. A serra operou com velocidade de corte de 60 m/min, com altura de corte inicial de 1,2 mm e final de 1,75 mm. A ferramenta foi retirada de uso antes de atingir o fim da vida útil, devido sua longa durabilidade. A Tabela 5, demonstra os dados coletados para obtenção do perímetro e área de corte do experimento 3.

Tabela 5 – Coleta de dados do experimento 3

Data		Perímetro (m)			Altura de corte (mm)	Área de corte (m²)
		MDP	MDF	MDP + MDF		
1	31/03/17	1.809	70	1.879	1,2	2,2548

(continua)

(continuação)

Data		Perímetro (m)			Altura de corte (mm)	Área de corte (m ²)
		MDP	MDP	MDP + MDF		
2	03/04/17	2.655	0	2.655	1,3	3,4515
3	04/04/17	5.101	0	5.101	1,4	7,1414
4	05/04/17	1.782	0	1.782	1,45	2,5839
5	06/04/17	1.670	22	1.692	1,5	2,538
6	07/04/17	1.673	0	1.673	1,5	2,5095
7	10/04/17	3.458	0	3.458	1,5	5,187
8	11/04/17	1.219	72	1.291	1,5	1,9365
9	12/04/17	2.064	0	2.064	1,5	3,096
10	13/04/17	1.774	0	1.774	1,5	2,661
11	17/04/17	3.310	0	3.310	1,5	4,965
12	19/04/17	91	0	91	1,5	0,1365
13	20/04/17	1.370	0	1.370	1,5	2,055
14	25/04/17	4.657	0	4.657	1,5	6,9855
15	26/04/17	2.761	0	2.761	1,5	4,1455
16	27/04/17	1.229	26	1.255	1,5	1,8825
17	28/04/17	2.086	0	2.086	1,5	3,129
18	02/05/17	1.969	0	1.969	1,5	2,9535
19	03/05/17	1.698	0	1.698	1,5	2,547
20	04/05/17	1.329	0	1.329	1,5	1,9935
21	05/05/17	2.072	0	2.072	1,5	3,108
22	08/05/17	1.770	78	1.848	1,5	2,772
23	09/05/17	1.350	0	1.350	1,6	2,16
24	10/05/17	1.074	0	1.074	1,6	1,7184
25	11/05/17	1.358	0	1.358	1,6	2,1728
26	12/05/17	2.520	0	2.520	1,65	4,158
27	15/05/17	2.894	0	2.894	1,65	4,775
28	16/05/17	3.582	0	3.582	1,7	6,09
29	17/05/17	4.464	0	4.464	1,7	7,59
30	18/05/17	4.178	0	4.178	1,7	7,103
31	19/05/17	2.527	0	2.527	1,7	4,23
32	22/05/17	3.296	0	3.296	1,7	5,60
33	23/05/17	1.172	34	1.206	1,7	2,05
34	24/05/17	4.642	0	4.642	1,7	7,89
35	25/05/17	3.340	0	3.340	1,7	5,67

(conclusão)

