

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Otimização da operação de corte de Aglomerados de Partículas fabricados com um elevado teor de madeira reciclada

Nuno Manuel Batista Garrido

Tese apresentada para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia do Ambiente

Orientadores:

Prof. Carlos Albino Veiga da Costa

Prof. Luísa Maria Hora de Carvalho

Prof. Joaquim Gabriel Magalhães Mendes

LEPABE - Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia
Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto



Universidade do Porto
FEUP Faculdade de
Engenharia



ALiCE ASSOCIATE
LABORATORY
IN CHEMICAL
ENGINEERING



lepabe

Laboratory for Process Engineering,
Environment, Biotechnology and Energy

FCT

Fundação para a Ciência e a Tecnologia
UNIVERSIDADE DE LISBOA, UNIVERSIDADE DE COVILHÃ, UNIVERSIDADE DE BRAGA, UNIVERSIDADE DE AVEIRO, UNIVERSIDADE DE VISEU, UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO ALGARVE, UNIVERSIDADE DE BEJA, UNIVERSIDADE DE BIALA, UNIVERSIDADE DE BIELLA, UNIVERSIDADE DE BIELLA, UNIVERSIDADE DE BIELLA



REPÚBLICA
PORTUGUESA

Programa Doutoral em Engenharia do Ambiente
FEUP-2022

Dedico à memória de meu pai.
O exemplo de um ser humano extraordinário!

"O homem nasceu para vencer, para conquistar, para transpor. A inteligência, o saber, a força do bem, jazem no seu íntimo, à espera para serem desencadeados, para elevá-lo acima de todas as dificuldades."

Dr. Joseph Murphy

AGRADECIMENTOS

Os meus agradecimentos vão em primeiro lugar e em especial para a Professora Luísa Carvalho, pela sua incansável dedicação na orientação deste trabalho. A sua superior competência, e a sua particular persistência, foram atributos fundamentais para conseguirmos ultrapassar as diversas e longas etapas desta intensa caminhada do conhecimento. Além disso, agradeço-lhe também pela sua amizade e paciência.

Quero igualmente agradecer aos Professores Carlos Costa e Gabriel Mendes, pela transmissão de conhecimentos, e principalmente pela disponibilidade que manifestaram durante a realização deste doutoramento.

À Fatty, que nunca regateou esforços no apoio e na motivação, incentivando sempre para que não desistisse do terminar desta missão. Quantas vezes por esta razão teve de abdicar das nossas interessantes e descontraídas conversas de fim de dia, que diga-se, sempre saudáveis, e que fizeram muita falta após longas horas de trabalho.

A toda a minha restante família, filhos, netos, irmãos e especialmente à minha estimada mãe, por serem a razão principal da minha inspiração. Para todos eles, os meus sinceros agradecimentos pelo forte apoio, ânimo e motivação que sempre me transmitiram, mesmo estando bem longe no hemisfério oposto.

Um agradecimento especial para o Professor Jorge Martins, pela sua cooperação, incentivo e importantes esclarecimentos técnicos e científicos, que se mostraram muito proveitosos para a finalização deste trabalho.

Quero igualmente expressar o meu agradecimento à FCT pelo apoio concedido durante a realização deste trabalho, nomeadamente no suporte das deslocações aquando da apresentação dos artigos científicos em congressos internacionais.

Por último agradecer à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto pelos meios que me proporcionou para a realização deste Doutoramento, em especial na facilidade de acesso aos laboratórios, equipamentos e materiais, e ao Departamento de Engenharia de Madeiras da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, e à Wideform Pty Ltd - Austrália (Engineering & Design Department), pelas facilidades concedidas.

Agradecimentos Institucionais

Este trabalho foi financiado por LA/P/0045/2020 (ALiCE), UIDB/00511/2020 e UIDP/00511/2020 (LEPABE) - financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).



RESUMO

Neste trabalho foi estudada a otimização da operação de corte de Aglomerados de Partículas contendo um elevado teor de reciclados na sua composição.

De entre todos os derivados de madeira, o Aglomerado de Partículas é aquele que reúne melhores condições para uma utilização eficiente dos recursos florestais. De facto, a sua especial estrutura e composição, para além do seu particular processo de fabrico, possibilitam a incorporação de diferentes matérias-primas de origem florestal, materiais reciclados, subprodutos de outras operações industriais de transformação de madeira e resíduos de madeira pós-consumo. Saliente-se desde já, que devido ao facto de o Aglomerado de Partículas possibilitar a inclusão destes reciclados à base de madeira, contribui fortemente para prolongar o ciclo de vida útil da madeira, e especialmente funciona como armazém de carbono uma vez que atrasa as emissões de CO₂ que podem resultar da queima da madeira antes do seu fim de vida útil. Como principal resultado da utilização dos materiais reciclados como matéria-prima, confirma-se que estes contribuem para um impacto ecológico extremamente favorável, fazendo do Aglomerado de Partículas, e nesta medida, um produto de características excepcionais e ambientalmente compatível.

Contudo, durante a sua aplicação e utilização final, estes são sujeitos a diversas operações de maquinação que podem representar algum risco para o seu prestígio, quando não executadas propriamente, podendo conduzir à diminuição das suas propriedades mecânicas e de qualidade. É por isso fundamental entender em que medida a composição dos Aglomerados de Partículas, com diferentes *mix* de madeiras e reciclados, os parâmetros operatórios do processo de fabrico e as propriedades físico mecânicas, afetam a maquinação e a qualidade do perfil da aresta maquinada. Este último aspeto é considerado um requisito fundamental para a qualidade do produto final, e que pode determinar de forma categórica a viabilização ou inutilização do seu uso.

Neste contexto, e no sentido de dar respostas ao anteriormente exposto, apresentam-se neste trabalho um conjunto de experiências com o objetivo centrado na influência das características peculiares dos Aglomerados de Partículas, na maquinação e na qualidade do perfil maquinado.

O trabalho experimental incidiu inicialmente sobre amostras de aglomerados comerciais, com vista a avaliar preliminarmente a influência de diferentes tipos de aglomerados e das condições de maquinação na qualidade da aresta. Foram executados diversos ensaios variando os fatores: velocidade de avanço (A), frequência (f) e tipo de

Aglomerado de Partículas (*PB*). Os parâmetros de resposta investigados foram o avanço efetivo por dente (*ffz*), a energia específica de corte (*Es*) e a qualidade da aresta, que foi medida através do critério de qualidade *Total waviness* (*Tw*). Para estes ensaios foi instrumentada uma máquina *multifunções* equipada com uma serra de disco, e desenvolvido um inovador sistema de visão artificial para medição do dano na aresta. Este sistema de visão artificial é composto por uma câmara de vídeo (modelo Sony XC-ST30), uma lente de modificação de zoom (VZM300), um micro laser (VLM 10° linha), uma lâmpada electrónica (Philips PL E-T 20W) e uma placa para aquisição de imagens monocromáticas (NI1407). O sistema está ligado a um PC que corre as imagens e efetua o seu tratamento no software IMAQ vision para Labview[®]. O tratamento numérico (seleção da área com relevância) incluindo o cálculo de diversos parâmetros foi realizado recorrendo a um módulo desenvolvido em MatLab[®]. Os resultados experimentais mostram que o sistema de visão artificial é bastante promissor para a análise da aresta, com condições de ser instalado *online*. Em relação à influência das condições de maquinação no desempenho dos parâmetros de resposta, foi efetuada uma análise (ANOVA), que permitiu avaliar o nível de significância dos efeitos dos fatores. Os resultados evidenciaram que todos os fatores são significativos, e que os sensores piezoelétricos instalados na máquina são capazes de detetar o contato entre o dente da serra e o PB.

Após nova verificação da fiabilidade do método de aquisição e análise de imagens, investigou-se o efeito de diferentes *mix* de madeira na composição de diversos PB, na maquinação e na qualidade da aresta. Foram estudados diversos fatores associados ao fabrico dos painéis (*mix* de madeira, resina, condições operatórias do ciclo de prensagem), à maquinação (velocidade de avanço e frequência) e ao sistema de visão artificial (fonte de luz e posicionamento da imagem). Foi igualmente investigado o efeito das propriedades físico-mecânicas dos Aglomerados de Partículas na qualidade da aresta. Conclui-se através de uma análise estatística ANOVA, que para o critério de qualidade *Tw*, o *mix* de madeira e os parâmetros de produção (resina, tempo e temperatura de prensa) são muito significativos. Também para a energia específica de corte (*Es*) o *mix* de madeira é muito significativo, porém, as condições de produção dos aglomerados não se revelaram aqui significativas.

Foi posteriormente realizada uma série de experiências para se analisar o impacto de captadores de formaldeído na maquinação e na qualidade da aresta. Um dos objetivos principais desta parte do trabalho justificou-se na necessidade de usar os captadores de formaldeído por questões ambientais, particularmente por via do seu importante contributo na redução das emissões de formaldeído dos painéis. Para estas experiências foram selecionados

os captadores: ureia sólida com diferentes granulometrias, ureia em solução, metabisulfito de sódio e amido. O efeito destes aditivos foi estudado tendo em conta a influência das condições de maquinação (velocidade de avanço e frequência) nos parâmetros de resposta (energia específica de corte, forças de corte e qualidade da aresta). A qualidade da aresta foi medida através do sistema de visão artificial usado nas experiências anteriores. Os resultados obtidos mostraram que os captadores conduzem a uma diminuição do teor em formaldeído, embora provoquem uma redução nas propriedades físico-mecânicas, especialmente na resistência interna (RI). Por outro lado, a incorporação de captadores tem muito menos influência na energia específica de corte (Es) do que as condições de maquinação, em particular o avanço por dente (fz). Em relação à influência da incorporação de captadores de formaldeído e das propriedades mecânicas (neste caso a resistência interna), na energia específica de corte (Es), verificamos aqui que a incorporação de captadores de formaldeído tem mais influência na energia específica de corte (Es) do que a resistência interna (RI). Os resultados exibiram ainda que a granulometria das partículas de ureia exerce uma forte influência na qualidade da aresta, embora não afete o parâmetro de maquinação Es . Conclui-se que as diferentes estratégias usadas para fazer diminuir o teor de formaldeído tem grande influência não só na energia específica de corte (Es), mas especialmente na qualidade da aresta maquinada.

