

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DO ACABAMENTO GERADO POR FRESAMENTO EM CHAPAS DE MDF
A PARTIR DE DIFERENTES COMBINAÇÕES DE PARÂMETROS DE CORTE

por

Tiago Dagostim Jeremias

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Novembro de 2016.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

AVALIAÇÃO DO ACABAMENTO GERADO POR FRESAMENTO EM CHAPAS DE MDF
A PARTIR DE DIFERENTES COMBINAÇÕES DE PARÂMETROS DE CORTE

por

Tiago Dagostim Jeremias

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Comissão de Avaliação:

Prof. Ney Francisco Ferreira

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez

Prof. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 18 de novembro de 2016.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador, Dr. André João de Souza, por toda ajuda e orientação.

À minha namorada, Meriellen Medeiros Costa, por todo carinho, dedicação e compreensão.

A todos os meus familiares, principalmente meus pais e minha irmã por todo apoio e incentivo nestes anos de faculdade.

Aos meus colegas e amigos que sempre estiveram ao meu lado para que este momento se tornasse realidade.

JEREMIAS, T. D. **Avaliação do acabamento gerado por fresamento em chapas de MDF a partir de diferentes combinações de parâmetros de corte.** 2016. 24 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

O fresamento é um processo de fabricação por usinagem muito utilizado na indústria de móveis com obtenção de acabamento superficial de qualidade. Isso faz com que haja uma busca contínua por otimização visando melhorias na qualidade da peça fresada, redução do tempo de usinagem e diminuição dos desgastes das ferramentas de corte. Esta necessidade de um melhor acabamento se deve à importância visual da peça e também à qualidade requerida nos processos posteriores de montagem. Apesar disso, existem poucos trabalhos específicos tratando do processo de fresamento em MDF (*medium density fiberboard*) utilizando máquinas com comando numérico. Assim, realizou-se uma avaliação experimental do acabamento gerado por fresamento frontal em chapas de MDF com revestimento melamínico e 15 mm de espessura em uma fresadora CNC utilizando quatro fresas cilíndricas helicoidais de metal duro com 8 mm de diâmetro (com ângulo de hélice 10° e 30°; com duas e três arestas de corte). Foram variados o sentido de corte (concordante e discordante), a rotação (12000 e 18000 rpm), a velocidade de avanço (2,7 e 5,4 m/min) e a profundidade de corte axial (8 e 16 mm). Na avaliação quantitativa do acabamento, foram determinadas as rugosidades médias (aritmética e parcial) de cada amostra com o auxílio de um rugosímetro portátil; na qualitativa, foram realizadas análises do corte nas bordas do revestimento melamínico das amostras a partir de um microscópio digital. Com base nos resultados encontrados, concluiu-se que os parâmetros que resultaram em baixos valores de rugosidade e a inexistência de lascamentos no revestimento do MDF foram: fresa com três arestas e ângulo de hélice 10° no corte discordante utilizando rotação de 12000 rpm e velocidade de avanço de 2,7 m/min em apenas um passe com 16 mm de profundidade.

PALAVRAS-CHAVE: MDF, Processo de fresamento, Parâmetros de corte, Acabamento superficial.

JEREMIAS, T. D. **Evaluation of the surface finish generated by milling in MDF sheets from different combinations of cutting parameters.** 2016. 24 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

Milling is a machining process that is widely used in the furniture industry with a superior surface finish. This causes a continuous search for optimization aiming at improvements in the quality of the milled part, reduction of machining time and reduction of the cutting tool wear. This need for a better finish is due to the visual importance of the part and also to the quality required in the subsequent assembly processes. Despite this, there are few specific studies focus on MDF (Medium Density Fiberboard) milling process using Computerized Numerical Control (CNC) machines. Thus, an experimental evaluation of the finish generated by frontal milling of MDF sheets with melamine coating and 15 mm thickness was carried out on a CNC mill using four cylindrical helical carbide cutters with 8 mm diameter (with a helix angle of 10° and 30°, with two and three cutting edges). The cutting direction (concordant and discordant), rotation (12000 and 18000 rpm), feed rate (2.7 and 5.4 m/min) and axial depth of cut (8 and 16 mm) were varied. In the quantitative evaluation of the finishing, the roughness average (arithmetic and partial) of each sample was determined by a portable roughness tester; in qualitative analysis, the cut edges of the melamine coating of the samples were analyzed by digital microscope. Based on the results, it was concluded that the parameters resulting in low roughness values and the absence of chipping in the MDF coating were: three-edged cutter and 10° propeller angle in the discordant cut using 12000 rpm rotation and feed rate of 2.7 m/min in only one pass with 16 mm of depth.

KEYWORDS: Medium density fiberboard, Milling process, Cutting parameters, Surface finish.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
3.1	Chapas de MDF	2
3.2	Fresamento.....	3
3.3	Fresadoras CNC	3
3.4	Ferramenta de Corte.....	3
3.5	Rugosidade.....	4
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	5
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	8
5.1	Rugosidades das Superfícies Fresadas	8
5.1.1	Comportamento da rugosidade com a variação dos parâmetros de corte	8
5.1.2	Comportamento da rugosidade variando dois ou mais parâmetros de corte.....	10
5.2	Análise Qualitativa das Superfícies Fresadas	11
5.2.1	Análise das bordas quanto ao lascamento da lâmina de revestimento	11
5.2.2	Análise das superfícies usinadas quanto ao acabamento gerado.....	12
6	CONCLUSÕES.....	13
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
	APÊNDICES	16
	I – Interação dos parâmetros de corte para as rugosidades R_a e R_z das amostras	16
	II – Gráficos dos resultados das medições das rugosidades R_a e R_z das amostras.....	17

1 INTRODUÇÃO

O painel de madeira reconstituída ou painel a base de madeira MDF (*Medium Density Fiberboard*) é um produto industrial produzido a partir de fibras lignocelulósicas. É um material bastante empregado na indústria de móveis, pois apresenta homogeneidade, estabilidade dimensional, ótimo acabamento e resistência mecânica próxima à madeira maciça. O fresamento é um método de usinagem muito utilizado neste setor, com obtenção de acabamento superficial de qualidade [Deus, 2014]. Isso faz com que haja uma busca contínua por otimização visando melhorias na qualidade da peça fresada, redução do tempo de usinagem e diminuição da ocorrência de desgastes nas ferramentas de corte. A necessidade de um melhor acabamento se deve à importância visual da peça e à qualidade requerida nos processos posteriores de montagem.

A fabricação do MDF é feita a partir da aglutinação de fibras de madeira, aliada a resinas sintéticas e outros aditivos [Santos, 2010]. Seu processo de produção pode ser representado pela Figura 1.1.



Figura 1.1 – Processo de produção da chapa de MDF [Eucatex, 2015]

O MDF é considerado um material recente, pois sua primeira fabricação ocorreu no início dos anos 1960 nos Estados Unidos. Entretanto, no Brasil, teve início somente no segundo semestre de 1997. Desde então, a procura por este material na indústria moveleira vem crescendo ano após ano [Bom, 2008].

A demanda de móveis no Brasil varia de acordo com o nível de renda da população e o comportamento de alguns setores da economia, em particular na construção civil. Na questão da competitividade da indústria brasileira, seus principais fatores estão nas diferentes fontes de matérias-primas, estratégias para comercialização e distribuição [ABIMÓVEL, 2013].

A modernização da indústria moveleira no país tende a expandir ainda mais a comercialização de móveis devido à diminuição dos valores de produção. O estudo da otimização do corte em fresadoras com comando numérico faz com que a produção se torne mais rápida e competitiva. Conforme Deus (2014), a tecnologia está ligada à necessidade da indústria madeireira em obter materiais com qualidade aliado a baixo custo e alta produtividade. O crescimento desta indústria exige inovações. Porém, tendo o MDF uma anatomia peculiar, isso exige pesquisas para aumentar o conhecimento desses processos.

A norma ASTM D1666 (2011) cita a facilidade de materiais a base de madeira serem usinados. Porém, as propriedades de usinagem (velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de corte) são secundárias, embora ainda influencie o acabamento superficial.

A usinagem da madeira com alta qualidade é um grande desafio. Estas dificuldades são causadas por defeitos na madeira, diversidade anatômica das partes particulares da estrutura, bem como a alternância em propriedades como densidade, dureza, força e módulo de elasticidade. O efeito das propriedades da madeira sobre a qualidade da usinagem não é muito estudado, apesar de sua importância. Muitas irregularidades que ocorrem na superfície usinada podem ser explicadas pelas características estruturais da madeira. Sua estrutura porosa faz com que a usinagem nunca atinja uma planicidade ideal [Wilkowski *et al.*, 2013].

Castro e Gonçalves (2002) estudaram a usinabilidade do MDF em fresamento através da qualidade da superfície usinada. Verificaram que a rugosidade aumenta com o crescimento da velocidade de avanço. Observaram que os parâmetros de rugosidade R_a (média aritmética), R_q (média quadrática) e R_z (média parcial) são os mais indicados para a avaliação da usinabilidade. A densidade ao longo da espessura da chapa de MDF afeta a rugosidade, a qual aumenta da face para o centro. A rugosidade também é afetada pela espessura de corte.

Os trabalhos de Davim *et al.* (2009) e Deus *et al.* (2015) citam a influência dos parâmetros velocidade de corte e velocidade de avanço na rugosidade da superfície fresada em MDF. Em ambos, observou-se uma diminuição da rugosidade média (R_a) com um aumento da velocidade de corte e um crescimento de R_a com o aumento da velocidade de avanço. Isto mostra a vantagem de se usar uma velocidade de corte elevada no fresamento do MDF.