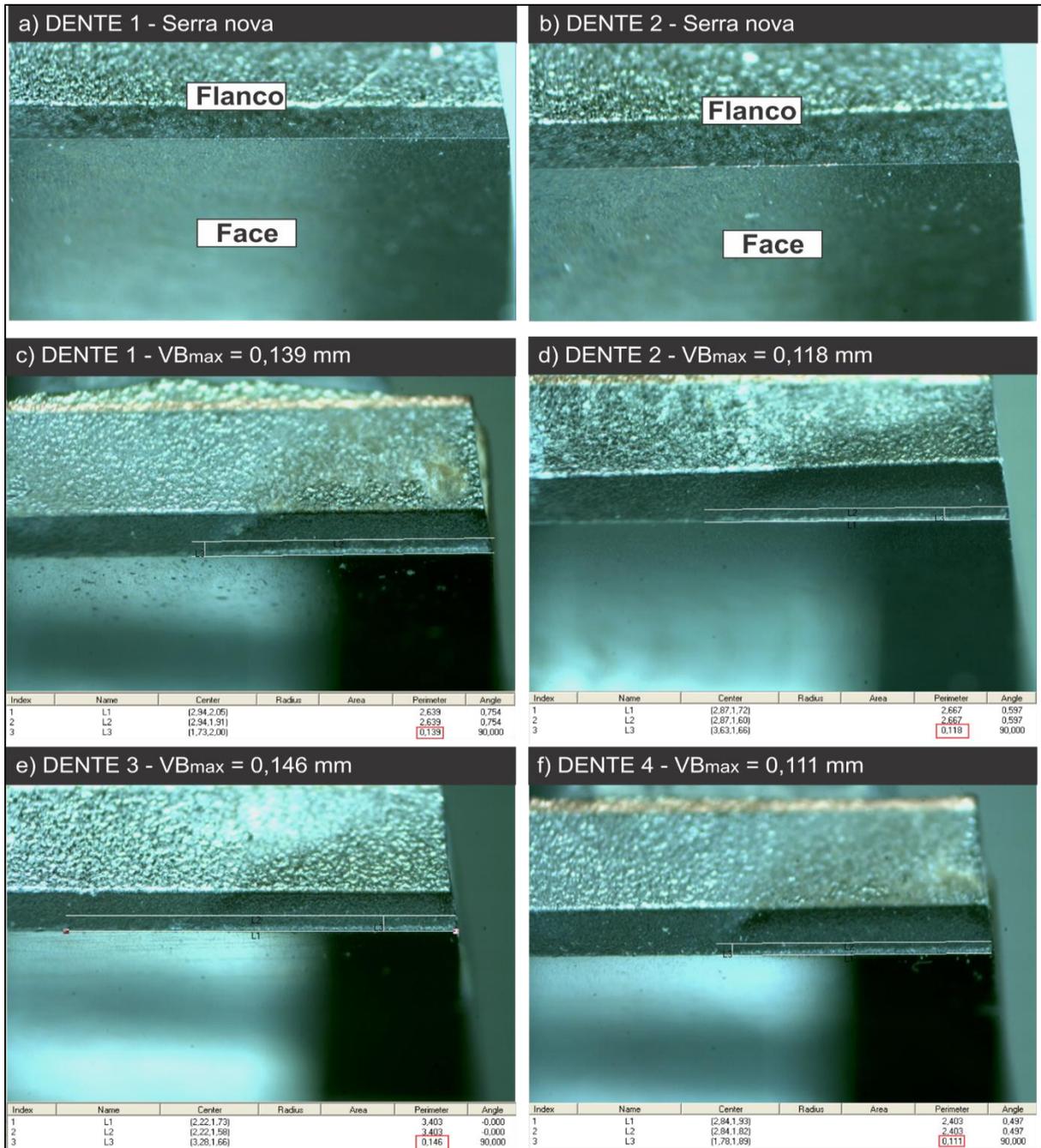
Data	Perímetro (m)			Altura de corte (mm)	Área de corte (m ²) MDP	
	MDP	MDP	MDP + MDF			
36	26/05/17	2.091	0	2.091	1,7	3,55
37	29/05/17	3.207	0	3.207	1,7	5,45
38	30/05/17	4.629	0	4.629	1,7	7,87
39	31/05/17	4.647	0	4.647	1,7	7,9
40	01/06/17	2.816	198	3.014	1,75	5,27
41	02/06/17	2.811	0	2.811	1,75	4,92
42	05/06/17	2.992	0	2.992	1,75	5,23
43	06/06/17	6.468	0	6.468	1,75	11,32
44	07/06/17	4.950	0	4.950	1,75	8,66
45	08/06/17	3.007	0	3.007	1,75	5,26
46	09/06/17	4.314	124	4.438	1,75	7,76
47	12/06/17	4.648	0	4.648	1,75	8,13
48	13/06/17	5.735	0	5.735	1,75	10,04
49	14/06/17	6.392	0	6.392	1,75	11,2
50	16/06/17	4.597	156	4.753	1,75	8,318
51	19/06/17	3.940	0	3.940	1,75	6,895
52	20/06/17	5.125	0	5.125	1,75	8,97
53	21/06/17	3.588	82	3.670	1,75	6,43
54	22/06/17	2.940	0	2.940	1,75	5,15
55	23/06/17	5.195	66	5.261	1,75	9,2
56	26/06/17	4.327	0	4.327	1,75	7,6
57	27/06/17	2.394	0	2.394	1,75	4,19
58	28/06/17	3.397	0	3.397	1,75	5,95
59	29/06/17	1.151	64	1.215	1,75	2,12
60	30/06/17	3.758	112	3.870	1,75	6,77
Total			184.167 m			305,4 m²

Fonte: autor (2017)

Após ser retirada de operação, a serra de diamante foi analisada no microscópio com a finalidade de observar os desgastes decorrentes da sua utilização. Para coleta das imagens, utilizou-se uma ampliação de 15X e o auxílio do Software ScopePhoto para dimensionar os desgastes. Foram feitas imagens em 4 dentes aleatórios, afim de, se obter uma maior amostragem comparativa entre os desgastes apresentados. A Figura 31 ilustra imagens dos dentes da serra antes de sua utilização (itens a e b) e imagens após sua utilização (itens c,d,e e f) que possibilitaram dimensionar o desgaste de flanco máximo (VB_{max}).

O processo produtivo (máquina e matéria-prima), mais uma vez não interferiu nos desgastes apresentados, pois a ferramenta não demonstrou desgastes excessivos ou falhas decorrentes destes fatores.