Foram ainda executadas experiências com incorporação de madeira reciclada de duas espécies alternativas (Eucalipto e Choupo) na composição dos PB, com vista ao estudo da sua influência na maquinação e no perfil da aresta de corte. Os resultados sugerem que estas espécies melhoram a maquinação dos aglomerados, no entanto, reduzem a sua resistência interna (RI).

A otimização dos parâmetros de resposta: qualidade da aresta (Tw), energia específica de corte (Es) e avanço efetivo por dente (ffz), quando influenciadas pelos fatores velocidade de avanço (A) e frequência (f), foi efetuada para a maquinação de aglomerados standard (ST), resistente à humidade (MR) e homogéneo (HG), através da Metodologia de Superfície de Resposta (RSM). Com vista a fazer previsões sobre as respostas para os níveis de cada fator, foram determinadas as equações em termos de fatores reais. Os modelos de previsão mostraram-se bem ajustados aos resultados experimentais, e por conseguinte estes modelos foram capazes de descrever o nível de significância estatística do efeito dos fatores nas variáveis de resposta. Além disso, os valores observados experimentalmente não apresentaram diferença estatisticamente significativa em relação aos valores previstos pelo modelo, dentro de um intervalo de confiança de 95%. Estes resultados validaram a capacidade

preditiva e a adequação da metodologia de superfície de resposta na otimização da operação de maquinação para os parâmetros de resposta aqui investigados.

ABSTRACT

In this work, the optimization of the cutting operation of particleboard containing a high level of recycled wood was investigated.

Among all wood based-panels, Particleboard (PB) is the one that brings together the best conditions for efficient use of forest resources. Its special structure and composition, in addition to its particular manufacturing process, allow the incorporation of different raw materials of forest origin, recycled materials, sub-products from other industrial wood processing operations and post-consumer wood residues. It should be noted from the outset that, since Particleboard allows the inclusion of these wood-based recycled materials, it strongly contributes to prolonging the wood cycle life, and especially works as a carbon store since it delays emissions of CO₂ that can result from burning wood before its end of life. As the main result of the use of recycled materials as raw material, it is confirmed that they contribute to an extremely favorable ecological impact, making PB a product with exceptional characteristics and environmentally compatible.

However, during their application and final use, they are subject to several machining operations that may pose some risk to their prestige, which may lead to a decrease in their mechanical and quality properties when they are not properly executed. It is therefore essential to understand to what extent the composition of Particleboards (with different mix of wood and recycled materials), the operating parameters of the manufacturing process and the physical-mechanical properties, affect the machining and particularly the quality of the edge profile. This last aspect is considered a fundamental requirement for the quality of the final product, and which can categorically determine the feasibility or impossibility of its use.

In this context, and in order to respond to the above, this work presents a set of experiments with the aim of focusing on the influence of the peculiar PB characteristics on machining and edge quality.

To examine the effects of machining conditions on edge quality, preliminary experiments were performed on commercial particleboard samples. A series of tests were conducted varying: feed rate (A), rotation speed (f) and the type of particleboard (PB). The response parameters investigated were the effective feed per tooth (ffz), the specific cutting energy (Es) and the edge quality defined by the criterion *Total waviness* (Tw). The sample cutting process was performed in an instrumented multifunction machine with a circular saw, and a vision system apparatus was developed to measure edge "delamination". This artificial vision system is composed of a video camera (model Sony XC-ST30), a modified video zoom lens (VZM300), a diode micro laser (VLM 10° line), an electronic lamp (Philips PL E-T 20W) and a single channel monochrome image acquisition board (NI1407). The system is connected to a PC running Labview® software

for image capturing and processing. The numerical treatment (selection of the relevant area) along with the calculations of several parameters was performed with an external application developed in MatLab[®]. The experimental results show that the artificial vision system is very promising for edge analysis, with conditions to be installed online. Concerning the effects of machining conditions on edge quality and for the purpose of assessing the level of significance of the effects of the factors in the response parameters, an (ANOVA) analysis was performed. The results showed that all factors are significant and that piezoelectric sensors are capable of detecting contact between a saw tooth and the *PB*.

After new validation of image acquisition and analysis methods, experiments were conducted to determine how different wood mixtures affect machining parameters and edge quality. Several factors associated with *PB* manufacturing (wood mix, resin, operating conditions of the pressing cycle), machining (feed rate, rotation speed), and the vision system (light source and image positioning) were investigated. The impact of the physical-mechanical properties of Particleboard on the edge quality parameter -*Total waviness* - was also examined. By using an ANOVA statistical analysis, the results revealed that the quality criteria *Total waviness* (*Tw*), the wood mix, and the production parameters (resin, press time, and temperature) are extremely significant. For the specific cutting energy (*Es*), the wood mix is highly significant; however, the particleboard production conditions are not significant.

A series of experiments were conducted to assess the effect of formaldehyde scavengers on machining conditions. One of the main objectives of this part of the work focused on the need to use formaldehyde scavengers for environmental reasons, particularly through their important contribution to reducing formaldehyde emissions from panels. For these experiments, the following scavengers were selected: solid urea with different granulometry, urea solution, sodium metabisulphite and a UF pre-condensate with starch. The effect of these additives was studied taking into account the influence of the machining conditions (feed rate, rotation speed) on the response parameters (specific cutting energy, cutting force and edge quality). The edge quality was measured using the artificial vision system used in the prior experiments. It was concluded that all the scavengers tested had led to a reduction in formaldehyde content, but they caused a decrease in physical-mechanical properties, particularly in the internal bond. The results show the incorporation of scavengers has a very small effect on specific cutting energy (*Es*) during cutting operations, compared to machining conditions, especially the feed per tooth (*fz*). Nevertheless, when we analyze the influence of the incorporation of the formaldehyde scavengers on the specific cutting energy (*Es*) correlated with the mechanical properties (particularly the internal bond), we found that formaldehyde scavengers have a greater effect on specific cutting energy (*Es*) than the internal bond (*RI*). Furthermore, the results suggested that urea particle size has a

significant influence on edge quality, although it does not affect the Es energy parameter. In conclusion, we verified that the different strategies used to decrease formaldehyde content have a great influence on specific cutting energy, but especially on the cutting edge quality.

Additionally, experiments were conducted with the inclusion of recycled wood from two alternative species (Eucalyptus and Poplar) in the PB composition. The objective was to determine how it affects the profile of the cutting edge. According to the results, these species improve PB machinability but reduce the internal bond (RI).

Using Response Surface Methodology (RSM), we analyzed the optimization of the response parameters (Tw , Es and ffz) depending on the factors feed rate (A) and frequency (f), for the machining of three types of particleboards: standard (ST), moisture content (MR) and homogenous (HG). To predict the responses to the levels of each factor, equations in terms of actual factors were determined. The prediction models were well fitted to the experimental results and therefore these models were able to reliably describe the significance of the effect of the factors on the response variables. Moreover, the experimentally observed values showed no statistically significant difference from the model-predicted values within a 95% confidence interval. These results validated the predictive ability and suitability of the response surface methodology in optimizing the machining operation for the response parameters investigated here.

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	xi
Índice	xv
Lista de Figuras	xxi
Lista de Tabelas	xxv
Nomenclatura	xxix
Introdução Geral	1

CAPÍTULO I

PROPRIEDADES GERAIS DOS AGLOMERADOS DE PARTÍCULAS	17
<i>Introdução</i>	19
1.1 Definição	19
1.2 Processo de Fabrico	20
1.2.1 Matérias-primas	22
<i>a) Madeira e desperdícios</i>	22
<i>b) Adesivos sintéticos</i>	24
<i>c) Aditivos</i>	25
1.2.2 Preparação da estilha/partículas	26
<i>a) Descasque</i>	26
<i>b) Destroçamento</i>	26
<i>c) Secagem das partículas</i>	27
<i>d) Separação/Refinação</i>	27
1.2.3 Encolagem	27
1.2.4 Formação	28
1.2.5 Pre-prensagem	28
1.2.6 Prensagem	29
1.2.7 Acabamento	29
1.3 Fatores que afetam as propriedades dos Aglomerados de Partículas	30
1.3.1 Dimensão e geometria das partículas	31

1.3.2 Resina	32
1.3.1 Prensagem	32
<i>a) Humidade do colchão</i>	33
<i>b) Velocidade de fecho da prensa</i>	33
<i>c) Tempo do ciclo de prensagem</i>	34
<i>d) Temperatura de prensagem</i>	35
<i>e) Pressão específica</i>	35
<i>f) Razão de compactação</i>	36
1.4 Medição das propriedades dos Aglomerados de Partículas	36
1.4.1 Propriedades físicas	37
1.4.2 Propriedades mecânicas	38
1.4.3 Determinação de formaldeído nos Aglomerados de Partículas	41
1.4.4 Propriedades de durabilidade	42
1.5 Referências bibliográficas	43
CAPÍTULO II	
MAQUINAÇÃO DOS AGLOMERADOS DE PARTÍCULAS	
<i>Revisão da literatura</i>	49
<i>Introdução</i>	51
2.1 Fatores que influenciam a maquinação dos Aglomerados de Partículas	51
2.1.1 Influência dos parâmetros operativos e da ferramenta	51
2.1.2 Influência da estrutura e composição dos aglomerados	57
2.1.3 Desgaste da ferramenta na maquinação dos Aglomerados de Partículas	63
2.2 Monitorização e otimização da operação de corte	67
2.2.1 Utilização de métodos acústicos	68
2.2.2 Sistemas de visão artificial	69
2.3 Referências bibliográficas	72
CAPÍTULO III	
TEORIA DO CORTE	
<i>Madeira maciça e derivados</i>	89
<i>Introdução</i>	91
3.1 Mecânica do corte na madeira maciça	92

3.1.1 Variabilidade da madeira	93
3.1.2 Planos de corte	95
3.2 Geometria de corte nas serras de disco	97
3.2.1 Características dos dentes	98
3.2.2 Determinação da velocidade de corte velocidade de avanço	100
3.2.3 Análise das forças de corte na serra de disco	102
3.2.4 Tensões na serra de disco	105
3.3 Considerações finais	108
3.4 Referências bibliográficas	109

CAPÍTULO IV

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE MAQUINAÇÃO NA QUALIDADE DA ARESTA