É importante ressaltar a necessidade do acabamento satisfatório para os processos posteriores da fabricação dos móveis. Após o corte, as peças são submetidas ao processo de colagem da fita de borda nos topos do MDF. A rugosidade da superfície usinada interfere diretamente na aplicação da cola e valores excessivos fazem com que a fita não cole adequadamente. O bom acabamento superficial também é determinante para a montagem dos móveis, prevenindo o aparecimento de frestas indesejáveis após a fixação das peças. Outro problema frequentemente encontrado é o arrancamento do revestimento melamínico ao cortar o MDF. Durante a usinagem o revestimento das faces junto ao corte se lasca e pequenos pedaços desprendem-se gerando uma aparência ruim para o móvel após a montagem.

Atualmente, devido à escassez de estudos relacionados à área do fresamento em MDF, os parâmetros de corte são ajustados conforme as características operacionais da ferramenta (fresa) fornecidas pelo fabricante. Isso pode levar a necessidade de ajustar os parâmetros de entrada após a verificação de alguma falha ou problema no acabamento.

2 OBJETIVOS

Avaliar a influência dos parâmetros de entrada do processo de fresamento tangencial no acabamento gerado nas faces laterais e nas bordas de chapas em MDF com espessura de 15 mm e revestimento melamínico.

Busca-se, portanto, a melhor combinação de parâmetros de entrada (profundidade axial de corte, velocidade de avanço, rotação e geometria da ferramenta – ângulo de hélice e número de arestas de corte) que resulte em uma face lateral com baixa rugosidade e/ou um acabamento satisfatório das bordas em que o revestimento melamínico se encontra.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Chapas de MDF

O MDF (*Medium Density Fiberboard*), painel de fibras de média densidade, teve como precursor o *papier-maché*. Já tinha sua utilização no Japão como forma de painéis na construção civil a cerca de 500 anos a.C. A primeira fábrica de painéis com densidade que poderia classificá-los em MDF surgiu em 1898: *The Patent Imperable Millboard Co.*, montada por *Sundbury-on-Thames*, na Inglaterra. O processo de fabricação do MDF consiste em: preparação da madeira; transformação da madeira em cavacos; transformação dos cavacos em fibras; secagem das fibras e aplicação do adesivo; formação do painel; prensagem; e por fim esquadrejamento em painéis menores. Sua fabricação é muito parecida com a do aglomerado, tirando o fato de a madeira passar por um processo de refinação que não rompe suas fibras, somente as separa [Basso, 2011].

De acordo com Pinkowski *et al.* (2011), a chapa de MDF é um produto muito utilizado na indústria moveleira. Além das suas numerosas vantagens, caracteriza-se também por deficiências das quais a sua difícil manuseabilidade é uma das mais graves.

O uso de uma técnica de usinagem adequada para o corte do MDF pode minimizar ou mesmo corrigir problemas devido à sua variabilidade.

3.2 Fresamento

O fresamento é um processo de usinagem que tem como ferramenta a fresa. Esta ferramenta possui múltiplas arestas cortantes, e seu movimento de corte é proporcionado pela rotação ao redor do eixo-árvore da fresadora. Conforme a posição deste eixo, o fresamento é classificado em: horizontal, vertical e inclinado. Pela disposição dos dentes ativos da fresa, classifica-se como: tangencial, frontal ou ainda uma combinação dos dois [Diniz *et al.*, 2013].

O fresamento tangencial é a operação de corte usada em chapas de MDF na qual os dentes ativos estão na superfície cilíndrica da ferramenta (no caso, o eixo da fresa é paralelo à superfície que está sendo gerada na peça).

Os sentidos dos movimentos de corte e de avanço no fresamento tangencial podem ser discordantes ou concordantes. No fresamento discordante, o ângulo de contato do dente da fresa com a peça (φ) e a espessura de corte (h) aumentam de zero até um valor máximo (o sentido de movimento de avanço da peça é contrário ao movimento de rotação da fresa) e no fresamento concordante, o ângulo e a espessura começam em um valor máximo e decrescem até zero (o sentido de avanço da peça é o mesmo da rotação da fresa) [Diniz *et al.*, 2013].

De acordo com Deus *et al.* (2016), a forma como o material é removido pode causar resultados diferentes na rugosidade da superfície. Para o MDF, composto de fibras lignocelulósicas prensadas com resina e presença de calor, a resposta concordante e discordante no fresamento apresenta resultados diferentes no acabamento das superfícies usinadas. Concluíram que o fresamento tangencial discordante em MDF apresenta menores valores de rugosidade, mostrando valores até 50% menores que o concordante.

Pinheiro (2014) estudou o fresamento concordante e discordante em centro de usinagem. O resultado para a rugosidade média (R_a) mostra diferenças estatisticamente significativas para as duas direções de corte. Concluiu-se que a direção discordante forneceu a menor rugosidade e melhor acabamento, mas com alto consumo de energia.

Com relação à influência dos parâmetros de corte no acabamento gerado por fresamento frontal em MDF, Savas e Ozay (2007) e Davim *et al.* (2009) encontraram resultados satisfatórios de rugosidades utilizando velocidades de avanço (v_f) da ordem de 3 m/min. Já para Valarmathi *et al.* (2013), os valores de v_f próximos de 2 m/min revelaram-se mais adequados para o acabamento, beneficiando a produtividade na indústria moveleira. Castro e Gonçalves (2002), Deus *et al.* (2015) e Rossi *et al.* (2005) observaram que o parâmetro profundidade de corte tem pouca influência na rugosidade média. Deus *et al.* (2015) concluíram também que a qualidade da superfície sofre maior influência do avanço por dente (f_z) – por conseguinte, de v_f – que da velocidade de corte (v_c).

3.3 Fresadoras CNC

As fresadoras com comando numérico computadorizado (CNC) foram utilizadas pela primeira vez na indústria aeroespacial para cortar desenhos complexos em folhas de alumínio. Após, no início dos anos 1980, esta tecnologia foi utilizada em muitos tipos de máquinas na indústria moveleira. Novas funcionalidades e otimização do desempenho são constantemente desenvolvidos, o que faz as máquinas-ferramentas CNC desempenharem um papel cada vez maior no sucesso do setor moveleiro [Albert, 2009].

Segundo Sutcu e Karagoz (2012), o CNC foi introduzido na indústria madeireira para, automaticamente, cortar, perfurar e dar acabamento. A fresadora CNC tornou-se popular na fabricação de móveis, e tem sido usada para o desbaste, fresamento lateral e modelagem de móveis. Esta tecnologia apresenta muitas vantagens relacionadas com produção, acabamento da superfície e qualidade da peça usinada. Assim, conforme Deus *et al.* (2016), a usinagem MDF em fresadoras CNC representa a tecnologia que combina materiais, máquinas e ferramentas, o que resulta em peças de acabamento mais precisos e de qualidade.

3.4 Ferramenta de Corte

Existem diversos tipos e formas de fresas para a usinagem de diferentes tipos de geometria de peças. A escolha entre elas vai depender da relação entre as profundidades de

corte axial (a_p) e radial (a_e) e do tipo de máquina disponível. Esses diversos tipos de fresas são fabricados principalmente em aço rápido, aço rápido revestido e metal duro. A eficiência do metal duro é maior em altas velocidades de corte e resiste as mais altas temperaturas de corte que o aço rápido. Atualmente, devido ao fato de que as fresadoras CNC possibilitam rotações cada vez mais altas, as fresas inteiriças de metal duro têm sido uma opção vantajosa para ferramentas com pequeno diâmetro (até 20 mm) [Diniz *et al.*, 2013].

O fresamento tangencial é geralmente realizado por uma fresa cilíndrica helicoidal com arestas longas. Estas geralmente possuem dentes helicoidais que geram uma força máxima de corte (como também a sua oscilação) menor que as fresas cilíndricas de dentes retos. Por esta razão, são empregadas sempre que possível. Além disso, as fresas helicoidais produzem uma componente da força de usinagem na direção axial, exigindo que o eixo-árvore da máquina seja dimensionado para suportar esse tipo de esforço [Diniz *et al.*, 2013].

De acordo com Diniz *et al.* (2013), os fatores que definem o número de dentes (z) da fresa são: material da peça (materiais que geram cavacos longos exigem menor z); tamanho da peça (recomenda-se sempre manter $z \geq 2$ dentes atuando no corte simultaneamente); estabilidade do sistema máquina-ferramenta-peça (quanto maior z , menor a remoção de material por dente e menores os esforços de corte); acabamento requerido na peça (quanto menor f_z e, portanto, quanto maior z para um determinado $v_f = f_z \cdot z \cdot n$, melhor o acabamento).

3.5 Rugosidade

As superfícies irregulares geradas no fresamento tendem a diminuir a qualidade da peça. Esta qualidade pode ser determinada pela medição da rugosidade do MDF na área do corte. Portanto, é possível medir a qualidade da superfície e otimizar o processo de usinagem através do ajuste da velocidade de corte, velocidade de avanço, profundidade de corte, entre outros. A qualidade da superfície fresada é muito importante na indústria, pois tem influência direta no custo final do produto. A investigação da qualidade das superfícies fresadas mostra que a rugosidade é afetada pela velocidade de corte, profundidade de corte, condições da ferramenta e a peça de trabalho [Deus *et al.*, 2015].

Segundo Machado *et al.* (2009) e Piratelli Filho (2011), a rugosidade é um conjunto de irregularidades microgeométricas, ou seja, pequenas saliências ou reentrâncias existentes em uma superfície. O perfil de rugosidade é obtido após separação do desvio de forma e da textura secundária através do uso de filtros. Para sua avaliação é necessário o uso do comprimento de amostragem (l_e) e do comprimento de medição (l_m), que, em geral, $l_m = 5 \cdot l_e$.

Os parâmetros mais utilizados para MDF são a rugosidade média (R_a) e média parcial (R_z). A rugosidade média (R_a) tem por definição o valor médio aritmético de todos os desvios do perfil em relação a uma linha média dentro de um dado comprimento de medição (l_m) (Fig.3.1a) [Piratelli Filho, 2011]. Já a rugosidade média parcial (R_z) tem por definição a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes em cada *cut-off* (Fig.3.1b) [Tavares, 2012].