Figura 31 – Imagens do desgaste de flanco máximo (VB_{max}) do experimento 3



Fonte: autor (2017)

Ao analisar as imagens, fica evidente o comportamento diferenciado da ferramenta de diamante. Diferentemente da ferramenta de metal duro, não se constatou material seccionado aderido aos dentes da serra, assim como não há regiões com marcas de aquecimento da

ferramenta, geradas por forças elevadas de corte. O desgaste de flanco se apresentou com um formato mais “serrilhado” em comparação a ferramenta de metal duro, sendo decorrente da elevada dureza da ferramenta de diamante em contato com substâncias abrasivas e de elevada dureza dos painéis MDP e MDF. Apesar das diferenças mencionadas, o mecanismo responsável pelo desgaste apresentado também é a abrasão mecânica.

A ferramenta de diamante não apresentou adesão do material seccionado, segundo Fernandes (2009) apresenta em seu estudo, a resistência a adesão é resultante do elevado acabamento superficial apresentado pelo diamante policristalino.

Conforme Lucas Filho (2004) apresenta em seus experimentos, o impacto contínuo das ferramentas junto a peça seccionada durante um movimento rotativo de corte provoca a redução de resistência do gume da ferramenta perante as elevadas forças de corte, sendo assim, as partículas de diamante podem apresentar fraturas e quebras.

Segundo Fernandes (2009), devido ao diamante PCD apresentar uma condutividade térmica até 5 vezes superior à do metal duro K10, o calor gerado no corte de painéis MDP e MDF, é facilmente direcionado para fora da aresta de corte, reduzindo ao mínimo a temperatura no local de contato do gume da ferramenta com a peça usinada.

Ambos desgastes, VB e VB_{max} estão evidentes nas imagens obtidas, sendo muito similares aos apresentados na literatura, conforme já mencionado e ilustrado na Figura 29. O desgaste de flanco máximo (VB_{max}), variou de 0,111 mm (mínimo) à 0,146 mm (máximo), apresentando um desgaste médio de 0,1285 mm. Desta maneira seriam possíveis no máximo até 20 reafiações da ferramenta. A Tabela 6 evidencia os valores dimensionados.

Tabela 6 – Valores desgaste de flanco máximo (VB_{max}) do experimento 3

Desgaste de Flanco máximo (VB_{max})				
1	2	3	4	Média
0,139 mm	0,118 mm	0,146 mm	0,111 mm	0,1285 mm

Fonte: autor (2017)

Considerando a indicação do fornecedor, as dimensões de desgaste apresentadas foram satisfatórias. A medida indicada como ideal para reafiação é de 0,2 mm para o VB_{max} , sendo assim o desgaste apresentado neste momento foi abaixo do parâmetro estabelecido, possibilitando uma maior vida útil a ferramenta. Conforme Lucas Filho (2004) apresenta em seus experimentos, a definição de um momento de troca para as ferramentas auxiliou a estender a durabilidade das mesmas, evitando desgastes acima do previsto e consequentemente facilitando a operação de reafiação.

Nos experimentos executados por Teixeira et. al. (2011), foram mensurados desgastes de flanco (VB_{max}) de 0,07 mm à 0,14 mm, em uma operação de torneamento com acabamento

utilizando pastilhas de diamante PCD. O fim de vida foi determinado pela condição de acabamento. Os desgastes foram considerados satisfatórios, em contrapartida os piores resultados obtidos foram atribuídos as elevadas forças de corte combinadas a anisotropia da madeira. Outro fator observado foi a alteração na geometria do gume da ferramenta.

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS EXPERIMENTOS

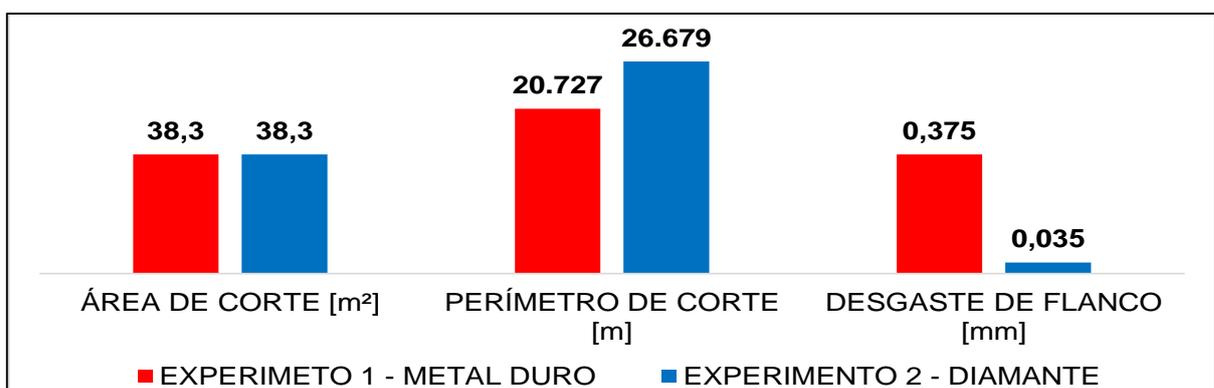
Neste tópico, serão confrontados os resultados obtidos durante os experimentos executados, sendo possível comparar parâmetros mecânicos e por fim determinar uma relação custo-benefício, na qual será possível indicar a ferramenta adequada para o processo de serramento em estudo.