<i>Ensaio preliminares</i>	115
<i>Introdução</i>	117
4.1 Seleção do método para iluminação da aresta (P1)	118
4.1.1 Materiais e métodos	119
4.1.2 Apresentação e análise dos resultados	123
4.2 Influência dos parâmetros de maquinação na qualidade da aresta (P2)	125
4.2.1 Materiais e métodos	125
4.2.2 Apresentação e análise dos resultados	129
4.3 Conclusões	132
4.4 Referências bibliográficas	134

CAPÍTULO V

EFEITO DO MIX DE MADEIRA NA MAQUINAÇÃO

<i>Influência na qualidade da aresta de corte</i>	137
<i>Introdução</i>	139
5.1 Materiais e métodos	140
5.1.1 Produção dos Aglomerados de Partículas	142
5.1.2 Condições e níveis de maquinação	146
5.1.3 Caracterização objetiva da aresta de corte	146
5.1.4 Sumário de <i>design</i> das experiências	147
5.2 Resultados e discussão	147

5.3 Conclusões	151
5.4 Referências bibliográficas	153

CAPÍTULO VI

IMPACTO DE CAPTADORES DE FORMALDEÍDO NA MAQUINAÇÃO

<i>Influência na qualidade da aresta de corte</i>	155
<i>Introdução</i>	157
6.1 Produção dos aglomerados	160
6.1.1 Composição do <i>mix</i> de madeiras	160
6.1.2 Adição dos captadores e condições de colagem	160
6.1.3 Condições de prensagem	161
6.1.4 Ensaios físico-mecânicos	162
6.1.5 Níveis de maquinação e caracterização objetiva da qualidade da aresta	162
6.2 Resultados e discussão	163
6.3 Conclusões	168
6.4 Referências bibliográficas	169

CAPÍTULO VII

INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE ESPÉCIES ALTERNATIVAS

<i>Influência na maquinação e qualidade da aresta de corte</i>	173
<i>Introdução</i>	175
7.1 Produção dos Aglomerados de Partículas	176
7.1.1 Composição do <i>mix</i> de madeira	176
7.1.2 Encolagem	176
7.1.3 Processo de prensagem	176
7.1.4 Condições de maquinação e avaliação da qualidade da aresta	178
7.2 Resultados e discussão	178
7.3 Conclusão	181
7.4 Referências bibliográficas	182

CAPÍTULO VIII

Modelos de previsão da qualidade da aresta de corte

<i>Aglomerados de Partículas ST, MR, HG</i>	185
---	-----

<i>Introdução</i>	187
8.1 Procedimento experimental	188
8.1.1 Provetes e níveis de maquinação	188
8.1.2 <i>Design</i> das experiências	188
8.2 Análise estatística ANOVA	191
8.2.1 Comparação da variação no tratamento dos fatores	191
8.2.2 Modelo estatístico	195
8.2.3 Equações finais em termos de fatores reais	196
8.2.3.1 <i>Equações para previsão das respostas no Aglomerado ST</i>	196
8.2.3.2 <i>Equações para previsão das respostas no Aglomerado MR</i>	196
8.2.3.3 <i>Equações para previsão das respostas no Aglomerado HG</i>	197
8.3 Resultados	197
8.3.1 Qualidade de ajuste do modelo	197
8.3.2 Suposição de normalidade e variância constante	197
8.3.3 Metodologia de superfície de resposta	202
8.4 Otimização e confirmação	203
8.4.1 Modelo otimizado e confirmação para os aglomerados ST	203
8.4.2 Modelo otimizado e confirmação para os aglomerados MR	205
8.4.3 Modelo otimizado e confirmação para os aglomerados HG	207
8.5 Conclusões	208
8.6 Referências bibliográficas	210
CONCLUSÕES GERAIS E PERSPETIVAS DE TRABALHO FUTURO	211
ANEXO I	219
ANEXO II	227
ANEXO III	231
ANEXO IV	237

Lista de Figuras

Figura I.1	Ciclo de vida dos produtos de madeira e derivados	4
Figura I.2	Modelo estratégico da economia circular	5
Figura 1.1	Processo de fabrico dos Aglomerados de Partículas	21
Figura 1.2	Tipos de elementos básicos obtidos a partir da madeira	23
Figura 1.3	Representação esquemática do dispositivo para o ensaio de flexão em 3 pontos	39
Figura 1.4	Esquema do dispositivo para determinação da resistência à tração perpendicular	40
Figura 1.5	Ilustração do método do perforador para medição do teor de formaldeído	42
Figura 2.1	Determinação gráfica dos valores característicos $k_{c1.1}$ e $1-m_c$ adaptado de Kienzle	52
Figura 2.2	Modelo geométrico da ferramenta adoptado em Boucher <i>et al.</i> , (2004)	55
Figura 2.3	Relação entre o trabalho específico de corte (J/m^2) e a profundidade de corte (μm) na maquinação de Aglomerados de Partículas sujeitos a diferentes combinações de temperatura e pressão, adaptado de Kowaluk <i>et al.</i> , 2004 e Beer <i>et al.</i> , 2005	61
Figura 3.1	Direções fundamentais na madeira (Garrido, 2004)	94
Figura 3.2	Principais tipos de corte ortogonal (McKenzie, 1960)	96
Figura 3.3	Geometria do processo de corte com serra de disco (adaptado de Mandić <i>et al.</i> , 2015)	97
Figura 3.4	Representação dos ângulos característicos dos dentes (Garrido, 2004)	99
Figura 3.5	Exemplo da posição dos dentes em relação à espessura do material (Garrido, 2004)	100
Figura 3.6	Forças atuantes na serra circular (adaptado Hlásková <i>et al.</i> , 2019)	103
Figura 3.7	Direção e amplitude das tensões radiais e tangenciais no disco (Paiva, 2016)	106
Figura 3.8	Ilustração do sistema de tensionamento (Paiva, 2016)	107
Figura 4.1	Sistema de iluminação e captação da imagem da aresta de corte (Garrido <i>et al.</i> , 2008)	120
Figura 4.2	Aplicação desenvolvida em Labview [®] para aquisição de imagem	121
Figura 4.3	Metodologia do processamento de imagem (luz tipo L1 – laser)	122
Figura 4.4	Metodologia do processamento de imagem (luz tipo L2 – lâmpada vertical)	123
Figura 4.5	Influência dos fatores nos parâmetros de resposta	124

Figura 4.6	Máquina MIDA R5M instrumentada	126
Figura 4.7	Saída do sensor de vibração (piezo-eléctrico) e sinal FFT	128
Figura 4.8	Metodologia usada no processamento das imagens	128
Figura 4.9	Relação entre o avanço efetivo por dente (ffz) e o avanço por dente estimado (fz)	129
Figura 4.10	Correlação entre a energia específica de corte (Es) e o avanço efetivo por dente (ffz)	129
Figura 4.11	Efeito dos níveis dos fatores no avanço efetivo por dente (ffz), energia específica de corte (Es) e qualidade da aresta (Tw)	130
Figura 4.12	Relação entre a qualidade da aresta (Tw) e avanço efetivo por dente (ffz)	131
Figura 4.13	Relação entre a qualidade da aresta (Tw) e a energia específica de corte (Es)	131
Figura 5.1	Sequência das operações do protocolo experimental	141
Figura 5.2	Prensa laboratorial de pratos quentes controlada por computador	144
Figura 5.3	Resistência interna em função do <i>mix</i> de madeira para as três temperaturas dos pratos	148
Figura 5.4	Efeito dos níveis dos fatores na qualidade da aresta (Tw) e na energia específica de corte (Es) (média)	150
Figura 5.5	Resultados experimentais da qualidade da aresta (Tw) em função da resistência interna (RI) e do <i>mix</i> de madeira	151
Figura 6.1	Resultados obtidos de RI e teor de formaldeído para os diversos captadores	164
Figura 6.2	Energia específica de corte (Es) em função do avanço efetivo por dente (ffz) para diferentes captadores de formaldeído	165
Figura 6.3	Relação entre a energia específica de corte (Es) e a resistência interna (RI) para os diferentes captadores	165
Figura 6.4	Qualidade relativa da aresta e energia específica de corte (Es) para os diferentes captadores de formaldeído	166
Figura 6.5	Qualidade relativa da aresta em função da força relativa de corte (Fc) para os diferentes captadores de formaldeído	167
Figura 6.6	Qualidade relativa da aresta em função da energia específica de corte (Es) para ureia com dois tamanhos de partículas, finas e grossas	167
Figura 6.7	Energia específica de corte (Es) em função do avanço efetivo por dente (ffz) para ureia com dois tamanhos de partículas, finas e grossas	168
Figura 7.1	Efeito dos níveis dos fatores na Resistência Interna (RI), na qualidade da aresta (Tw) e na energia específica de corte (Es) (média) para o <i>mix</i> de <i>Eucalyptus globulus</i>	180
Figura 7.2	Efeito do nível dos fatores na qualidade da aresta (Tw) e e na energia específica de corte (Es) (média) para o <i>mix</i> de madeira de <i>Populus alba</i>	181
Figura 8.1	Modelo de Box-Behnken para o planeamento de experiências	189