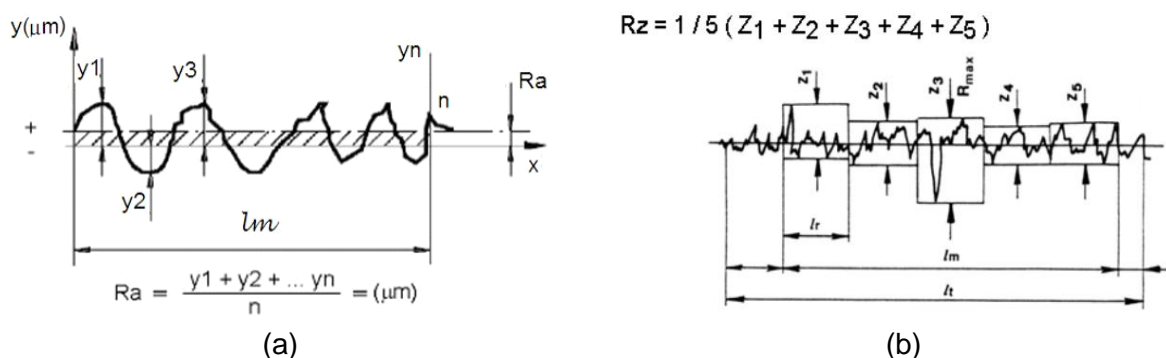


Figura 3.1 – Parâmetros de rugosidades: (a) média aritmética (R_a) [Piratelli Filho, 2011]; (b) média parcial (R_z) [Tavares, 2012].

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental descreve os equipamentos, os materiais utilizados e as metodologias da usinagem, avaliação e análise dos dados.

O fresamento foi realizado na indústria *Rinnovato*, que atua no segmento moveleiro.

Uma chapa de MDF com 2750 x 350 x 15 mm (comprimento x largura x espessura) e revestimento melamínico branco nas faces foi utilizada para obter todos os corpos de prova necessários para a análise.

De acordo com a empresa Duratex, fabricante do MDF utilizado, o material possui densidade mínima de 650 kg/m³, resistência à tração perpendicular de 5,6 kgf/cm² (0,55 MPa), módulo de elasticidade mínima de 22450 kgf/cm² (2,2 GPa) e umidade em temperatura ambiente de 4~11%. As tolerâncias dimensionais, segundo o fabricante, atendem a metodologia da norma ABNT NBR 15316-3 (2009) e apresentam valores de ±0,2 mm para a espessura da chapa. A densidade do material real, utilizado para a obtenção das amostras, calculada após a medição da massa em uma balança de precisão com resolução de 0,01 g é de 651,68 kg/m³.

Obtiveram-se 66 amostras com dimensões 100 x 50 x 15 mm a partir da chapa citada através de 68 cortes em uma fresadora CNC Keel modelo KSDX-4000 (Fig. 4.1).



Figura 4.1 – Fresadora CNC Keel modelo KSDX-4000

A fresadora KSDX-4000 apresenta sistema constituído por um motor *spindle* de alta frequência com potência de 4 HP (3 kW) acoplado ao inversor de frequência com regulagem de rotação da marca WEG operando em rotações de 2000 a 18000 rpm. A movimentação da fresa nos eixos X, Y, Z é feita por servomotores Panasonic que apresentam potência de 750 W cada. A transmissão do movimento é feita por guias lineares e cremalheiras helicoidais. A máquina possui precisão de repetitividade e posicionamento de 0,10 mm e 0,01 mm, respectivamente.

Como se requer minimizar os efeitos da vibração no processo, para a fixação da chapa na mesa da fresadora foram utilizados 124 parafusos 4 x 30 mm autotravantes com cabeças flangeadas. A furação foi feita pela própria fresadora CNC de modo a garantir um bom posicionamento. A broca utilizada foi de aço rápido Irwin com 4 mm de diâmetro. Os cortes foram feitos de forma que a fresa avance de fora para dentro da chapa. Isto se deve à necessidade de garantir a não influência do “mergulho” da ferramenta sobre a peça. A Figura 4.2 ilustra os cortes realizados na chapa, juntamente com todos os furos de fixação.



Figura 4.2 – Cortes e furações da chapa de MDF

Cada amostra enumerada (Fig. 4.2) possui faces laterais fresadas tangencialmente por corte concordante ou discordante com parâmetros de entrada característicos, sendo que os cortes das amostras de 1 a 33 possuem parâmetros únicos e as de 34 a 66 são réplicas para que se obtenha uma confiança nos dados que serão obtidos posteriormente.

Nas operações de corte foram utilizadas quatro fresas cilíndricas helicoidais com arestas longas inteiriças de metal-duro. As fresas são produzidas pela empresa Wirutex, série 193 HWM, com as especificações mostradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características das fresas utilizadas [Wirutex, 2016]

Características	Fresa X	Fresa Y	Fresa K	Fresa W
Nº arestas de corte (z)	2	2	3	3
Ângulo de hélice (δ) [°]	10	30	10	30
Diâmetro (d) = 8 mm	Comprimento de corte = 22 mm		Comprimento total = 70 mm	

Diferentes combinações de parâmetros de corte foram utilizadas para cada uma das ferramentas a fim de se avaliar o acabamento da amostra para diversas condições.

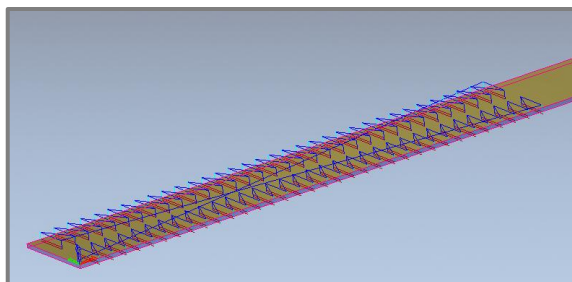
Cada uma das quatro fresas executou oito condições de corte diferentes para usinar a chapa com 15 mm de espessura, sendo que foi avaliada também a direção do corte (concordante ou discordante). A Tabela 4.2 mostra cada uma das oito combinações de parâmetros de entrada.

Tabela 4.2 – Condições de corte utilizadas

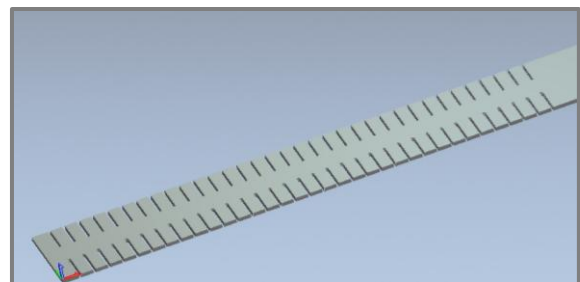
Condição de corte	Velocidade de corte v_c [m/min]	Velocidade de avanço v_f [m/min]	Profundidade de corte axial a_p [mm]	Número de passes NP
1	301,6 (12000 rpm)	2,7	8	2
2			16	1
3		5,4	8	2
4			16	1
5	452,4 (18000 rpm)	2,7	8	2
6			16	1
7		5,4	8	2
8			16	1

OBS. Para compensar eventuais variações da espessura da chapa (15 mm), optou-se por considerar que o maior valor de a_p fosse igual a 16 mm e o menor a sua metade (8 mm).

Os desenhos 2D esquemáticos foram realizados nos softwares AutoCAD 2013 e CorelDRAW X8. Posteriormente foram importados para o software ArtCAM 2011 para a geração de percursos e codificação G para o comando da fresadora CNC. A simulação de todos os percursos é mostrada na Figura 4.3.



(a)



(b)

Figura 4.3 – Simulação do fresamento: (a) percursos; (b) chapa após usinagem

O software Mach3Mill foi utilizado para controlar a fresadora CNC e sua interface é mostrada na Figura 4.4.

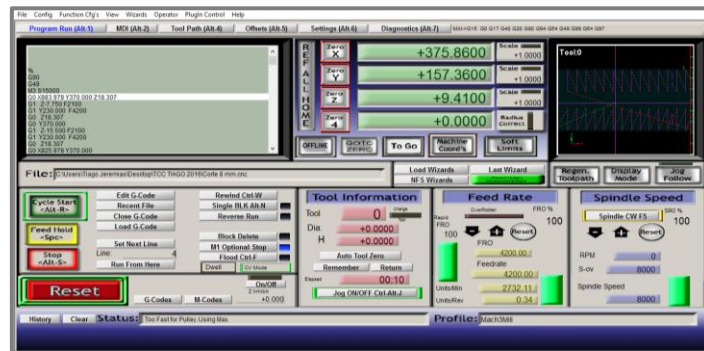


Figura 4.4 – Software de controle da fresadora CNC Mach3Mill

Após o fresamento, a chapa foi esquadrejada para a retirada de todas as amostras. Isto foi feito através de uma seccionadora horizontal Giben modelo Supermatic 78 MOS32 comandada por CLP. A serra utilizada tem espessura de 4 mm e, para uma maior precisão do corte, utilizou-se um riscador disponível na própria máquina. A Figura 4.5 mostra a seccionadora utilizada e o painel de comando CLP.



(a)



(b)

Figura 4.5 – Seccionadora Giben: (a) foto lateral; (b) central de comando CLP

A avaliação do acabamento foi realizada no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS) da UFRGS.

Para a avaliação do acabamento das faces laterais fresadas foi feita a medição das rugosidades média aritmética (R_a) e média parcial (R_z) em todas as amostras e a obtenção dos perfis de rugosidade. Isso é útil para compará-las e definir a melhor relação de parâmetros de corte da usinagem. O equipamento utilizado foi o rugosímetro portátil Mitutoyo modelo SurfTest SJ-201. Ele possui resolução de $0,01 \mu\text{m}$ e opera por contato através de um apalpador (agulha) com ponta de diamante de raio $5 \mu\text{m}$.