4.3.1 Comparativo dos experimentos: metal duro X diamante

Os experimentos 1 e 2, podem ser comparados entre si, utilizando como parâmetro igualitário a área de corte executada em ambos. Tal parâmetro foi determinado pelo momento de troca para reafiação da serra de metal duro.

Mesmo atingindo a mesma área de corte nos experimentos, ambas as ferramentas apresentaram diferentes desempenhos e desgastes durante as operações. Quanto ao perímetro de corte, a ferramenta com pastilhas de diamante obteve um perímetro de corte aproximadamente 30% superior ao alcançado pela ferramenta com pastilhas de metal duro. O desgaste de flanco máximo (VB_{max}) foi outro fator avaliado, onde a ferramenta de diamante mais uma vez mostrou-se mais eficiente, apresentando como desgaste médio apenas 0,035 mm, enquanto na ferramenta de metal duro foi mensurado um desgaste médio de 0,375 mm, ou seja, aproximadamente 11 vezes maior. A Figura 32, apresenta os dados comparativos mencionados no texto acima.

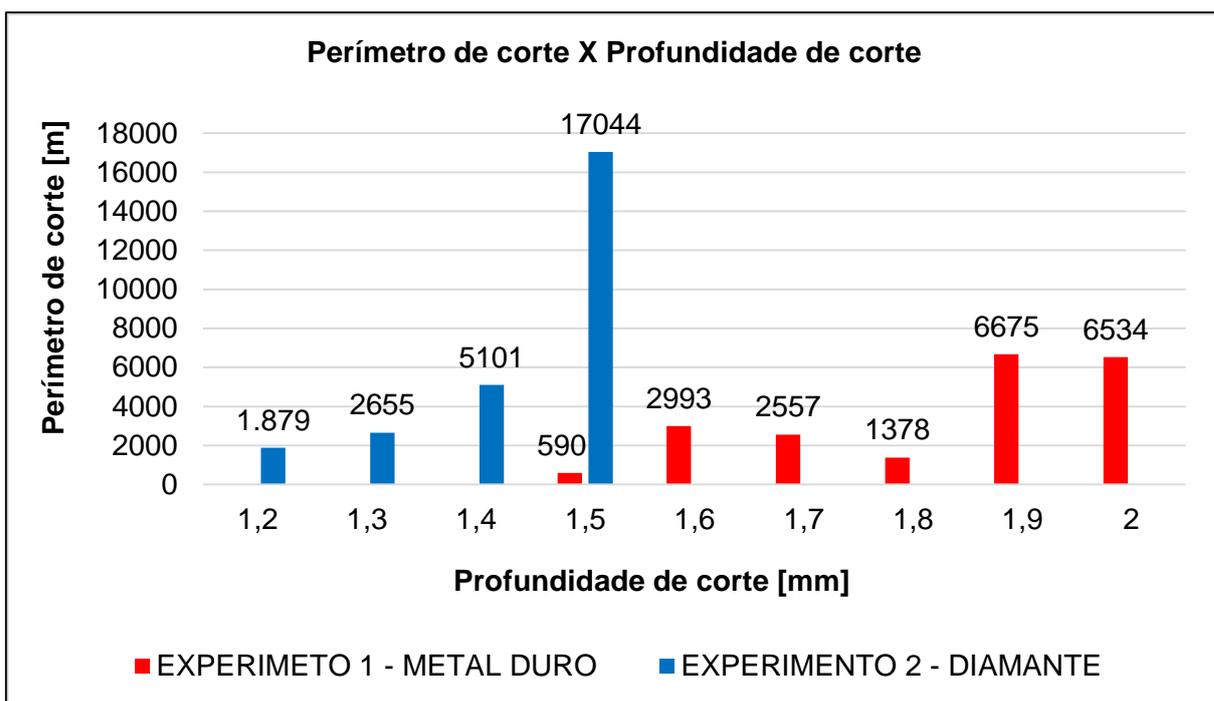
Figura 32 – Dados comparativos: experimento 1 X experimento 2



A ferramenta de diamante demonstra uma maior faixa de trabalho no que se refere a altura de corte (a_e), sendo possível trabalhar de 1,0 mm a 2,0 mm, já a ferramenta de metal duro inicia sua utilização com 1,5 mm e finaliza também ao atingir 2,0 mm. A maior capacidade de corte da ferramenta de diamante se comprovou nos experimentos, pois mesmo ao atingir a mesma área de corte da ferramenta de metal duro, ela ainda possuía um curso de 0,5 mm no ajuste da altura de corte, enquanto a outra ferramenta já havia alcançado sua altura limite. Sendo assim, apresentou uma maior capacidade de corte, sendo possível percorrer um maior perímetro de corte até que ambas serras utilizem a mesma altura de corte.