Figura 8.2	Comparação dos dados experimentais com os fornecidos pelo modelo de previsão a) Aglomerado ST; b) Aglomerado MR; c) Aglomerado HG Parâmetro de resposta: avanço efetivo por dente (ffz)	198
Figura 8.3	Comparação dos dados experimentais com os fornecidos pelo modelo de previsão a) Aglomerado ST; b) Aglomerado MR; c) Aglomerado HG Parâmetro de resposta: energia específica de corte (Es)	199
Figura 8.4	Comparação dos dados experimentais com os fornecidos pelo modelo de previsão a) Aglomerado ST; b) Aglomerado MR; c) Aglomerado HG Parâmetro de resposta: qualidade da aresta (Tw)	200
Figura 8.5	Distribuição normal dos resíduos a) Aglomerado ST; b) Aglomerado MR; c) Aglomerado HG Parâmetro de resposta: avanço efetivo por dente (ffz)	201
Figura 8.6	Distribuição normal dos resíduos a) Aglomerado ST; b) Aglomerado MR; c) Aglomerado HG Parâmetro de resposta: energia específica de corte (Es)	201
Figura 8.7	Distribuição normal dos resíduos a) Aglomerado ST; b) Aglomerado MR; c) Aglomerado HG Parâmetro de resposta: qualidade da aresta (Tw)	201
Figura 8.8	Superfície de resposta a) Aglomerado ST; b) Aglomerado MR; c) Aglomerado HG Parâmetro de resposta: avanço efetivo por dente (ffz)	202
Figura 8.9	Superfície de resposta a) Aglomerado ST; b) Aglomerado MR; c) Aglomerado HG Parâmetro de resposta: energia específica de corte (Es)	202
Figura 8.10	Superfície de resposta a) Aglomerado ST; b) Aglomerado MR; c) Aglomerado HG Parâmetro de resposta: qualidade da aresta (Tw)	203
Figura 8.11	Parâmetros otimizados para o Aglomerado de Partículas ST	204
Figura 8.12	Parâmetros otimizados para o Aglomerado de Partículas MR	196
Figura 8.13	Parâmetros otimizados para o Aglomerado de Partículas HG	208
Figura A2.1	Influência de ffz (mm) na Es (J/cm^3) nos ensaios P2 do Capítulo IV (resultado das médias)	229
Figura A2.2	Relação entre ffz (mm) e Fc (N) nos ensaios P2 do Capítulo IV (resultado das médias)	229
Figura A2.3	Relação entre A (m/min) e Fc (N) nos ensaios P2 do Capítulo IV (resultado das médias)	230
Figura A2.4	Relação entre Vc (m/s) e Fc (N) nos ensaios P2 do Capítulo IV (resultado das médias)	230
Figura A3.1	Esquema de corte dos provetes em séries de placas com dimensões de 220 x 220 mm para a série de experiências com diferentes <i>mix</i> de madeira	234
Figura A3.2a	Esquema de corte dos provetes para as experiências com os captadores de formaldeído	235
Figura A3.2b	Esquema de corte dos provetes para as experiências para as espécies alternativas	235
Figura A4.1	Interação fatores / parâmetros de resposta (Aglomerado ST)	239

Figura A4.2	Interacção fatores / parâmetros de resposta (Aglomerado MR)	240
Figura A4.3	Interacção fatores / parâmetros de resposta (Aglomerado HG)	241

Lista de Tabelas

Tabela 1.1	Fatores que afetam as propriedades dos painéis de Aglomerados de Partículas	31
Tabela 1.2	Testes para determinação de formaldeído em placas	41
Tabela 3.1	Valores de n na equação de Hankinson	95
Tabela 3.2	Valores dos ângulos de ataque (α) de saída (γ) e de corte (β) em função das espécies de madeira/derivados	99
Tabela 3.3	Valores aproximados para as velocidades de corte mais adequadas atendendo ao tipo de material a cortar	101
Tabela 4.1	Propriedades físico-mecânicas do Aglomerado de Partículas laminado Tafilam [®] ST	119
Tabela 4.2	Níveis de maquinação selecionados para os ensaios preliminares (P1)	119
Tabela 4.3	Análise ANOVA na resposta aos parâmetros A, B, C1 e C2	123
Tabela 4.4	Análise ANOVA para a resposta aos parâmetros A, B, C1 e C2 no caso da fonte de luz L1-laser	125
Tabela 4.5	Propriedades físico-mecânicas dos Aglomerados de Partículas comerciais Tafipan [®]	127
Tabela 4.6	Níveis de maquinação para os ensaios preliminares com aglomerados comerciais	127
Tabela 4.7	Nível de significância estatística dos efeitos dos diferentes fatores no critério de qualidade (Tw), energia específica de corte (Es) e avanço efetivo por dente (ffz)	130
Tabela 5.1	Composição dos diferentes <i>mix</i> de madeira	143
Tabela 5.2	Formulação da cola para série de experiências	143
Tabela 5.3	Propriedades físico-mecânicas dos provetes usados nos ensaios	145
Tabela 5.4	Níveis de maquinação estudados	146
Tabela 5.5	Resumo dos fatores e níveis estudados	147
Tabela 5.6	Nível de significância dos efeitos dos diferentes fatores no critério de qualidade da aresta (Tw)	148
Tabela 5.7	Nível de significância dos efeitos dos diferentes fatores na energia específica de corte (Es)	149
Tabela 6.1	Parâmetros de processo usados na preparação dos Aglomerado de Partículas (camadas <i>CE</i> – faces; camada <i>CI</i> - camada interna)	161
Tabela 6.2	Propriedades físico-mecânicas e químicas dos painéis selecionados para a maquinação	162
Tabela 6.3	Níveis de maquinação para os ensaios	162

Tabela 7.1	Matriz das experiências com casca de eucalipto	177
Tabela 7.2	Matriz das experiências com incorporação e choupo	177
Tabela 7.3	Valores médios de RI para o <i>mix</i> casca de eucalipto e madeira de choupo	178
Tabela 7.4	Nível de significância ANOVA dos diferentes fatores na resistência interna (Eucalipto)	179
Tabela 7.5	Nível de significância ANOVA dos diferentes fatores na qualidade da aresta (Eucalipto)	179
Tabela 7.6	Nível de significância ANOVA dos diferentes fatores na energia específica de corte (<i>Es</i>) (Eucalipto)	179
Tabela 7.7	Nível de significância ANOVA dos diferentes fatores na qualidade da aresta (Choupo)	181
Tabela 7.8	Nível de significância ANOVA dos diferentes fatores na energia específica de corte (<i>Es</i>) (Choupo)	181
Tabela 8.1	Fatores e níveis estudados	188
Tabela 8.2	Tabela de resposta aos fatores para os aglomerados ST, MR e HG	188
Tabela 8.3	Sumário do modelo estatístico para os parâmetros de resposta nos aglomerados ST	190
Tabela 8.4	Sumário do modelo estatístico para os parâmetros de resposta nos aglomerados MR	190
Tabela 8.5	Sumário do modelo estatístico para os parâmetros de resposta nos aglomerados HG	191
Tabela 8.6	Análise estatística ANOVA para os aglomerados ST	192
Tabela 8.7	Análise estatística ANOVA para os aglomerados MR	193
Tabela 8.8	Análise estatística ANOVA para os aglomerados HG	194
Tabela 8.9	Resultados ANOVA para os aglomerados ST, MR e HG	195
Tabela 8.10	Resultados da otimização para os aglomerados ST	204
Tabela 8.11	Confirmação do modelo de otimização para o Aglomerado de Partículas ST	205
Tabela 8.12	Resultados da otimização para os aglomerados MR	205
Tabela 8.13	Confirmação do modelo de otimização para o Aglomerado de Partículas MR	206
Tabela 8.14	Resultados da otimização para os aglomerados HG	207
Tabela 8.15	Confirmação do modelo de otimização para o Aglomerado de Partículas HG	207
Tabela A1.1	Requisitos gerais à saída da fábrica EN 312-1 (2010)	221
Tabela A1.2	Requisitos para as propriedades mecânicas especificadas EN 312-2 (2010)	222

Tabela A1.3	Requisitos para as propriedades mecânicas especificadas EN 312-3 (2010)	222
Tabela A1.4	Requisitos para as propriedades mecânicas e de inchamento especificadas EN 312-4 (2010)	223
Tabela A1.5	Requisitos para as propriedades mecânicas e de inchamento especificadas EN 312-5 (2010)	224
Tabela A1.6	Requisitos para a resistência à humidade EN 312-5 (2010)	224
Tabela A1.7	Requisitos para as propriedades mecânicas e de inchamento especificadas EN 312-6 (2010)	225
Tabela A1.8	Requisitos para as propriedades mecânicas e de inchamento especificadas EN 312-7 (2010)	226
Tabela A1.9	Requisitos para a resistência à humidade EN 312-7 (2010)	226
Tabela A2.1	Resumo dos resultados para as experiências P2 do Capítulo IV	229
Tabela A3.1	Características da resina ureia-formaldeído	233
Tabela A3.2	Produção de PB com diferentes <i>mix</i> de madeira (Matriz de experiências do ciclo de prensagem)	233
Tabela A3.3	Resumo das condições operatórias de prensagem das diversas experiências	234
Tabela A4.1	Tabela de coeficientes (confirmação) ST	242
Tabela A4.2	Tabela de coeficientes (confirmação) MR	242
Tabela A4.3	Tabela de coeficientes (confirmação) HG	242

Nomenclatura

A	Velocidade de avanço	m/min
A_{del}	Fator de “delaminação”	
CE	Camada externa dos Aglomerados de partículas (também designada de CL)	
CI	Camada interna dos Aglomerados de partículas (também designada de FL)	
D	Diâmetro do disco	mm
E_s	Energia específica de corte	J/cm ³
e_d	Espessura do disco	mm
E_m	Módulo de elasticidade (também designado de MOE)	N/mm ²
f	Frequência	Hz
F_C	Força total de corte	N
FFT	Fast Fourier Transform (Transformadas Rápidas de Fourier)	
ffz	Avanço efetivo por dente (experimental)	mm/rotação mm
f_m	Resistência à flexão (também designada de RF)	N/mm ²
f_{tl}	Resistência à tração perpendicular ou resistência interna (também designada por RI)	N/mm ²
fz	Avanço por dente (teórico)	mm/rotação mm
f_α	Face de corte da serra de disco	
f_β	Aresta do dente da serra de disco	
f_γ	Costa do dente da serra de disco	
G_l	Inchamento em espessura (também designado de IE)	%
H	Teor em água (também designado de TA)	%
h	Espessura da apara	mm
h_c	Altura de corte	mm
HG	Aglomerado homogêneo	
k_c	Força específica de corte	N/mm ²
LRT	Referencial de simetria material	

<i>MDI</i>	Adesivos à base de isocianatos	
<i>MR</i>	Aglomerado resistente à humidade	
<i>MUF</i>	Resinas melamina ureia formaldeído	
<i>PB</i>	Aglomerado de Partículas	
<i>Pc</i>	Potência de corte	W
<i>PF</i>	Resinas fenol formaldeído	
<i>R</i>	Velocidade de rotação	rpm
<i>ST</i>	Aglomerado Standard	
<i>Tc</i>	Razão de compactação	
<i>UF</i>	Resinas ureia formaldeído	
<i>VB_{max}</i>	Desgaste máximo do gume da ferramenta	μm
<i>Vc</i>	Velocidade de corte	m/s
<i>Z</i>	Número de dentes da serra de disco	
<i>α</i>	Ângulo de ataque da serra de disco	0
<i>β</i>	Ângulo interno da serra de disco	0
<i>γ</i>	Ângulo de saída da serra de disco	0
<i>λ</i>	Ângulo de inclinação da aresta da ferramenta	0
<i>ρ</i>	Massa volúmica dos aglomerados (também designada de MV)	kg/m ³
<i>σ_θ</i>	Resistência da madeira em direções não paralelas às fibras (Hankinson)	N/mm ²