Segundo a norma ISO 4288 (1996), os valores recomendados para os comprimentos de amostragem e de medição para valores de R_a acima de $10 \mu\text{m}$ (valores esperados) são $l_e = 8 \text{ mm}$ e $l_m = 40 \text{ mm}$; porém, o rugosímetro SJ-201 permite um comprimento de amostragem de até $l_e = 2,5 \text{ mm}$ (recomendado para $2 \mu\text{m} < R_a < 10 \mu\text{m}$). Deste modo, as medições de rugosidade foram feitas utilizando um *cut-off* de $2,5 \text{ mm}$.

Devido às características do MDF, as rugosidades de cada um dos topos das amostras foram medidas em duas direções. A agulha do rugosímetro, ao fazer a medição, move as fibras da madeira, fazendo com que o valor de rugosidade seja diferente dependendo do sentido da medição. O valor registrado com o apalpador se deslocando no sentido que estão direcionadas as fibras do material é sempre menor que o valor medido no sentido contrário.

Realizou-se as medições das 66 amostras, resultando em 132 topos a serem avaliados nos dois sentidos (264 medições). Nas medições de rugosidade foram desprezadas as regiões da entrada e da saída da fresa na peça. Todos os valores de rugosidade média aritmética (R_a)

e média parcial (R_z) foram dispostos no software MS Excel, relacionando-as com os devidos parâmetros de corte para análise dos resultados. Como as amostras de 34 a 66 são réplicas das amostras de 1 a 33, foram feitas as médias dos valores de rugosidades para as duas amostras com os mesmos parâmetros de entrada. Com isso, obteve-se valores médios para as rugosidades R_a e R_z para cada um dos 64 tipos de parâmetros de corte, sendo 32 deles com direções de corte concordante e os outros 32 com direção de corte discordante.

A partir dos dados armazenados no MS Excel foi possível transferi-los para o software Minitab[®]17 para avaliar os efeitos e as variações que cada um dos parâmetros causam, isoladamente e combinados, nas rugosidades dos topos das amostras.

O acabamento das bordas de todas as amostras onde o revestimento melamínico se encontra foi analisado através de uma lupa. Aquelas bordas que apresentaram defeitos no acabamento considerados graves (que afetam procedimentos futuros e montagem), tais defeitos foram avaliados através da captura de imagens em um microscópio digital Dino-Lite Pro modelo AM-413ZT com resolução de 1024 x 728 pixels e ampliação de 50x. Posteriormente, estas imagens foram usadas para quantificar a área de arrancamento da melamina em cada uma das condições de corte que apresentaram defeitos. As áreas medidas em cada uma das faces afetadas foram dispostas no MS Excel para a análise e obtenção de gráficos relativos à influência da geometria da ferramenta no acabamento superficial do MDF.

Os topos também foram avaliados no microscópio para comparar o aspecto das fibras de madeira nas melhores e nas piores condições de corte. A influência da profundidade de corte (ou do número de passes) também é analisada através das imagens.

A Figura 4.6 mostra o uso do rugosímetro e do microscópio para a coleta dos dados.

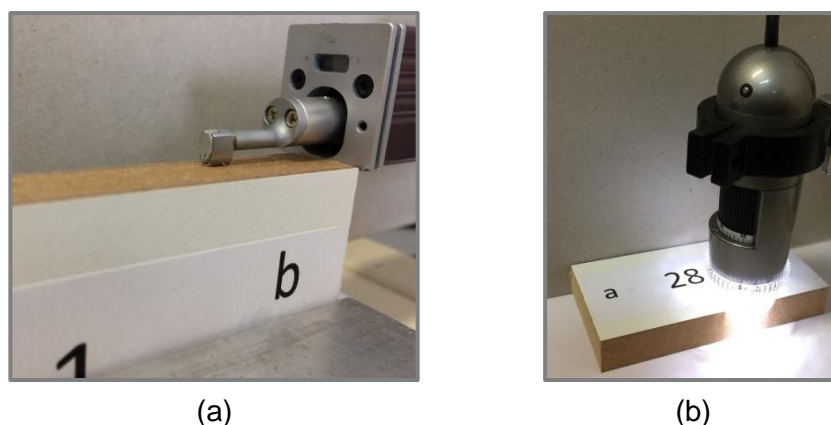


Figura 4.6 – Medições: (a) parâmetros de rugosidade através do SJ-201; (b) defeitos no acabamento das bordas através do microscópio AM-413ZT.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são apresentados e discutidos com base nas rugosidades média aritmética (R_a) e parcial (R_z), e na forma qualitativa através das imagens obtidas no microscópio.

5.1 Rugosidades das Superfícies Fresadas

Primeiramente se fará uma análise do comportamento isolado de cada um dos parâmetros de corte com relação à rugosidade. Após, será discutido o comportamento da rugosidade com alterações simultâneas de dois ou mais parâmetros.

5.1.1 Comportamento da rugosidade com a variação dos parâmetros de corte

As Figuras 5.1 e 5.2 mostram o comportamento de cada um dos parâmetros avaliados com relação às rugosidades média aritmética (R_a) e média parcial (R_z) através da análise dos efeitos principais via Minitab[®]17. A alteração de cada um dos seis parâmetros avaliados

modificou de uma forma diferente a rugosidade, sendo que os pontos mostrados na figura são valores médios para a rugosidade em todas as amostras com tal parâmetro coincidente. A linha pontilhada no gráfico representa a média de todos os valores de rugosidade R_a . Em todos os casos, quanto maiores forem a inclinação (em relação à linha pontilhada) e a distância entre pontos, maior é a influência do parâmetro sobre a rugosidade.

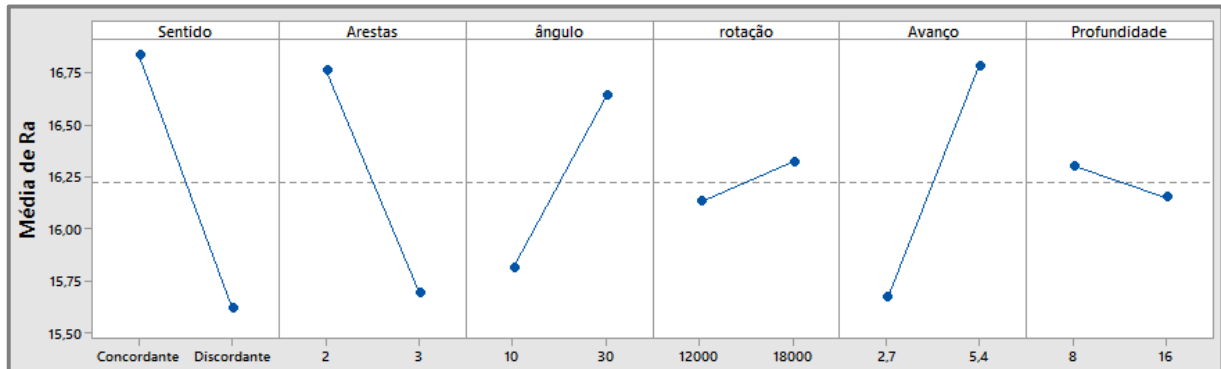


Figura 5.1 – Gráfico de efeitos principais para rugosidade R_a (médias ajustadas).

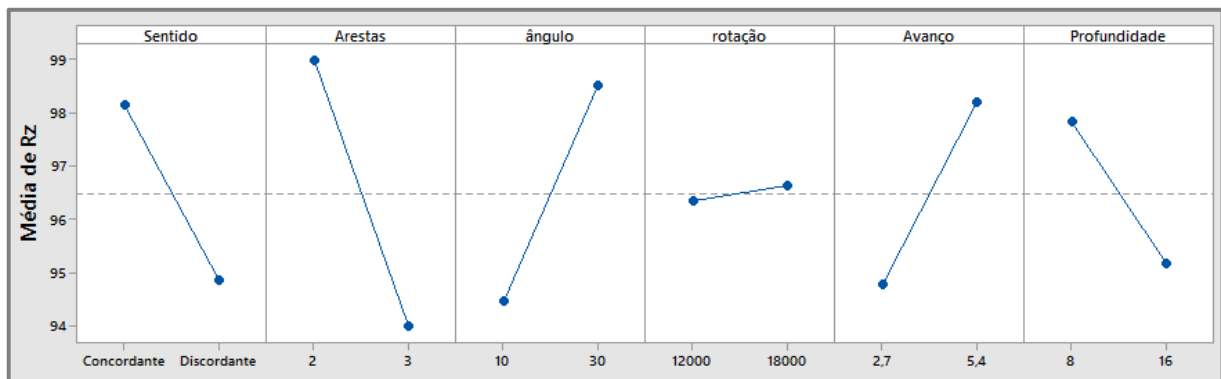


Figura 5.2 – Gráfico de efeitos principais para rugosidade R_z (médias ajustadas).

Sentido de Corte. Pode-se perceber a forte atuação do sentido de corte nos valores de R_a e R_z . O corte discordante diminuiu de forma acentuada a rugosidade em relação ao corte concordante e foi o parâmetro mais influente na avaliação da rugosidade R_a . A hipótese para isso está na formação do cavaco, a qual requer um estudo mais aprofundado.

Número de Arestas. Outro fator que influenciou de forma significativa os valores de R_a e R_z foi o número de arestas de corte. Observou-se uma diminuição na rugosidade ao aumentar o número de arestas de $z = 2$ para $z = 3$. O maior número de arestas faz com que a remoção de material por dente seja menor, diminuindo a rugosidade. No caso, este foi o fator mais influente na avaliação da rugosidade R_z . Machado et al. (2011) explica que o parâmetro R_z é diretamente afetado por qualquer defeito ou irregularidade na superfície, diferente de R_a , que é um parâmetro estável, que não recebe influência de efeitos ocasionais.