Pode-se exemplificar o dado mencionado, quando ambas ferramentas utilizaram 1,5 mm como altura de corte (a_e) a ferramenta de metal duro obteve um perímetro de corte de 590 m, enquanto a de diamante percorreu 17.044 m com a mesma altura de corte. Na Figura 33, observa-se um gráfico comparativo do perímetro de corte atingido em cada uma das faixas de profundidade de corte.

Figura 33 – Gráfico comparativo: perímetro de corte X profundidade de corte



Fonte: autor (2017)

A possibilidade de a ferramenta com pastilhas de diamante trabalhar em profundidades de corte inferiores apresentando um melhor acabamento de corte, confirma a superioridade do acabamento proporcionado em relação a ferramenta de metal duro. Com base nos resultados, fica evidente a maior resistência ao desgaste proporcionada pela ferramenta com pastilhas de diamante.

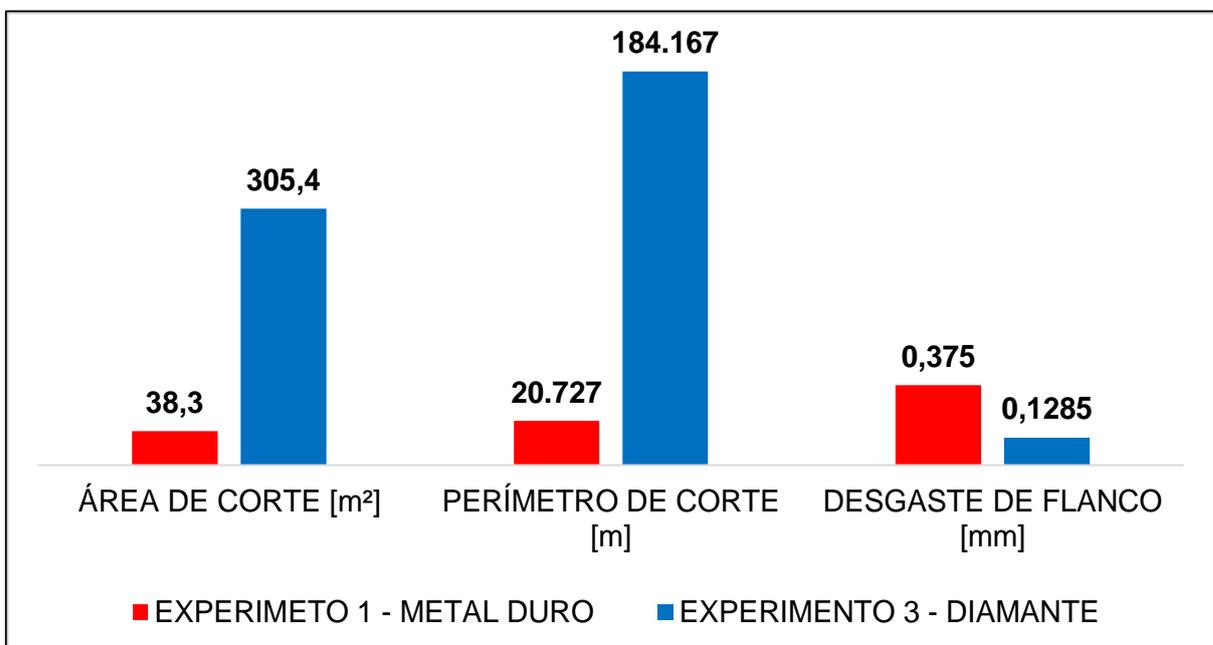
Segundo Teixeira et. al (2011) e Fernandes (2009) demonstraram em seus ensaios,

as ferramentas de diamante proporcionam um excelente acabamento, não apresentando tendência a colagem, sendo assim as forças de corte são reduzidas e consequentemente a vida útil da ferramenta é prolongada.

Os experimentos 1 e 3, podem ser comparados entre si, utilizando como referência a quantidade de metros seccionados e os desgastes apresentados por ambas ferramentas, já que as mesmas foram utilizadas até se aproximarem do momento indicado de troca para reafiação.