INTRODUÇÃO GERAL

*Otimização da operação de corte de Aglomerados de Partículas
fabricados com um elevado teor de madeira reciclada*

Introdução Geral

O Aglomerado de Partículas (PB) apresenta excepcionais qualidades como material, devido particularmente à sua estrutura e propriedades, o que o torna muito versátil quanto às suas aplicações. Destaque-se aqui, e desde já, a importância ambiental da incorporação de reciclados como matéria-prima preferencial para o seu fabrico. Com efeito, a utilização sustentável dos recursos florestais tem levado à utilização de resíduos de madeira e madeira reciclada no fabrico de derivados de madeira. Embora a queima de resíduos de madeira para produção de energia seja de utilização corrente, a reciclagem mostra-se como a melhor e a mais adequada solução ambiental, o que significa que só a madeira que não puder ser reciclada deverá ser utilizada como fonte de energia. Saliente-se que a reciclagem da madeira é um aliado relevante quer para a competitividade, traduzida pela redução de custos, quer particularmente pela sua contribuição positiva no desafio das alterações climáticas. O objetivo é neste sentido valorizar ao máximo o potencial destes resíduos de madeira, industriais ou urbanos, e desta forma estender o seu ciclo de vida e a retenção de CO₂, preservando as florestas contribuindo para a promoção de uma maior consciência e proveito ambiental. O melhor aproveitamento das fontes de madeira estimula portanto, a expansão florestal e contribui significativamente para a redução das emissões de gases e do efeito estufa. Refira-se a propósito, que a madeira é formada através das reações da fotossíntese onde a água e os sais minerais que estão no solo ascendem pelo tronco no xilema ativo (responsável pelo transporte da seiva bruta) que ao chegar as folhas (estruturas *clorofiladas*), possibilita a ocorrência da fotossíntese na presença da luz solar, utilizando o CO₂ que está presente na atmosfera, produzindo glucose e liberando oxigénio, bloqueando assim o carbono de uma maneira durável. Acrescente-se ainda, que durante o crescimento, uma árvore absorve, por meio da fotossíntese, aproximadamente o equivalente a 1 tonelada de CO₂ para cada m³ de crescimento, enquanto produz o equivalente de 0,7 toneladas de oxigénio. Por outro lado, os produtos de madeira requerem menos energia para fabricação (até 6000 MJ/m³) do que outras matérias-primas alternativas, contribuindo ainda mais para a redução de consumo de combustível. Usando todo o potencial da madeira (efeitos de sumidouro e substituição) em edifícios, a Europa pode reduzir as emissões de CO₂ em 300 milhões de toneladas ou 15 a 20% (por exemplo). Nos meios científicos, industriais e institucionais, foi já bem reconhecida a contribuição dos produtos à base de madeira para a mitigação das mudanças climáticas, dos efeitos positivos do seu ciclo do carbono (Figura I.1), e da sua

ecoeficiência superior comparativamente a outros materiais, bem como as suas excelentes propriedades em reciclagem com uso mínimo de energia (Ferra, 2011).

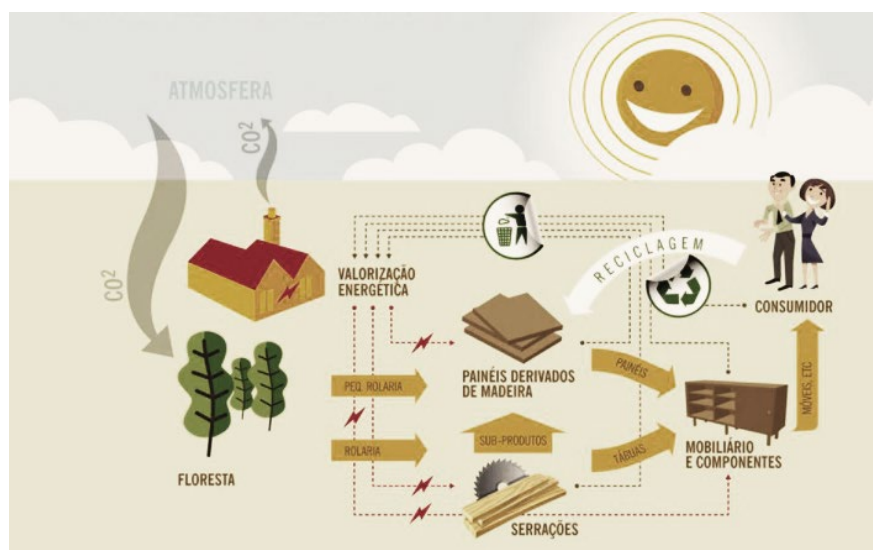


Figura I.1 – Ciclo de vida dos produtos de madeira e derivados
(<https://www.sonaeindustria.com>)

Por outro lado, as tendências atuais de aumento populacional, crescimento da procura e conseqüente pressão nos recursos naturais, têm vindo a destacar a necessidade das sociedades modernas avançarem para um paradigma mais sustentável, uma economia mais "verde" que assegure o desenvolvimento económico, a melhoria das condições de vida e de emprego, bem como a regeneração do "capital natural". Aqui bem assenta a ideia estratégica da Economia Circular que se sustenta na redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energia. Substituindo o conceito de fim-de-vida da economia linear, por novos fluxos circulares de reutilização, restauração e renovação, num processo integrado, a economia circular é vista como um elemento chave para promover a dissociação entre o crescimento económico e o aumento no consumo de recursos, relação até aqui vista como inexorável. Inspirando-se nos mecanismos dos ecossistemas naturais, que gerem os recursos a longo prazo num processo contínuo de reabsorção e reciclagem, a Economia Circular promove um modelo económico reorganizado, através da coordenação dos sistemas de produção e consumo em circuitos fechados (Figura I.2). Caracteriza-se portanto como um processo dinâmico que exige compatibilidade técnica e económica (capacidades e atividades produtivas), mas que também requer igualmente enquadramento social e institucional (incentivos e valores).

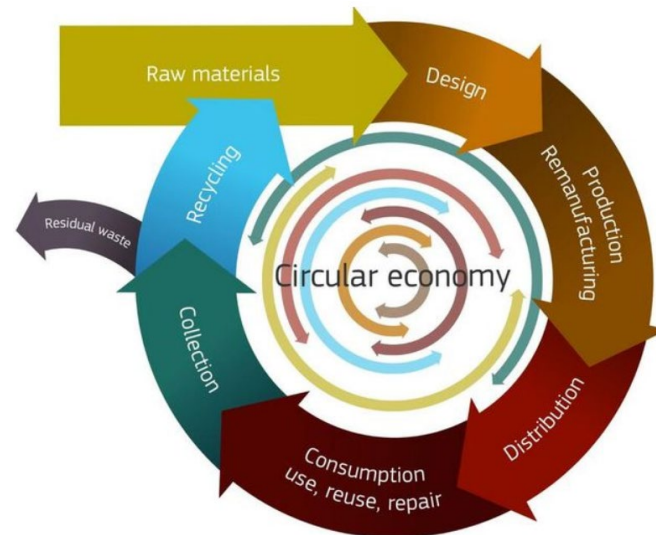


Figura I.1 – Modelo estratégico da economia circular
(<https://eco.nomia.pt/pt/economia-circular/estrategias>)

O Aglomerado de Partículas, dado que possui um sistema produtivo regenerativo, apresenta benefícios estratégicos e elevado potencial de inovação, podendo contribuir para a criação de emprego e crescimento económico devido às novas oportunidades de negócios. Além disso, destaque-se a valorização que as empresas podem receber da sociedade e do mercado, tendo em conta que atividades sustentáveis e ecologicamente corretas são hoje em dia muito bem vistas em todos os quadrantes (Araújo *et al.*, 2019).

Refira-se ainda, que o PB é o derivado de madeira que maior potencial apresenta para a incorporação dos resíduos de madeira e de madeira reciclada, explicado particularmente por via da sua estrutura e propriedades, mas também devido às características do seu processo de fabrico, uma vez que este não requer grandes alterações técnicas ou tecnológicas (Ranita *et al.*, 2004).

O processo de reciclagem tem por conseguinte, um papel extremamente relevante no futuro da indústria de painéis de derivados de madeira, e simboliza um horizonte de esperança assente numa contribuição muito positiva para o ambiente, e nas "com certeza possíveis" melhorias climáticas para as gerações vindouras.

Todavia, e para além extraordinárias qualidades aqui descritas, é largamente reconhecido por diversos segmentos da sociedade, que o desempenho dos Aglomerados de Partículas depende não só das suas propriedades físico-mecânicas, mas também da sua maquinabilidade. Com efeito, as operações de maquinação a que são sujeitos durante a sua aplicação, colocam muitas vezes em risco o prestígio destes produtos, originando o

esmilhamento das arestas e por conseguinte acabamentos incompatíveis com uma boa qualidade. Tal deve-se, não só às características dos painéis (estrutura, composição, perfil de densidades), mas também à inadequação das ferramentas e dos parâmetros de maquinação às exigências de corte destes produtos (Garrido *et al.*, 2011).

Especificamente, a qualidade do perfil da aresta de corte nos PB é um requisito extremamente importante, uma vez que a maior utilização deste produto é a indústria de mobiliário, onde se exigem faces lisas e arestas perfeitas. Por estas razões, é importante compreender os efeitos da composição do painel e das condições operatórias de prensagem, na qualidade do produto final em termos das suas propriedades físico-mecânicas, e sobretudo em termos da sua maquinabilidade.

Existem alguns trabalhos realizados em prensas à escala laboratorial, cujos objetivos foram o estudo dos efeitos das diversas variáveis do ciclo de prensagem dos PB sobre a qualidade do produto final, avaliada através de ensaios físico-mecânicos e de estabilidade dimensional (Gonçalves *et al.*, 2020; Monteiro *et al.*, 2019; Kusumah *et al.*, 2017; Ranita *et al.*, 2004; Andrews *et al.*, 2001; Palardy *et al.*, 1989). Contudo, são escassos os trabalhos que relacionem as condições de prensagem ou a composição do painel com a maquinação (Garrido *et al.*, 2011, 2010, 2009; Kowaluk *et al.*, 2004; Wong e Schager, 2003).