Ângulo de Hélice. O aumento do ângulo de hélice da fresa de $\delta = 10^\circ$ para $\delta = 30^\circ$ gerou valores de R_a e R_z maiores, prejudicando o acabamento dos topos das amostras. Provavelmente hélices mais fechadas (ângulos menores) favorecem a quebra dos picos de rugosidade gerando uma rugosidade mais uniforme e com valores menores.

Rotação. A rotação não alterou de forma significativa o acabamento. Houve um pequeno aumento nos valores de R_a e R_z com o aumento da rotação de $n = 12000$ rpm para $n = 18000$ rpm. Isto não significa que a rugosidade não é alterada com a variação da rotação, mas que para as condições de corte avaliadas, a velocidade de corte não chegou a valores críticos ao ponto de influenciar na rugosidade. Seria interessante analisar posteriormente com valores mais baixos e mais altos para analisar corretamente seus efeitos.

Velocidade de Avanço. O aumento da velocidade de avanço de $v_f = 2,7$ m/min para $v_f = 5,4$ m/min fez com que a rugosidade aumentasse (como era de se esperar).

Profundidade de Corte. A profundidade de corte axial não alterou muito a rugosidade média (R_a); porém, houve uma pequena redução de R_a com o aumento de $a_p = 8$ mm para $a_p = 16$ mm. Já o aumento da profundidade de corte fez com que os valores de rugosidade R_z caíssem de forma acentuada. O uso de apenas um passe para o corte melhorou o acabamento, pois ao efetuar dois passes, a ferramenta deixa uma marca saliente na peça. A explicação para isto está no fato de R_z ser mais sensível às alterações da superfície que R_a (como supracitado).

5.1.2 Comportamento da rugosidade variando dois ou mais parâmetros de corte

A Figura 5.3 mostra os gráficos de Pareto dos efeitos obtidos através do Minitab® 17 com uma confiança de 95%. Estes gráficos mostram como as combinações dos parâmetros de corte influenciaram nos valores registrados de rugosidade R_a e R_z dos topos das amostras. No caso, o gráfico mostra o valor absoluto dos efeitos e desenha uma linha de referência no gráfico. Qualquer efeito que se estende para além desta linha de referência é potencialmente importante.

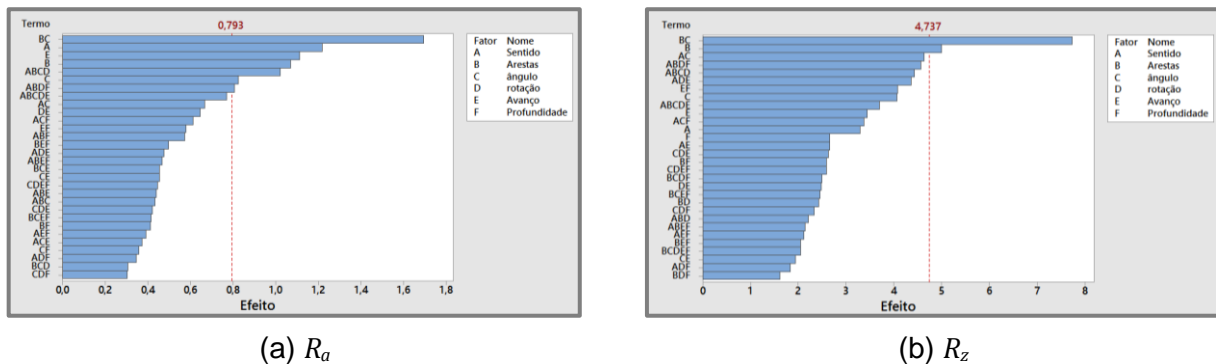


Figura 5.3 – Gráfico de Pareto dos Efeitos sobre a rugosidade: (a) R_a ; (b) R_z .

Tanto para os valores de R_a como para os de R_z , a combinação de parâmetros que mais afetou a rugosidade foi o termo BC, ou seja, o número de arestas de corte (z) com o ângulo de hélice da ferramenta (δ). A influência dos efeitos principais isoladamente já foram apresentados anteriormente. Destaque para o número de arestas de corte (z), que afeta de maneira efetiva R_a e R_z .

Intuitivamente, a melhor condição é obtida quando se usa uma fresa com $z = 3$ arestas e ângulo de hélice $\delta = 10^\circ$. Para comprovar, a Figura 5.4 apresenta os gráficos dos resultados das rugosidades R_a e R_z modificando z e δ .

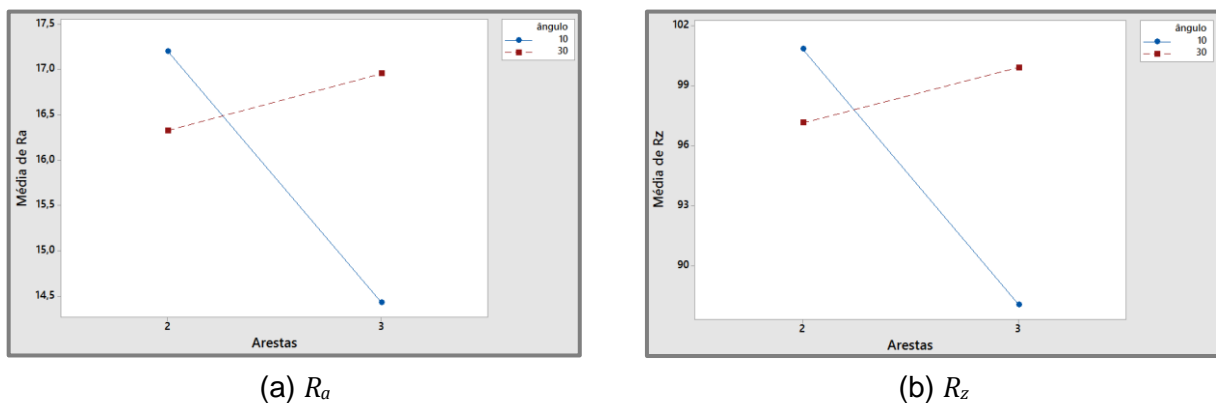


Figura 5.4 – Interação do número de arestas de corte com o ângulo de hélice: (a) R_a ; (b) R_z .

5.2 Análise Qualitativa das Superfícies Fresadas

5.2.1 Análise das bordas quanto ao lascamento da lâmina de revestimento

Todas as bordas fresadas das amostras foram submetidas à análise com microscópio para determinar os parâmetros de corte críticos e as falhas graves de acabamento.

O lascamento da lâmina de revestimento do MDF é considerado grave quando visível à olho nu e prejudica visualmente o produto final na indústria moveleira.

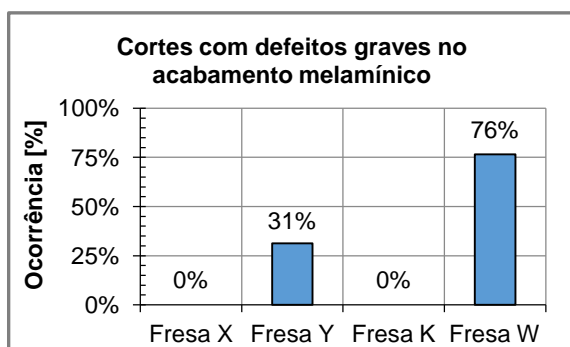
A Tabela 5.1 mostra a presença de lascamento nas bordas das amostras para cada uma das quatro ferramentas utilizadas e para as oito condições de corte diferentes. Os quadros sinalizados com \checkmark indicam a ausência de imperfeições graves naquelas condições e os quadros com \times alertam para a existência de problemas nas amostras com tais condições de corte. A avaliação levou em consideração falhas no acabamento, tanto em cortes com sentido concordante como discordante, e em bordas tanto superiores como inferiores.

Tabela 5.1 – Presença de lascamento nas bordas para as diferentes condições de corte.

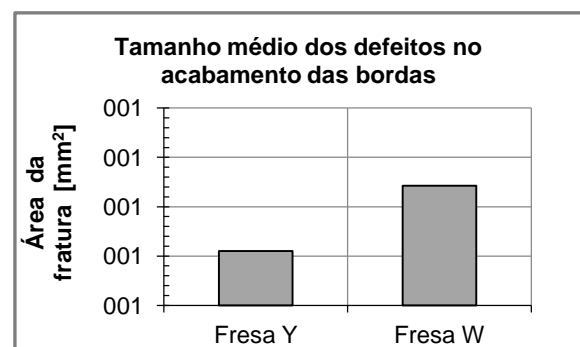
Parâmetros		Fresa X $z = 2$ $\delta = 10^\circ$	Fresa Y $z = 2$ $\delta = 30^\circ$	Fresa K $z = 3$ $\delta = 10^\circ$	Fresa W $z = 3$ $\delta = 30^\circ$	Parâmetros		Fresa X $z = 2$ $\delta = 10^\circ$	Fresa Y $z = 2$ $\delta = 30^\circ$	Fresa K $z = 3$ $\delta = 10^\circ$	Fresa W $z = 3$ $\delta = 30^\circ$
Condição 1	$n = 12000$ rpm $v_f = 2,7$ m/min $a_p = 8$ mm $NP = 2$	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\times	Condição 5	$n = 18000$ rpm $v_f = 2,7$ m/min $a_p = 8$ mm $NP = 2$	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark
Condição 2	$n = 12000$ rpm $v_f = 2,7$ m/min $a_p = 16$ mm $NP = 1$	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\times	Condição 6	$n = 18000$ rpm $v_f = 2,7$ m/min $a_p = 16$ mm $NP = 1$	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\times
Condição 3	$n = 12000$ rpm $v_f = 5,4$ m/min $a_p = 8$ mm $NP = 2$	\checkmark	\times	\checkmark	\times	Condição 7	$n = 18000$ rpm $v_f = 5,4$ m/min $a_p = 8$ mm $NP = 2$	\checkmark	\times	\checkmark	\times
Condição 4	$n = 12000$ rpm $v_f = 5,4$ m/min $a_p = 16$ mm $NP = 1$	\checkmark	\times	\checkmark	\times	Condição 8	$n = 18000$ rpm $v_f = 5,4$ m/min $a_p = 16$ mm $NP = 1$	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\times

É possível verificar que as fresas X ($z = 2$, $\delta = 10^\circ$) e K ($z = 3$, $\delta = 10^\circ$) não apresentaram problemas nas bordas (lascamento da lâmina de revestimento melamínico branco do MDF) em nenhuma das condições de corte. Constata-se que o ângulo de hélice é o parâmetro mais influente no acabamento das bordas das peças.