Apesar de aplicadas sobre as mesmas condições de experimento, mais uma vez a ferramenta de diamante se mostrou superior. Quanto ao perímetro de corte, a ferramenta com pastilhas de diamante obteve um perímetro de corte aproximadamente 9 vezes maior ao alcançado pela ferramenta com pastilhas de metal duro. O desgaste de flanco máximo (VB_{max}) foi outro fator avaliado, onde a ferramenta de diamante apresentou como desgaste médio 0,1285 mm, enquanto na ferramenta de metal duro foi mensurado um desgaste médio de 0,375 mm, ou seja, aproximadamente 3 vezes maior. Se for considerado o desgaste apresentado nas ferramentas em função dos metros seccionados por ambas, o desgaste na ferramenta diamantada foi aproximadamente 95% inferior para cada metro de painel seccionado. A Figura 34, apresenta os dados comparativos mencionados no texto acima.

Figura 34 – Dados comparativos: experimento 1 X experimento 3



Fonte: autor (2017)

O diamante PCD apresenta propriedades superiores aos demais materiais empregados na fabricação de ferramentas de usinagem. Pode-se apontar fatores como: valor elevado de condutividade térmica (até 5 vezes maior que do metal duro), elevada dureza (4 vezes maior

que a do metal duro) e a elevada resistência ao desgaste por abrasão. Estes fatores são fundamentais para a superioridade de desempenho (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001; FERNANDES, 2009).

A Figura 35 ilustra dados comparativos obtidos por uma empresa do segmento de corte de painéis de madeira reconstituída localizada no Reino Unido. Foram aplicadas nos testes serras circulares com pastilhas de metal duro e diamante no processo de serramento, ambas foram utilizadas até o fim de vida útil e sobre mesmas condições de operação. A durabilidade da ferramenta de diamante foi aproximadamente 60 vezes superior à alcançada pela ferramenta de metal duro (SEN; COOK; FLEMING, 1999).

Figura 35 – Dados comparativos: serramento com ferramentas de metal duro e diamante

Vida da Ferramenta em:	Peça	Serra com metal duro	Serra com PCD
Tempo	aglomerado	2 - 3 dias	6 meses
Metros lineares	aglomerado	14,000	865,000

Fonte: adaptado de Sen, Cook e Fleming (1999)

Segundo Lucas Filho (2004), ao aplicar a utilização de ferramentas diamantadas PCD em uma determinada empresa nos processos de usinagem, observou-se a frequente quebra das ferramentas nos processos de corte e fresamento sendo assim descartada a sua utilização, mesmo apresentando melhor acabamento e uma durabilidade que variou de 50 a 100 vezes superior as ferramentas similares fabricadas em metal duro. Em contrapartida, em outra empresa analisada, esta constante quebra dos gumes foi solucionada por meio de uma maior análise dos materiais a serem usinados, evitando madeiras com alto teor de abrasividade e substâncias de elevada dureza que pudessem danificar o gume da ferramenta. Desta maneira se tornou viável a utilização das ferramentas diamantadas.

4.3.2 Relação custo-benefício: diamante X metal duro

Os experimentos executados permitem a demonstração do custo-benefício de ambas as ferramentas de duas maneiras, levando em consideração os metros seccionados ou a área de corte executada. Para determinar a relação custo-benefício de ambas as ferramentas, foram considerados os seguintes fatores: valor das ferramentas, metros seccionados, área de corte e desgaste de flanco.

Levando em consideração tais fatores, pode-se indicar o custo de cada ferramenta por metro seccionado (R\$/m) e pela área de corte (R\$/m²), vale ressaltar que o desgaste de flanco

foi utilizado como um fator proporcional no custo, devido a ferramenta de diamante ter apresentado um desgaste de aproximadamente 66% inferior ao da ferramenta de metal duro. As tabelas 7 e 8 demonstram o custo de operação das ferramentas em função dos metros seccionados e da área de corte executada respectivamente, utilizando os resultados obtidos durante os experimentos 1 e 3.

Tabela 7 – Custo de operação (R\$/m) – Ferramenta metal duro x diamante

Ferramenta	Valor da ferramenta	Metros seccionados	Desgaste de flanco	Custo de operação
Metal duro	R\$ 298,00	20.727 m	0,444 mm	R\$ 0,014 /m
Diamante	R\$ 2.156,00	184.167 m	0,146 mm	R\$ 0,004 /m

Fonte: autor (2017)

Tabela 8 – Custo de operação (R\$/m²) – Ferramenta metal duro x diamante

Ferramenta	Valor da ferramenta	Área de corte	Desgaste de flanco	Custo de operação
Metal duro	R\$ 298,00	38,3 m ²	0,444 mm	R\$ 7,78 /m ²
Diamante	R\$ 2.156,00	305,4 m ²	0,146mm	R\$ 2,40 /m ²

Fonte: autor (2017)

Para determinar qual a ferramenta é a mais adequada no processo analisado, considerando todas reafiações possíveis, devem ser considerados fatores como: acabamento, valor das ferramentas, custos de reafiação, número de reafiações, tempos de set up e metros seccionados pelas ferramentas. Esta definição não pode ser estabelecida no presente experimento, pois ambas as ferramentas foram utilizadas somente em um ciclo de sua vida útil.