No caso da maquinação da madeira maciça, existe significativa investigação, destacando-se alguns trabalhos nas últimas décadas relativos à monitorização da operação de corte (Nazir e Cool, 2018; Orłowski e Ochrymiuk, 2017; Mohammadpanah *et al.*, 2017; Goli e Sandak, 2016; Hellström *et al.*, 2014; Iskra e Hernández, 2012; Ertekin *et al.*, 2003; Liang *et al.*, 2002), ao estudo do desgaste das ferramentas de corte e da influência da sua geometria na maquinação (Fahrussiam *et al.*, 2016; Zafar *et al.*, 2015; Ekevad *et al.*, 2012; Keturakis e Lisauskas, 2010; Porankiewicz *et al.*, 2008; Miklaszewski *et al.*, 2000), à determinação das forças de corte (Curti *et al.*, 2018, 2021; Goli *et al.*, 2018; Porankiewicz e Goli, 2014; Naylor *et al.*, 2012; Cristóvão *et al.*, 2012; Atkins 2009; Marchal *et al.*, 2009; Boucher *et al.*, 2007; Porankiewicz *et al.*, 2007; Eyma *et al.*, 2004, 2005; Costes *et al.*, 2004) e à análise da qualidade da superfície (Goli *et al.*, 2016; Kminiak, 2015; Kılıç, 2015; Wang *et al.*, 2015; Tiryaki *et al.*, 2014; Kujick *et al.*, 2013; Islam *et al.*, 2011; Coelho *et al.*, 2005a,b, 2008, 2011; Sandak e Negri, 2005; Gurau *et al.*, 2005, 2007; Hernández e de Moura, 2007; Aguilera e Martin 2001; Goli *et al.*, 2001).

Em relação à maquinação dos derivados de madeira, os trabalhos existentes referem-se sobretudo ao MDF, nomeadamente ao estudo dos efeitos de parâmetros de maquinação em diversos processos de corte (Sommer *et al.*, 2015; Tratar *et al.*, 2014; Zbieć, 2011; Kowaluk

et al., 2009; Engin *et al.*, 2000; Dippon *et al.*, 2000), ou à influência das propriedades dos painéis (perfil de densidades do painel e temperatura do painel) e/ou dos parâmetros de maquinação na qualidade da superfície avaliada através da medição da rugosidade (Aguilera e Barros, 2010, 2012; Aguilera, 2011a, 2011b; Aguilera *et al.*, 2000; Akbulut e Koç, 2004).

Relativamente ao Aglomerado de Partículas, é facto que a investigação se tem intensificado nos últimos anos, destacando-se alguns trabalhos onde foram estudados os efeitos dos parâmetros de maquinação nas forças de corte (aqui descritos ao longo deste documento). Outros investigaram a influência da geometria da ferramenta e o desgaste nos parâmetros de maquinação (Capítulo II). Todavia, em contraste com o que acontece com outros materiais, não existem muitos estudos publicados que relacionam os parâmetros de corte, a composição e as propriedades físico-mecânicas, com a qualidade da aresta maquinada (Garrido *et al.*, 2006, 2007a,b, 2009, 2010, 2011; Coelho *et al.*, 2011). É assim, genericamente reconhecida a necessidade de desenvolver mais trabalhos de investigação, que permitam a completa caracterização da aresta de corte dos Aglomerado de Partículas.

O objetivo deste estudo centrou-se no aprofundamento do conhecimento sobre as melhores condições da operação de corte dos Aglomerados de Partículas, tendo-se recorrido para o efeito, ao modo ortogonal misto (90° - 0° , 90° - 90°), típico das serras de disco. Pretendia-se tanto quanto possível obter uma determinada qualidade de aresta de corte, tendo em conta as características dos painéis (“mix” de madeiras de diferentes espécies/origens, resíduos de serração e madeira reciclada indiferenciada), as condições operatórias de prensagem (tempo de prensagem, temperatura dos pratos, fator Fx de resina) e os parâmetros de maquinação (velocidade de avanço e avanço por dente, velocidade de rotação, e velocidade de corte). O conhecimento adquirido permite não só melhorar a qualidade das operações de corte do Aglomerado de Partículas, como possibilita abrir uma janela de oportunidades para a definição de especificações da sua maquinabilidade, o que pode contribuir para o desenvolvimento de novos produtos. Para além disso, saliente-se a pertinência científica no âmbito da Engenharia do Ambiente, uma vez que toda a investigação focada na incorporação de resíduos, ou no estudo da influência da adição de captadores de formaldeído nos PB, por exemplo, enquadra-se em tópicos atuais como a promoção da economia circular e a diminuição da emissão de compostos tóxicos.

Este trabalho está estruturado em vários capítulos, que a seguir se apresentam. O Capítulo I é dedicado à revisão das propriedades gerais e descrição do processo de fabrico dos Aglomerados do Partículas, com particular incidência nos fatores que influenciam a sua qualidade e propriedades, uma vez que estes representam conspectos importantes para a

maquinação. No Capítulo II são passados em revista os principais trabalhos que se tem dedicado ao estudo da maquinação dos Aglomerados de Partículas, com especial destaque para aqueles que se consagraram à caracterização do perfil da aresta maquinada. No Capítulo III é feita uma revisão da teoria do corte, a ênfase foi dada à geometria de maquinação ortogonal com serras de disco, uma vez que esta foi a ferramenta selecionada e usada para o corte dos provetes na fase dos ensaios experimentais. No Capítulo IV apresentamos o trabalho experimental que teve por objetivo fazer um estudo preliminar da maquinação de Aglomerados de Partículas comerciais. Com este estudo preparatório pretendia-se adquirir sensibilidade e conhecimentos sobre a operação de corte destes produtos. Para tal, procedemos à instrumentação de uma máquina industrial multifunções equipada com uma serra circular, com o propósito de monitorizar e controlar a velocidade de avanço, a velocidade de rotação, o trabalho elétrico e as forças de corte desenvolvidas. Para a determinação das forças de corte, e tendo em atenção o valor das forças envolvidas (da ordem dos 100 N), e a frequência de amostragem exigida (40 kHz), foi desenvolvido um sistema de aquisição usando sensores piezo-elétricos. Foi estabelecido um protocolo experimental onde foram estudados vários fatores relacionados com as operações de maquinação: velocidade de avanço e de rotação, número de dentes e características geométricas das ferramentas de corte. Devido ao elevado número de parâmetros estudados, recorreu-se ao método de Taguchi para o planeamento de experiências. Foram ainda determinadas as propriedades físico-mecânicas, seguindo os procedimentos das normas existentes para os derivados de madeira: massa volúmica (NP EN 323), teor de água (NP EN 322), inchamento em espessura (NP EN 317), resistência à flexão e módulo de elasticidade (NP EN 310) e resistência à tração perpendicular ao plano (NP EN 319). Ainda neste Capítulo IV foi desenvolvido um método inovador de visão artificial para avaliação da qualidade da aresta produzida na operação de maquinação. A partir das imagens obtidas neste sistema, aplicaram-se metodologias de tratamento de imagem que possibilitaram obter perfis bidimensionais. Estes foram tratados com o objetivo final de se extraírem os pretendidos critérios de qualidade da aresta (*Total waviness*). No Capítulo V foi efetuado um estudo da maquinação de Aglomerados de Partículas fabricados com diversas composições (madeira de pinho e eucalipto, resíduos de serração e madeira reciclada indiferenciada). As tarefas envolveram o estabelecimento do protocolo experimental, tendo em vista o objetivo do estudo dos efeitos dos fatores sobre a qualidade do produto final. A partir de parâmetros relacionados com a composição das placas (“mix” de madeira), com as condições operatórias de prensagem (temperatura dos pratos, tempo de prensagem e fator Fx de resina), e com os níveis de maquinação (velocidade de

avanço por dente, velocidade de rotação e velocidade de corte), foi então investigada a influência destes fatores na maquinação e na qualidade final da aresta de corte. A preparação das placas envolveu a composição das misturas, encolagem, formação, prensagem e caracterização físico-mecânica. No Capítulo VI apresentam-se a série de experiências que visaram à análise do impacto dos captadores de formaldeído na maquinação e qualidade da aresta. Este visou em particular o estudo do efeito dos captadores: ureia sólida com diferentes granulometrias, ureia em solução, metabisulfito de sódio e amido, nas condições de maquinação (energia específica de corte, avanço por dente e forças de corte). A qualidade da aresta foi medida através do sistema de visão artificial usado nas experiências dos Capítulos IV e V. No Capítulo VII é apresentado um estudo sobre a influência da utilização da madeira reciclada de duas espécies alternativas (*Eucalyptus globulus* e *Populus alba*), na maquinação e qualidade da aresta destes PB. Foi aqui também utilizado o anteriormente apontado sistema de visão artificial para a caracterização da aresta. Para o tratamento estatístico recorreu-se a uma análise ANOVA para avaliar o nível de significância dos efeitos dos diferentes fatores na maquinação e na qualidade da aresta maquinada. No Capítulo VIII, e último, apresentamos o trabalho de modelação e otimização das variáveis que normalmente mais influenciam a qualidade da aresta de corte nos Aglomerados de Partículas. Para tal, foram desenvolvidos modelos de previsão recorrendo à metodologia de superfície de resposta (RSM), que nos permitiu otimizar os parâmetros de resposta a partir da dependência e variação dos fatores de entrada. Por fim, são apresentadas as conclusões globais e as perspectivas de trabalho futuro a que conduziu este trabalho.

Referências bibliográficas

Aguilera, A. and Barros, J. L., (2012): “Surface roughness assessment on medium density fibreboard rip sawing using acoustic signals”. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(1–3), 369–372.

Aguilera, A., (2011a): “Cutting energy and surface roughness in medium density fiberboard rip sawing”. *European Journal of Wood and Wood Products*, 69(1), 11–18.

Aguilera, A., (2011b): “Surface roughness evaluation in medium density fibreboard rip sawing”. *European Journal of Wood and Wood Products*, 69(3), 489–493.