A Figura 5.5 apresenta os gráficos do percentual de amostras com defeitos para cada fresa e o tamanho médio dos lascamentos nas bordas das peças.



(a)



(b)

Figura 5.5 – Defeitos no acabamento do revestimento melamínico: (a) percentual das amostras com falhas; (b) tamanho médio dos lascamentos.

Pode-se perceber a grande incidência de defeitos graves nas fresas Y ($z = 2$, $\delta = 30^\circ$) e W ($z = 3$, $\delta = 30^\circ$), sendo que a segunda apresentou ainda mais problemas. No caso, 76% das amostras cortadas com a fresa W tiveram problemas graves no acabamento. Os defeitos nas amostras cortadas com esta ferramenta também apresentaram um valor médio maior ($A = 0,62 \text{ mm}^2$). Uma hipótese para este fato é que quanto maior o ângulo de hélice, maior a força axial gerada. Como a rigidez da ferramenta é muito superior a do MDF, o material na borda do corte (revestimento melamínico) é arrancado por ação desta força.

A Figura 5.6 mostra imagens obtidas através do microscópio com ampliação de 50x das bordas das amostras 12b e 52b. É possível observar a diferença no acabamento superficial entre as amostras. As duas foram cortadas com $n = 12000 \text{ rpm}$, $v_f = 5,4 \text{ m/min}$ e $a_p = 16 \text{ mm}$ e ferramentas com número de arestas e ângulo de hélice diferentes (fresas Y e K).

As falhas presentes nas amostras cortadas com fresas com $\delta = 30^\circ$ impossibilitam seu uso na indústria moveleira.

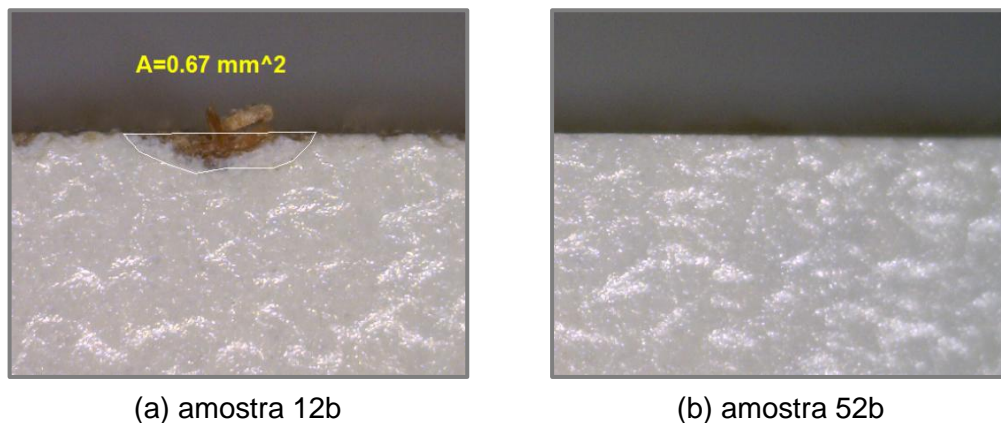


Figura 5.6 – Imagens do revestimento melamínico próximo às bordas com ampliação de 50x obtidas no corte discordante com $n = 12000 \text{ rpm}$, $v_f = 5,4 \text{ m/min}$ e $a_p = 16 \text{ mm}$ usando: (a) Fresa Y; (b) Fresa K.

5.2.2 Análise das superfícies usinadas quanto ao acabamento gerado

Através da análise da rugosidade nas superfícies das amostras (seção 5.1) foi possível determinar os parâmetros de corte e a fresa que obtiveram o melhor resultado no experimento executado, assim como os que causaram maiores valores de rugosidade.

A Figura 5.7 exhibe imagens obtidas através do microscópio com ampliação de 50x das superfícies usinadas das amostras 10a e 18b.

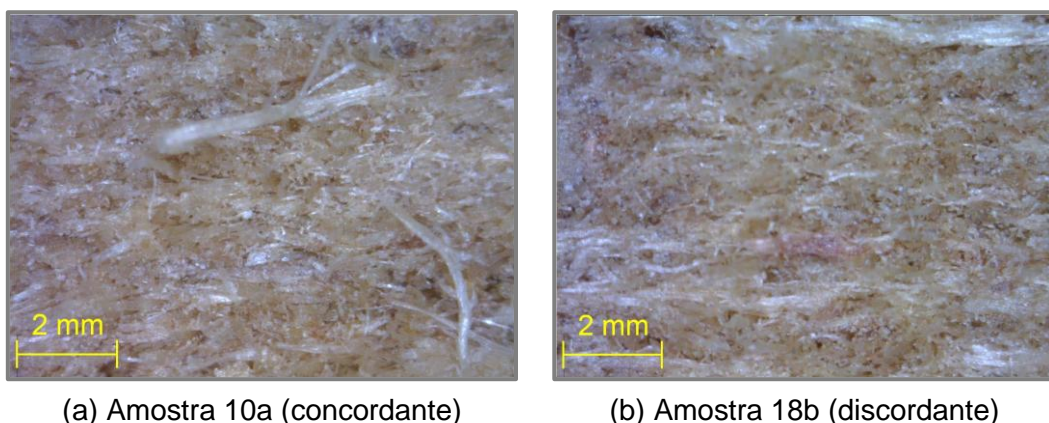


Figura 5.7 – Superfícies das amostras com ampliação de 50x obtidas com $n = 12000 \text{ rpm}$, $v_f = 2,7 \text{ m/min}$ e $a_p = 16 \text{ mm}$ usando: (a) Fresa Y, (b) Fresa K.

A amostra 18b foi cortada utilizando os melhores parâmetros ($n = 12000$ rpm, $v_f = 2,7$ m/min e $a_p = 16$ mm no corte discordante com a fresa K), gerando uma rugosidade baixa. Percebe-se uma diferença em relação a disposição das fibras, sendo que a amostra 10a (mesmas condições de corte no sentido concordante com a fresa Y) apresenta as fibras da madeira de forma mais desorganizadas e com rebarbas aparentes. As rugosidades médias parciais (R_z) medidas para as amostras 18b e 10a foram, respectivamente, $R_z = 79$ μm e $R_z = 111$ μm .

As amostras que foram cortadas com dois passes, tendo sua altura de corte $a_p = 8$ mm apresentaram um defeito perceptível a olho nu e que acarretaria em problemas nos processos posteriores da indústria moveleira (interfere na aplicação da cola fazendo com que a fita de borda não adira adequadamente nos topos do MDF). As amostras com este tipo de parâmetro tiveram a região central marcada por uma saliência com levantamento de material e grande índice de rebarbas, como mostra a Figura 5.8. As linhas em amarelo paralelas à face mostram as fibras do MDF desordenadas e apontadas perpendicularmente aos topos.

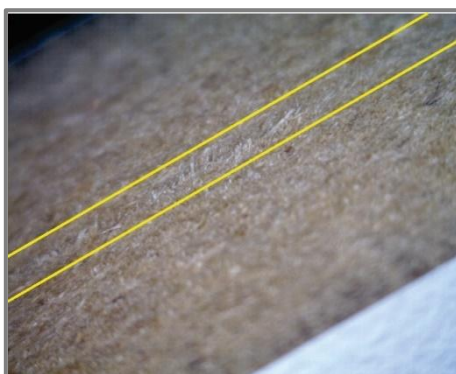


Figura 5.8 – Imagem da superfície de uma amostra usinada com dois passes (ampliação 50x).

Isto pode ser explicado pelo fato de que, quando a fresa realiza o primeiro passe, o topo dela remove o material de forma desordenada. Ao realizar o segundo passe, apesar de a ferramenta passar novamente no mesmo lugar, ela não remove as imperfeições maiores que foram geradas no passe anterior.

6 CONCLUSÕES

O trabalho apresentou a influência dos parâmetros de corte (sentido de corte, rotação, velocidade de avanço e profundidade de corte) no fresamento tangencial do MDF com quatro fresas cilíndricas helicoidais inteiriças de metal-duro diferentes. Através da busca pelo melhor acabamento na superfície usinada e o menor índice de defeitos nas bordas com revestimento melamínico, foi possível determinar as condições ótimas do processo.

O número de arestas de corte da fresa influenciou de forma significativa a rugosidade da superfície usinada, sendo que houve uma melhora do acabamento utilizando fresas com três arestas de corte ao invés de duas.

O ângulo de hélice da ferramenta de corte teve importância tanto na rugosidade como no acabamento das bordas das amostras. Elevando-se o ângulo de hélice de 10° para 30° ocorreu um aumento na rugosidade e o aparecimento constante de defeitos (lascamento) no revestimento melamínico do MDF junto às bordas.

As duas rotações analisadas (12000 e 18000 rpm) não apresentaram grande influência sobre o acabamento das amostras. Não foi atingido nenhum valor crítico e o aumento elevou pouco a rugosidade das amostras.