5 CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido surgiu de uma motivação da engenharia de processos da empresa em estudo. Necessitava-se de um método de análise capaz de identificar os mecanismos de desgastes presentes na utilização das ferramentas e permitisse definir qual a ferramenta de melhor desempenho e o momento correto de troca das mesmas no processo em estudo.

Durante a aplicação do método ficou evidente a importância dos ajustes que antecedem a operação de usinagem. Pode-se constatar que o baixo rendimento das ferramentas antes do estudo em análise, estavam relacionados diretamente ao desconhecimento dos parâmetros envolvidos na operação de serramento. Fatores como, alinhamento entre as serras, ajuste vertical da serra riscadora, parâmetros para trocas e reafiações, parâmetros de corte, entre outros, não eram respeitados ou utilizados, sendo precoce o fim da vida útil das ferramentas. Após a implementação dos parâmetros pré-definidos na metodologia e o maior controle dos operadores foi observado uma melhora no acabamento das peças e no desempenho das ferramentas aplicadas.

Com base nos resultados dos experimentos, ficou evidente que o principal mecanismo de desgaste presente na usinagem da madeira é a abrasão mecânica, responsável direta pelo desgaste de flanco. Tal fator deve-se ao alto teor de abrasividade e partículas de elevada dureza presentes na composição dos painéis de madeira reconstituída. Quanto ao desempenho, a ferramenta de diamante apresentou como principais vantagens: maior durabilidade, menor desgaste, maior vida útil e acabamento superior. O principal fator desfavorável a sua utilização é seu elevado custo de compra e manutenção quando comparada a ferramenta de metal duro. Embora tenha um custo inicial superior, a ferramenta de diamante tem um melhor custo-benefício ao longo de sua utilização quando comparada a ferramenta de metal duro. Os resultados apontaram um custo menor tanto para metros seccionados quanto para a área de corte aplicada. Isto sem considerar a quantidade inferior de set up's e o maior número de reafiações possíveis para a ferramenta de diamante. Tais fatores impactam diretamente no custo de utilização das ferramentas ao longo de todos os ciclos da sua vida útil.

Em contrapartida, a altura de corte estabelecida inicialmente como parâmetro de fim de vida útil mostrou-se incapaz de tornar-se um parâmetro eficaz no controle de desgaste das ferramentas. A ferramenta de metal duro apresentou um desgaste excessivo respeitando tal parâmetro, já a ferramenta de diamante apresentou um desgaste previsível dentro dos parâmetros definidos. Embora a ferramenta de diamante tenha obtido resultados satisfatórios com este método, deve-se considerar para futuros experimentos o controle do desgaste utilizando como parâmetro a quantidade de metros seccionados ou o consumo de energia da

máquina.

Como resultado final, pode-se destacar que o método de análise foi capaz de identificar os mecanismos de desgaste presentes no processo de serramento e a ferramenta adequada para esta operação de usinagem. O método utilizado pode ser aplicado como base para futuras definições de ferramentas nos processos de usinagem disponíveis nas empresas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estender a utilização das serras até o fim da vida útil, utilizando o número máximo de reafiações.
- Analisar o rendimento das serras circulares após sua reafiação.
- Comparar a vida útil de ferramentas de metal duro com ferramentas de metal duro revestidas.
- Desenvolver novo método de serramento de painéis de madeira reconstituída, evitando a utilização de 2 serras na operação.
- Comparativo de ferramentas diamantadas e metal duro nos processos de fresamento e furação.