Aguilera, A. and Barros, J. L., (2010): “Sound pressure as a tool in the assessment of the surface roughness on medium density fibreboard rip sawing process”. *Maderas. Ciencia y tecnologia*, 12(3), 159–169.

A. Aguilera, P. Martin, (2001): “Machining qualification of solid wood of *Fagus silvatica* L. and *Picea excelsa* L.: Cutting forces, power requirements and surface roughness”, *Holz Als Roh – Und Werkstoff*, 59 (6), 483-488.

Aguilera A., Meausoone P., Martin P., (2000): “Wood material influence in routing operations: the MDF case”, *Holz Als Roh – Und Werkstoff*, 58: 278-283.

Akbulut T., E. Koç, (2004): “Effects of panel density, panel temperature, and cutter sharpness during edge machining on the roughness of the surface and profiled areas of medium density fiberboards”, *For. Prod. J.*, 54 (12), 67-70.

Andrews Ch K., P.M. Winistorfer, R.M. Bennett, (2001): "The influence of furnish moisture content and press closure rate on the formation of the vertical density profile in oriented strand board", *For. Prod. J.*, 51(5).

Araújo, C.; Salvador, R.; Piekarski, M.; Sokulski, C.; De Francisco, C.; Camargo, A., (2019): “Circular economy practices on wood panels: A bibliographic analysis”. *Sustainability*, v. 11, p. 1041-1057, 2019.

Atkins T., (2009): “The science and engineering of cutting: the mechanics and processes of separating and puncturing biomaterials, metals and non-metals”. Butterworth - Heinemann, Oxford. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-17178-7>

Boucher J., Meausoone P.J., Martin P., Auchet S., Perrin L., (2007): “Influence of helix angle and density variation on the cutting force in wood-based products machining”. *J Mater Process Technol.* 189(1–3):211–218.

Coelho C., Garrido N., Martins J., Carvalho L.H., Costa C., (2011): “Wood and Wood-based panels machining quality”, *in Wood Machining - Chapter 2*, edited by J. Paulo Davim, pp. 27-82, ISTE-Wiley (ISBN: 978-1-84821-315-9).

Coelho C., Martins J., Meausoone P.J., Masson D., Carvalho L., Costa C., (2008): “Method for evaluating the influence of wood machining conditions on the objective characteristics and subjective perception of a finished surface”. *Wood Sci. and Technol.*, 42: 181-195.

Coelho C., Martins J., Carvalho L., Costa C., Masson D., Mécausoone P., (2005a): “A Novel Method for Evaluating the Influence of Wood Machining Conditions on the Quality of a Finished Surface”. *Proceedings of the 17th International Wood Machining Seminar*, Rosenheim, Germany.

Coelho C., (2005b): “Influence de l’ Usinage du Bois sur les Caractéristiques Objectives et sur la Perception Subjective de l’ Aspect d’une Finition”. *Tese de Doutoramento*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

Costes J.P., Ko P.L., Ji T., Decès-Petit C., and Altintas Y., (2004): “Orthogonal cutting mechanics of maple: Modeling a solid wood-cutting process”. *J. Wood Sci.* 50(1), 28-34.

Cristóvão, L., Broman, O., Grönlund, A., Ekevad, M. and Siteo, R., (2012): “Main cutting force models for two species of tropical wood”. *Wood Material Science & Engineering*, 7(3), 143–149.

Curti R., Marcon B., Denaud L., Togni M., Furferi R., Goli G., (2021): “Generalized cutting force model for peripheral milling of wood, based on the effect of density, uncut chip cross section, grain orientation and tool helix angle”. *European Journal of Wood and Wood Products* <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01667-5>

Curti R., Marcon B., Denaud L., Collet R., (2018): “Effect of grain direction on cutting forces and chip geometry during green beech wood machining”. *BioResources* 13:5491–5503. <https://doi.org/10.15376/biores.13.3.5491-5503>

Dippon, J., H. Ren, F. B. Amara, Y. Altintas, (2000): “Orthogonal cutting mechanics of medium density fibreboards”, *For. Prod. J.*, 50 (7/8), 25-30.

Ekevad, M., Cristóvão, L. and Marklund, B., (2012): “Wear of teeth of circular saw blades”. *Wood Material Science & Engineering*, 7(3), 150–153.

Engin S., Y. Altintas, F. Amara, (2000): “Mechanics of Routing Medium Density Fiberboard”, *For. Prod. J.*, 50 (9), 65-69.

Eyma, F., Méausoone, P. J., Larricq, P. and Marchal, R., (2005): “Utilization of a dynamometric pendulum to estimate cutting forces involved during routing. Comparison with actual calculated values”. *Annals of Forest Science*, 62(5), 441–447.

Eyma F., Méausoone P.J., and Martin, P., (2004): “Strains and cutting forces involved in the solid wood rotating cutting process”. *J. Mater. Process. Technol.* 148(2), 220-225.

Ertekin, Y. M., Kwon, Y. and Tseng, T. L. B., (2003): “Identification of common sensory features for the control of CNC milling operations under varying cutting conditions”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(9), 897–904.

Fahrussiam, F., Praja, I. A., Darmawan, W., Wahyudi, I., Nandika, D., Usuki, H. and Koseki, S., (2016): “Wear characteristics of multilayer-coated cutting tools in milling wood and wood-based composites”. *Tribology in Industry*, 38(1), 66–73.

Ferra, J.M., (2011): “Optimization of Urea-Formaldehyde resins for the manufacture of wood-based panels”, PhD thesis, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Porto. 2011. Porto.

Garrido N., Martins J., Carvalho L.H., Mendes J.G., Costa C., (2011): “Influência da incorporação de resíduos e espécies alternativas na qualidade de maquinação dos Aglomerados de Partículas”, CIMAD 11 – 1º Congresso Ibero-Latino Americano da Madeira na Construção, Livro de Resumos, edited by J. H. Negrão and A. G. Dias, pp. 95-96, 7-9 June, Coimbra, Portugal (ISBN 978-989-96461-2-4).

Garrido N., Martins J., Pereira J., Carvalho L., Mendes J., Costa C., (2010): “Effect of recycled wood and alternative species on particleboard machining”, *Proceedings of the 1st International Conference on Processing Technologies for the Forest and Bio-based Products Industries*. Salzburg/Kuchl, Austria, 07-08 Outubro.

Garrido N., Pereira J., Martins J., Carvalho L., Mendes J., Costa C., (2009): “Effect of formaldehyde scavengers on the machining of particleboard”, *International Panel Products Symposium 2009*, Nantes, France, 16-18 de Setembro.

Garrido N., Martins J., Carvalho L., Mendes J., Costa C., (2007a): “Influence of sawing conditions on the quality of particleboard edges”. Proceedings of the 18th International Wood Machining Seminar, Vancouver, Canada.

Garrido N., Martins J., Carvalho L., Mendes J., Costa C., (2007b): “Influence of the sawing conditions on particleboard edge quality”. Proceedings of the Third International Symposium on Wood Machining, Lausanne, Switzerland.

Garrido N., Martins J., Carvalho L., Mendes J., Costa C., (2006): “A novel method for evaluating the influence of wood machining conditions on the quality particleboard edges”. Proceedings of the International Conference on integrated approach to wood structure, behaviour and applications” COST E35, Florence, Italy.

Goli G, Curti R, Marcon B, Scippa A, Campatelli G, Furferi R, Denaud L., (2018): “Specific cutting forces of isotropic and orthotropic engineered wood products by round shape machining”. *Materials* 11:2575. <https://doi.org/10.3390/ma11122575>

Goli, G. and Sandak, J., (2016): “Proposal of a new method for the rapid assessment of wood machinability and cutting tool performance in peripheral milling”. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74 (6), 867–874.

Goli, G., Marchal, R., Negri, M. and Costes, J. P., (2001): “Surface quality: Comparison among visual grading and 3D roughness measurements”. In Proceedings of the 15th International Wood Machining Seminar, Los Angeles, California, USA.

Gonçalves, C.; Pereira, J.; Paiva, N.T.; Ferra, J.; Martins, J.M.; Magalhães F. D.; Barros-Timmons, A.; Carvalho, L., (2020): “A study of the influence of press parameters on particleboards’ performance”. *European Journal of Wood and Wood Products*; Heidelberg, Vol. 78, Iss. 2, 333-341. DOI: 10.1007/s00107-020-01507-y.

Gurau, L., Mansfield-Williams, H. and Irle, M., (2005): “Processing roughness of sanded wood surfaces”. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 63(1), 43–52.

Gurau, L., Mansfield-Williams, H. and Irle, M., (2007): “Separation of processing roughness from anatomical irregularities and fuzziness to evaluate the effect of grit size on sanded European oak”. *Forest Products Journal*, 57(1/2): 110–115.

Hellström, L. M., Biller, S. O., Edvardsson, S. and Gradin, P. A., (2014): “A theoretical and experimental study of the circular sawing process”. *Holzforschung*, 68(3), 307–312.

Hernández, R. E. and de Moura, L. F., (2007): “Effects of knife jointing and wear on the planed surface quality of northern red oak wood”. *Wood and Fiber Science*, 34(4), 540–552.

<https://www.eco.nomia.pt/pt/economia-circular/estrategias> (2022) “Benefícios e potenciais impactos de uma Economia Circular”, sítio da internet consultado em 30/01/2022.

<https://www.sonaeindustria.com> (2022): “Política Ambiental - Sonae Indústria”, sítio da internet consultado em 30/01/2022.

Islam, N., Parkin, R. M., Jackson, M. R. and Keszy, Z., (2011): “Development of a novel profile measurement system for actively planed surfaces”. *Measurement*, 44(2), 466–477.

Iskra, P. and Hernández, R. E. (2012): “Toward a process monitoring of CNC wood router. Sensor selection and surface roughness prediction”. *Wood Science and Technology*, 46(1–3), 115–128.

Keturakis, G. and Lisauskas, V., (2010): “Influence of the sharpness angle on the initial wear of the wood milling knives”. *Materials Science (Medžiagotyra)*, 16(3), 205–209.

Kılıç, M., (2015): “Effects of machining methods on the surface roughness values of *Pinus nigra Arnold* wood”. *BioResources*, 10(3), 5554–5562.

Kminiak, R., Gašparík, M. and Kvietková, M., (2015): “The dependence of surface quality on tool wear of circular saw blades during transversal sawing of beech wood”. *BioResources*, 10(4), 7123–7135.