Como esperado, o aumento da velocidade de avanço de 2,7 para 5,4 m/min fez com que a rugosidade aumentasse. Por ser um dos parâmetros mais influentes no tempo de usinagem, deve-se determinar o maior valor a ser usado para que a rugosidade não ultrapasse valores estabelecidos e, ao mesmo tempo, mantenha alta produtividade na indústria.

A profundidade de corte axial e, conseqüentemente, o número de passes realizados, mostrou-se influente, tanto para a rugosidade da superfície fresada como para a existência de defeitos e rebarbas. Usar apenas um passe com profundidade elevada (16 mm) fez com que a rugosidade diminuísse e a saliência formada na aplicação de dois passes fosse evitada.

Por fim, os parâmetros que resultaram em um melhor acabamento, resultando em baixos valores de rugosidade e a inexistência de defeitos graves (lascamento) no revestimento melamínico do MDF foram: aplicação da fresa K ($z = 3$; $\delta = 10^\circ$) com sentido de corte discordante utilizando rotação de 12000 rpm e velocidade de avanço de 2,7 m/min em apenas um passe com profundidade de corte axial igual à espessura da chapa (16 mm).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIMÓVEL, “**Demanda do Setor Moveleiro Nacional**”, <http://www.brazilianfurniture.org.br/sobresetor>. Acessado em: 21/09/2016.

Albert, A. “**Understanding CNC Routers**”. FPInnovations, Forintek Division Press. Vancouver, Canada, 102 pp, 2009.

ASTM D1666, “**Standard Test Methods for Conducting Machining Tests of Wood and Wood-base Materials**”. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 17p, 2011.

Basso, M. V., “**Estudo da Influência da Geometria de Corte no Fresamento de MDF com Ferramentas Diamantadas**”, UCS, Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Mecânica, Caxias do Sul, RS, 71 p, 2011.

Bom, R. P. “**Processo Produtivo de Painéis MDF**”, Centro Universitário União da Vitória, Apostila, Engenharia Industrial da Madeira, União da Vitória, PR, 47p, 2008

Castro, E. M.; Gonçalves, M. T. T. “**Estudo do Acabamento Superficial em Chapas MDF Usinadas em Processo de Fresamento**”, Madeira: Arquitetura e Engenharia, Ano 3, Nº 8, 11p, 2002.

Davim, J. P. Clemente, V.C. Silva, S. “**Surface Roughness Aspects in Milling MDF (medium density fibreboard)**”. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.40, p.49-55, 2009.

Deus, P.R. “**Análise do Processo de Fresamento de MDF em Centro de Usinagem CNC**”, UNESP, Tese, Faculdade de Engenharia, Guaratinguetá, SP, 133 f., 2014.

Deus, P.R., Alves, M. C. S., Bilesky, L. R. “**The Influence of Cutting Speed on Concordant and Discordant Tangential Milling of MDF**”, Mechanics, Materials, Science & Engeneering, 2016.

Deus, P.R., Alves, M. C. S., Vieira, F. H. A., “**The Quality of MDF Workpieces Machined in CNC Milling Machine in Cutting Speeds, Federate, and Depth of Cut**”, Meccanica, Vol. 50, p.2899-2906, 2015.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L., “**Tecnologia da Usinagem dos Materiais**”, Artliber, 8 ed., São Paulo, 270p, 2013.

Duratex, “**Catálogo Técnico: Painéis de Madeira**”, <http://www.durafloor.com.br/Upload/ImgConteudos/2459.pdf>. Acessado em: 21/09/2016.

Eucatex, “**Catálogo Painéis MDF**”, <http://www.eucatex.com.br/pt/paineis/mdf/>. Acessado em: 21/09/2016.

Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Silva, M. B, “**Teoria da Usinagem dos Materiais**”, Blucher, 1.ed., São Paulo, 371p, 2009.

Pinheiro, C., 2014, “**Efeitos do Teor de Umidade da Madeira no Fresamento de Pinus Elliottii**”. UNESP, Dissertação, Faculdade de Engenharia, Guaratinguetá, SP, 122f., 2014.

Pinkowski, G. Szymanski, W. Gilewicz, A. Warcholinski, B. “**Surface Roughness Aspects in Machine Cutting of Medium Density Fiberboards (MDF) with Modified Cutters on a CNC Woodworking Machine**”. Annals of Warsaw University of Life Sciences, Forestry and Wood Technology, № 75, p.202-209, 2011.

Piratelli Filho, A., 2011, “**Rugosidade Superficial**”, UNB, Faculdade de Tecnologia. www.posgrad.mecanica.ufu.br/metrologia/arquivos/palestra_uflu_17_05_2011.pdf. Acessado em 08/11/16.

Rossi, G., Kanenobu A. A., Batalha, G. F., “**Relação entre Parâmetros de Corte e Rugosidade da Superfície Usinada**”. Máquinas e Metais, p. 156-163, 2005.

Santos, J. A. G., “**Estudo e Modelação do Processo de Fabricação de Placas de Madeira Revestidas com Folha de Madeira Natural**”, FEUP, Dissertação, Faculdade de Economia, Porto, Portugal, 43 f., 2010.

Savas V., Ozay C., “**Analysis of the Surface Roughness of Tangential Turn-milling for Machining with End Milling Cutter**”. J Mater Process Technol, p.279-283, 2007.

Sutcu, A., Karagoz, U; “**Effect of Machining Parameters on Surface Quality After Face Milling of MDF**”. Wood Research, Vol.57, p.231-244, 2012.

Tavares, J. M. R. S., “**Indicação dos Estados de Superfície**”, FEUP, Faculdade de Engenharia, Porto, Portugal, 83 f., 2012.

Valarmathi, T. N., Palanikumar, K., Latha, B. “**Measurement and Analysis of Thrust Force in Drilling of Particle Board (PB) Composite Panels**”. Measurement, p.1220-1230, 2013.

Wilkowski, J., Rousek, M., Svoboda, E., Kopecky, Z., Czarniak, P., “**Analysis of the Influence of Cutting Parameters on Surface Roughness of Milled Wood Based on Taguchi Techniques**”. Annals of Warsaw University of Life Sciences, Forestry and Wood Technology, № 84, p.321-325, 2013.

Wirutex, “**Linha Metal Duro: Fresas em Metal Duro**”, Catálogo, p.17-23. Disponível em: <http://portal.valorizza.com.br/arquivos/53/IGB/48991.pdf>. Acessado em: 21/09/2016.

APÊNDICES

I – Interação dos parâmetros de corte para as rugosidades R_a e R_z das amostras

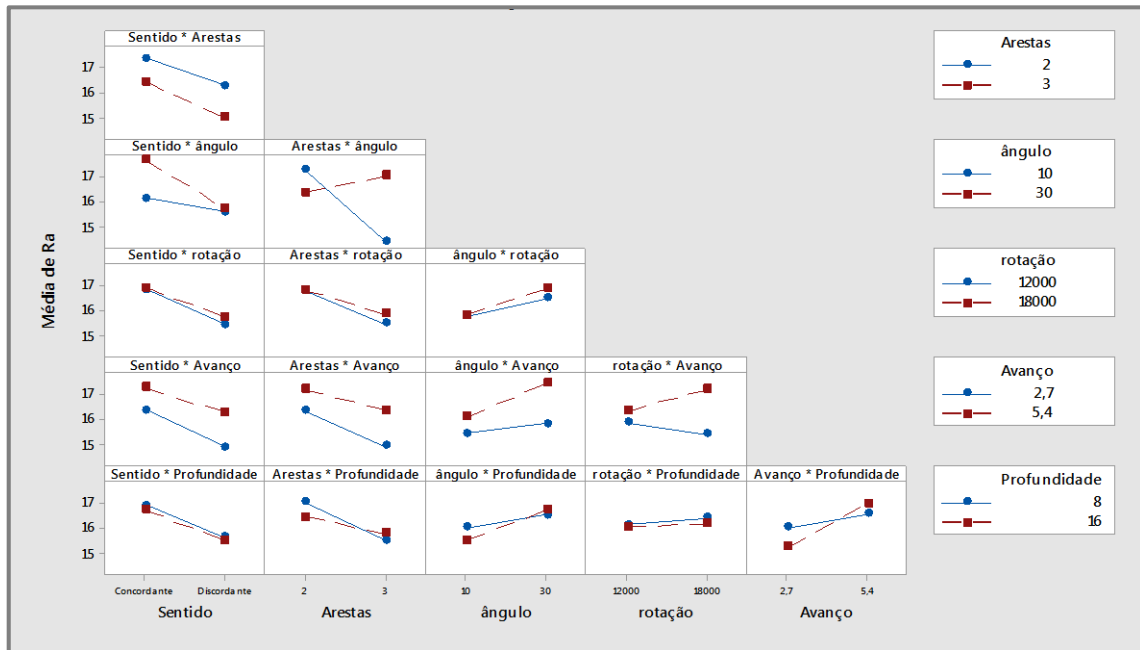


Figura A1 – Interação dos parâmetros de corte para R_a (médias ajustadas) via Minitab® 17.