BIBLIOGRAFIA

- ABIPA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA. **Programa setorial da qualidade de painéis de partículas de madeira (MDP) e painéis de fibras de madeira (MDF)**, 2013. Disponível em: <<http://www.abipa.org.br>>. Acesso em: 30 Ago. 2016.
- ARSHINOV, V.; ALEKSEEVICH, G. **Metal Cutting Theory and Cutting Tool Design**. 4 ed. Tradução de Nicolas Weinstein. Moscow: Mir Publishers, 1979.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeiras. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.
- BERNECK S. A. PAINÉIS E SERRADOS. **Produtos MDF Natural e MDP**. Disponível em: <<http://www.berneck.com.br>>. Acesso em: 18 ago. 2016.
- BONTEMPO. **Linha Avanti Cucina**. Disponível em: <<http://www.bontempo.com.br>>. Acesso em: 20 ago. 2016.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia de Usinagem dos Materiais**. São Paulo: mm Editora, 2001.
- DOYLE, L. E., et. al. **Processos de fabricação e materiais para engenheiros**. Tradução de Roberto Rocha Veira; Edmond Daberlay; Horst L. A. Daar; Rosalvo Tiago Ruffino; Wolfgang Lucas. São Paulo: Editora Blücher, 1962. Título Original: Manufacturing processes and materials for engineers.
- FERNANDES, J. A. **Ferramentas diamantadas para usinagem de madeira**. 2009. 72 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Ciência dos Materiais, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blucher. 1970.
- GONÇALVES, M. T. T. **Processamento da madeira**. 1.ed. Bauru-SP: [s.n.], 2000.
- GONÇALVES, M. T. T.; RUFFINO, R. T.. Mecanismo de formação do cavaco na usinagem da madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 3., 1989, São Carlos. **Anais...** . São Paulo: [s.n.], 1989. v. 4, p. 163 - 202.
- GOTTLOB, W. J. **Determinação da vida de ferramentas de aço AISI classe D-6 do stellite-1 na usinagem de madeira de “Eucalyptus grandis”**. 1996. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.
- HOADLEY, R. B., **Understanding wood – a craftsman’s guide to wood technology**. Ed. The Tauton Press, Newtown – United States of America, 2000.
- IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: Ajir Gráfica e Editora Ltda., 2005.
- KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren Band 1: Drehen, Fräsen, Bohren**. 6. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1997.

KMINIAK, R. ; GASPARÍK, M. ; KVIETKOVÁ, M. The Dependence of Surface Quality on Tool Wear of Circular Saw Blades during Transversal Sawing of Beech Wood, **BioResources vol. 10 (nº 4)**, 2015, 14 p.

KRILEK, J. ; KOVÁČ, J. ; KUCERA, M. Wood Crosscutting Process Analysis for Circular Saws, **BioResources vol. 9 (nº 1)**, 2014, 14 p.

LUCAS FILHO, F. C. **Análise da usinagem da madeira visando a melhoria de processos em indústrias de móveis**. 2004. 176 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1 ed. Revisão de Rosalvo Tiago Ruffino. São Paulo: Editora Blücher, 2009.

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

MASISA DO BRASIL Ltda. **Comparativo MDF e MDP**. Disponível em: < <http://www.masisa.com> > Acesso em: 18 ago. 2016.

MATTOS, R. L. G.; GONÇALVES, R. M.; CHAGAS, F. B., **Painéis de Madeira no Brasil: Panorama e Perspectivas**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 27, p.121-156, 2008. Disponível em: < <http://www.bndes.gov.br> >. Acesso em: 30 ago. 2016.

McKENZIE, W.M; (1960). **Fundamental Aspects of the Wood Cutting Process**. Forest Products. Journal. 10 (9): 447-456.

MOREIRA, M. C. et al. Largura da fenda, formação de cavacos e desgaste gerados pela operação de serramento circular. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 7., 2013, Itatiaia. **Anais...** . Belo Horizonte: [s.n.], 2013. 9 p. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/anais/cobef/2013/PDFS/COBEF2013-0075.PDF>>. Acesso em: 04 maio 2017.

MOREIRA, M. C. **Serramento do Aço ABNT 1045 utilizando serras circulares com insertos de metal duro e cermet**. 2011; 144 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

OLIVEIRA, D. L. P. et al. ESTUDO NO COMPORTAMENTO DA FORÇA DE CORTE NA USINAGEM DO EUCALYPTUS GRANDIS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 8., 2015, Salvador. **Anais...** Rio Grande: [s.n.], 2015. 7 p.

POLLACK, H. W. **Tool design**. 2nd ed. New Jersey: Prentice – Hall International Editions, 1988.

ROSS, R.J. **Wood Handbook: Wood as an engineering material**, General Technical Report FLP-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010.

SANDVIK. **Classes Sandvik Coromant: Aplicações da área ISO**. <<http://www.sandvik.coromant.com/pt>>. Acesso em: 19 mar. 2017.

SEN, P. K.; COOK, M. W.; FLEMING, M. A. **Diamond and PCBN cutting tool materials-recent advances at the turn of the century**. In: Industrial Tooling'99: Third International Conference on Industrial Tooling. 1999. 212 p.

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

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte I**. 3. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1993. (Série Didática).

TEIXEIRA, C. R. et al. **Influência da anisotropia da madeira no desgaste das ferramentas diamantadas**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 6., 2011, Caxias do Sul - RS. **Anais...** . [s.n.], 2011. 10 p.

VIDAURRE, G. B. **Efeito dos parâmetros do dente de serra fita na qualidade e produtividade da madeira serrada de eucalipto**. 2006; 71 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, 2006.

WIRUTEX. **Catalogo Wirutex**. 9 ed., 2015. Disponível em: <[http:// www.wirutex.com.br](http://www.wirutex.com.br)>. Acesso em: 25 set. 2016.