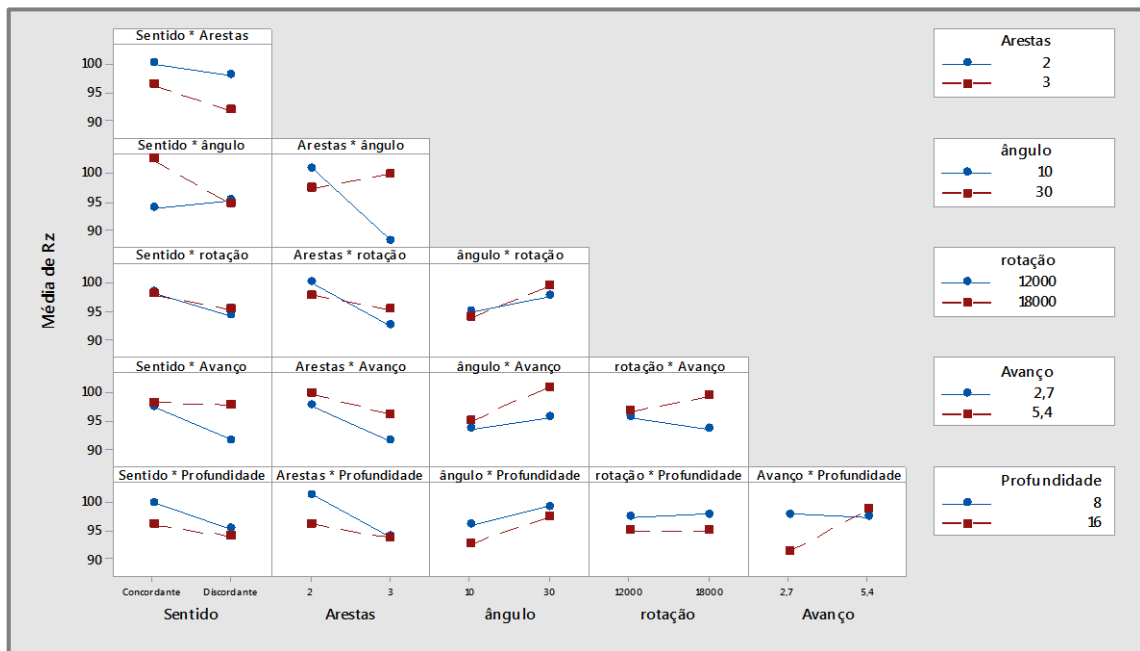
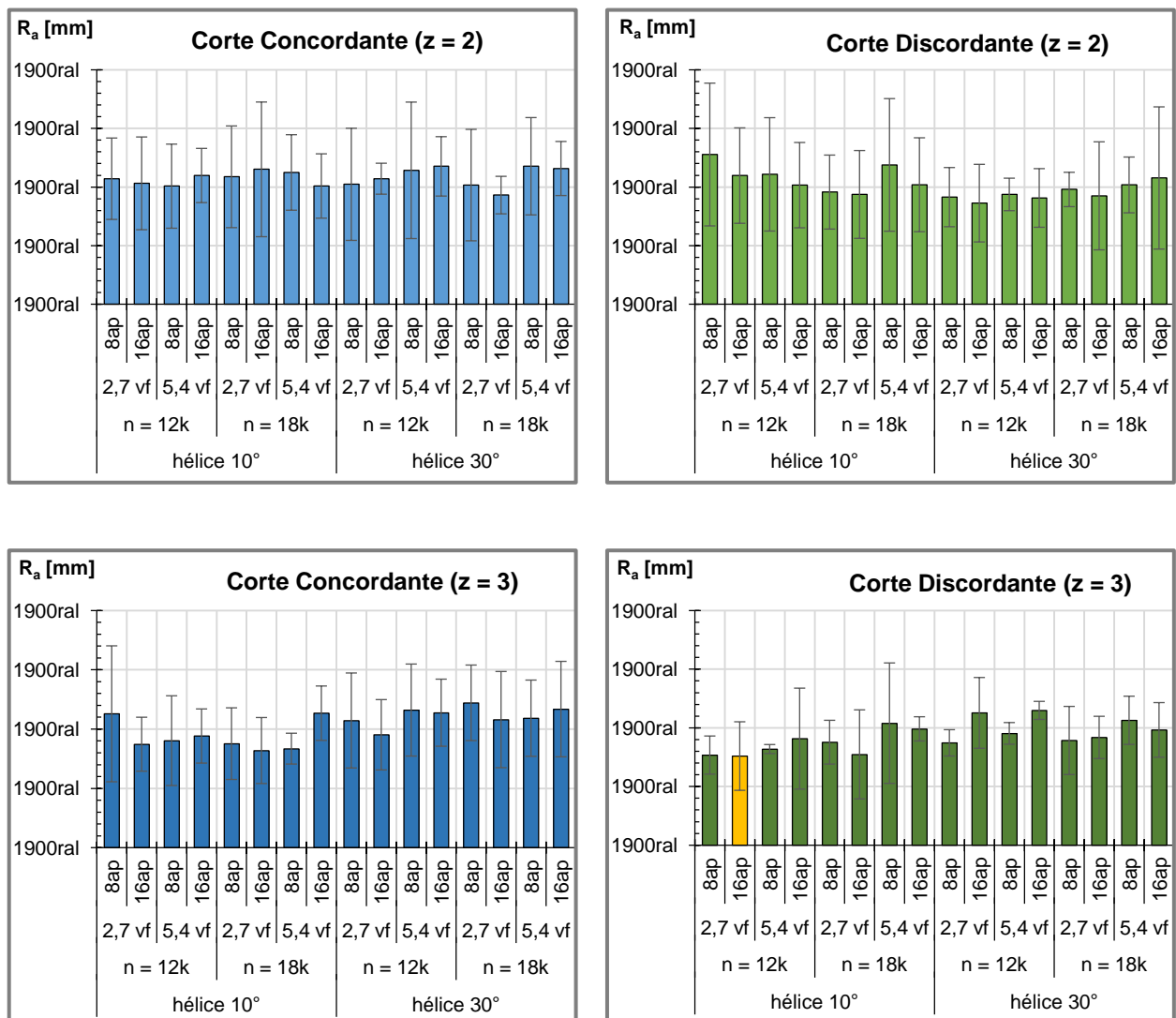


Figura A2 – Interação dos parâmetros de corte para R_z (médias ajustadas) via Minitab® 17.

II – Gráficos dos resultados das medições das rugosidades R_a e R_z das amostras.Figura A3 – Resultados das medições de rugosidades R_a das amostras.

OBS. A condição considerada ótima está destacada em laranja.

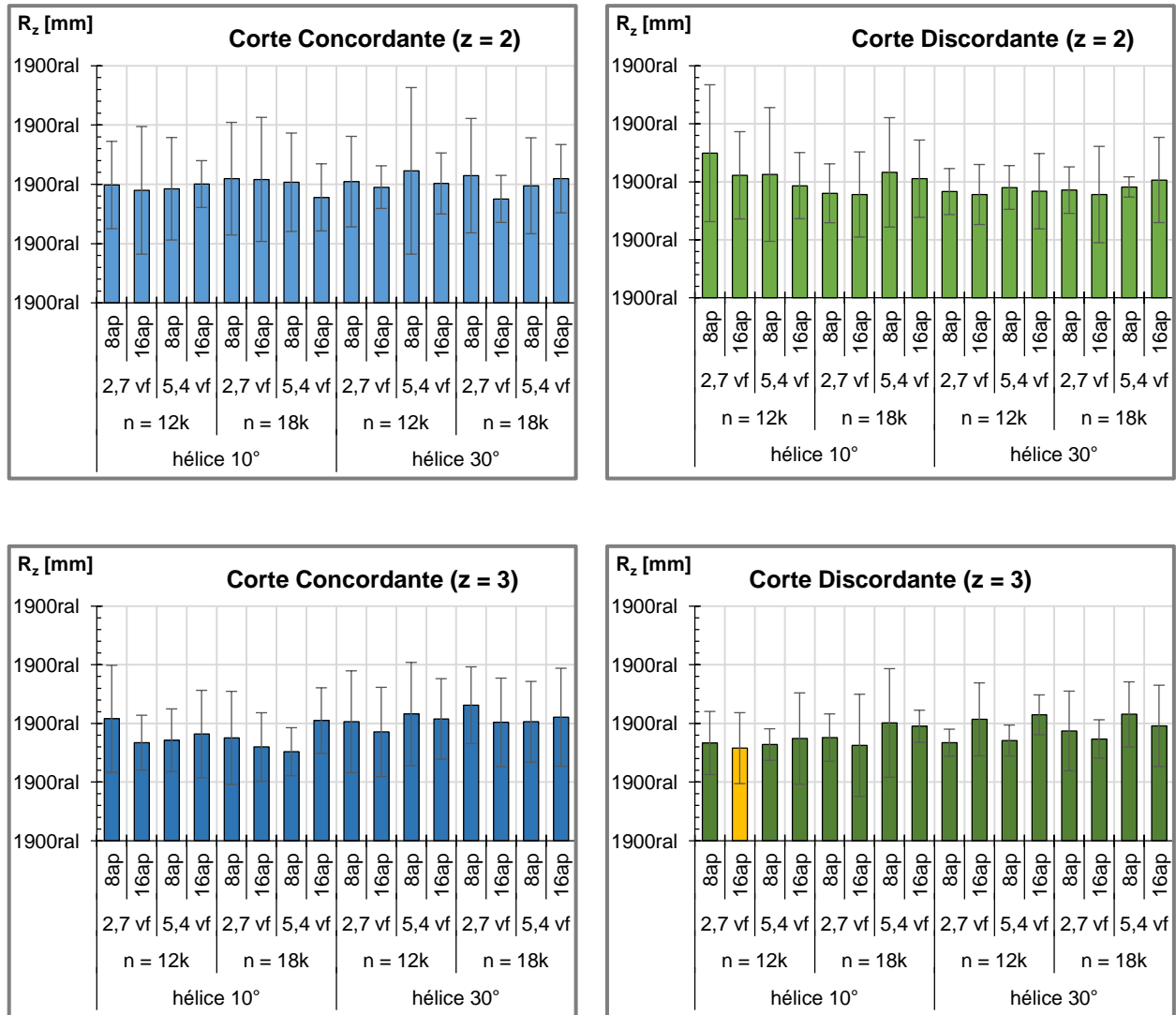


Figura A4 – Médias das medições de rugosidades R_z das amostras.

OBS. A condição considerada ótima está destacada em laranja.