Kowaluk, G., Szymanski, W., Palubicki, B. and Beer, P., (2009): “Examination of tools of different materials edge geometry for MDF milling”. *European Journal of Wood and Wood Products*, 67(2), 173–176.

Kowaluk G., D. Dziurka, P. Beer, G. Sinn, S. Teschegg, (2004): “Influence of particleboard production parameters on work of fracture and work of chips formation during cutting”, *Electronic J. of Polish Agricultural Universities*, 7(1).

Kuljich S., Herna R.E., Llave A.M., Koubaa A., (2013): “Effects of cutting direction, Rake angle and depth of cut on cutting forces and surface quality during machining of balsam Fir”. *Wood Fiber Sci* 45(2):195–205.

Kusumah S.S., Umemura K., Guswenrivo I., Yoshimura T., Kozo K., (2017): “Utilization of sweet sorghum bagasse and citric acid for manufacturing of particleboard II: influences of pressing temperature and time on particleboard properties”. *J Wood Sci* **63**, 161–172 (2017).

- Liang, S. Y., Hecker, R. L. and Landers, R. G., (2002): “Machining process monitoring and control: The state-of-the-art”. In ASME 2002, International Mechanical Engineering Congress and Exposition (American Society of Mechanical Engineers, pp. 599–610).
- Marchal, R., Mothe, F., Denaud, L. E., Thibaut, B. and Bleron, L., (2009): “Cutting forces in wood machining –basics and applications in industrial processes”. A review COST action E35 2004–2008: Wood machining–micromechanics and fracture. *Holzforschung*, 63(2), 157–167.
- Miklaszewski S., M. Zurek, P. Beer, A. Sokolowska, (2000): “Micromechanism o polycrystalline cemented diamond tool wear during milling of wood-based materials”, *Diamond and Related Materials*, 9, 1125-1128.
- Mohammadpanah, A., Lehmann, B. and White, J., (2017): “Development of a monitoring system for guided circular saws, experimental investigation”. In 23rd International Wood Machining Seminar (IWMS23), Poland.
- Monteiro, S.; Martins, J.; Magalhães, F.D.; Carvalho, L., (2019): “Low Density Wood Particleboards Bonded with Starch Foam—Study of Production Process Conditions”. *Materials* 2019, 12, 1975. <https://doi.org/10.3390/ma12121975>.
- Naylor A, Hackney P, Perera N, Clahr E., (2012): “A predictive model for the cutting force in wood machining developed using mechanical properties”. *Bio Resour* 7:2883–2894
- Nasir V., Cool J., (2018): “A review on wood machining: characterization, optimization, and monitoring of the sawing process”. *Wood Mater Sci Eng*. Taylor & Francis Group. 15:1, 1-16, DOI: 10.1080/17480272.2018.1465465.
- Orlowski, K. and Ochrymiuk, T., (2017): “A newly-developed model for predicting cutting power during wood sawing with circular saw blades”. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 19(2), 149–162.
- Palardy R., B. Haataja, S. Shaler, A. Williams, T. Laufenberg, (1989): “Pressing of wood composite panels at moderate temperature and high moisture content”, *For. Prod. J.*, 39(4), 27-32.
- Porankiewicz B., Goli G., (2014): “Cutting forces by Oak and Douglas Fir machining”. *Maderas Ciencia y Tecnología* 16(2):199–216.
- Porankiewicz, B., Iskra, P., Józwiak, K., Tanaka, C. and Zborowsky, K., (2008): “High speed steel tool wear after wood milling in presence high temperature tribochemical reactions”. *BioResources*, 3(3), 838–858.

Porankiewicz B., Bermudez JC., Tanaka C., (2007): “Cutting forces by peripheral cutting of low density wood species”. *Bio Resour* 2:671–681.

Ranita J., J. Martins, N. Garrido, L. Carvalho e C. Costa, (2005): “Influência do ciclo de prensagem na qualidade do aglomerado de partículas de Madeira fabricado com um teor elevado em partículas recicladas”, *Actas do 5º Congresso Florestal Nacional*, Instituto Politécnico de Viseu, Viseu, 16-19 de Maio.

Sandak, J. and Negri, M., (2005): “Wood surface roughness –What is it?” *Trees and Timber Research Institute*, Ivalsa/Cnr. Accessed 18 January 2022.

Sommer, F., Talpeanu, D., Kern, F., Gadow, R. and Heisel, U., (2015): “Medium density fiberboard machining and wear behavior of injection-molded ceramic composite wood cutting tools”. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 12(1), 147–156.

Tiryaki, S., Malkoçoğlu, A. and Özşahin, Ş., (2014): “Using artificial neural networks for modelling surface roughness of wood in machining process”. *Construction and Building Materials*, 66, 329–335.

Tratar, J., Pusavec, F. and Kopac, J., (2014): “Tool wear in terms of vibration effects in milling medium-density fibreboard with an industrial robot”. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(11), 4421–4429.

Wang J., Cao P., Guo X., Hong X., Jia G., Wang B., (2015): “Effect of Process Parameters on Cutting Forces and Surface Roughness during Peripheral Up Milling of Bamboo Scrimber”. *BioResources*, 10, 8414–8425.

Wong, D.C., G.S. Schager, (2003): “Effect of particle size on particleboard machining”, *Proceedings of Int. Wood Machning Seminar*, Matsue, Japan.

Zafar, T., Kamal, K., Sheikh, Z., Mathavan, S., Jehanghir, A. and Ali, U., (2015): “Tool health monitoring for wood milling process using airborne acoustic emission”. In *2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, (CASE)*, (pp. 1521–1526).

Zbieć, M., (2011): “Application of neural network in simple tool wear monitoring and identification system in MDF milling”. *Drvna Industrija*, 62(1), 43–54.

CAPÍTULO I

PROPRIEDADES GERAIS DOS AGLOMERADOS DE PARTÍCULAS

Introdução

As diversas utilizações dos Aglomerados de Partículas (PB) estão diretamente associadas às suas propriedades físicas, mecânicas e de processo. A sua qualidade depende das interações entre inúmeras variáveis, como a espécie de madeira ou resíduos usados, a geometria de partículas e respectivas massas específicas, o tipo e quantidade de resinas, a humidade do colchão e o ciclo de prensagem. A variação dos parâmetros operatórios durante o seu processo de fabrico faz dele um produto singular (com características únicas), com a vantagem de adequar a múltiplas aplicações. Impõem-se aqui uma especial atenção para as operações de maquinação, uma vez que as referidas propriedades e variáveis do processo influenciam significativamente a qualidade da aresta de corte.

Por esta razão, e para a completa compreensão da interação entre a ferramenta de corte e o material a maquinar, importa conhecer com rigor estas singularidades dos Aglomerados de Partículas, que aqui tomamos como propósito principal deste capítulo.

1.1 Definição

Os Aglomerados de Partículas são placas de derivados de madeira fabricadas sob pressão e calor a partir de partículas de madeira (lascas de madeira, estilha, aparas, serradura e similares) e/ou outro material lenhocelulósico em forma de partículas (aparas de linho ou cânhamo, fragmentos de bagaço e similares) com adição de uma cola (EN 309, 2005).

O aglomerado de três camadas é o mais comumente fabricado na indústria de derivados de madeira, e é estruturalmente constituído por uma camada central (CI) e duas externas (CE). O tamanho das partículas das camadas da CE são menores que o das partículas da CI, visando conferir melhor acabamento superficial e maior resistência da ligação adesiva da camada externa. Este tipo de estrutura contribui para a estabilidade do painel, garantindo uma superfície menos porosa, preparada para receber aplicação de vernizes, tintas, folheados de madeiras ou sintéticos. Cabe aqui salientar, que a maioria das aplicações para os painéis de partículas exige superfícies lisas (Vansteen, 1981). Devido a estas características, o PB é muito versátil no que diz respeito às suas potenciais aplicações, das quais destacamos o seu uso com fins estruturais na construção civil. A sua utilização para fins não estruturais é também muito apreciada, como é o caso do fabrico de divisórias, portas e elementos decorativos. A utilização de placas de PB revestidas com papel decorativo impregnado com

resinas melamínicas está generalizada na indústria do mobiliário (EPF, 2019).

A norma europeia EN 312, 2010, prevê a classificação de placas do Aglomerado de Partículas de madeira, de acordo com as suas aplicações distintas, e divide-as em sete tipos: P1: placas para utilização geral em ambiente seco; P2: placas para aplicações interiores (incluindo mobiliário) em ambiente seco; P3: placas para aplicações não estruturais em ambiente húmido; P4: placas para aplicações estruturais em ambiente seco; P5: placas para aplicações estruturais em ambiente húmido; P6: placas para aplicações estruturais de alta exigência em ambiente seco; P7: placas para aplicações estruturais de alta exigência em ambiente húmido (Anexo I).

De entre os vários tipos de aglomerados comerciais que existem salientam-se três tipos: o aglomerado standard (ST), o homogéneo (HG) e o hidrófugo (MR). Os aglomerados ST permitem uma utilização generalizada em aplicações interiores e mobiliário e apresentam uma superfície macia e muito uniforme. Disponível numa gama alargada de tamanhos e espessuras normalizadas, podem ser utilizados em cru ou revestido com papel melamínico, folha de madeira ou laminado. Destaca-se o seu excelente comportamento ao corte, fresagem, lixagem e acabamento. O aglomerado HG é seguramente o mais indicado para utilização em portas interiores ou em superfícies arredondadas de mobiliário dada a sua excelente maquinaria. A sua superfície é igualmente adequada para receber diversos tipos de revestimento. Já o Aglomerado de Partículas MR garante um comportamento adequado de resistência a situações de humidade ambiente ou humedecimento ocasional, como as facilmente verificadas em aplicações de mobiliário de cozinha ou casa de banho. O seu desempenho em aplicações de construção é também elevado, podendo com o revestimento adequado ser utilizado em cofragens, apainelamento de paredes ou outras aplicações.

1.2 Processo de Fabrico

O processo de fabrico dos painéis de Aglomerado de Partículas de madeira pode ser descrito em seis/sete operações fundamentais (preparação das partículas, aplicação de cola, formação, pre-prensagem, prensagem e arrefecimento/estabilização/acabamento), tal como se representa esquematicamente no fluxograma da Figura 1.1.

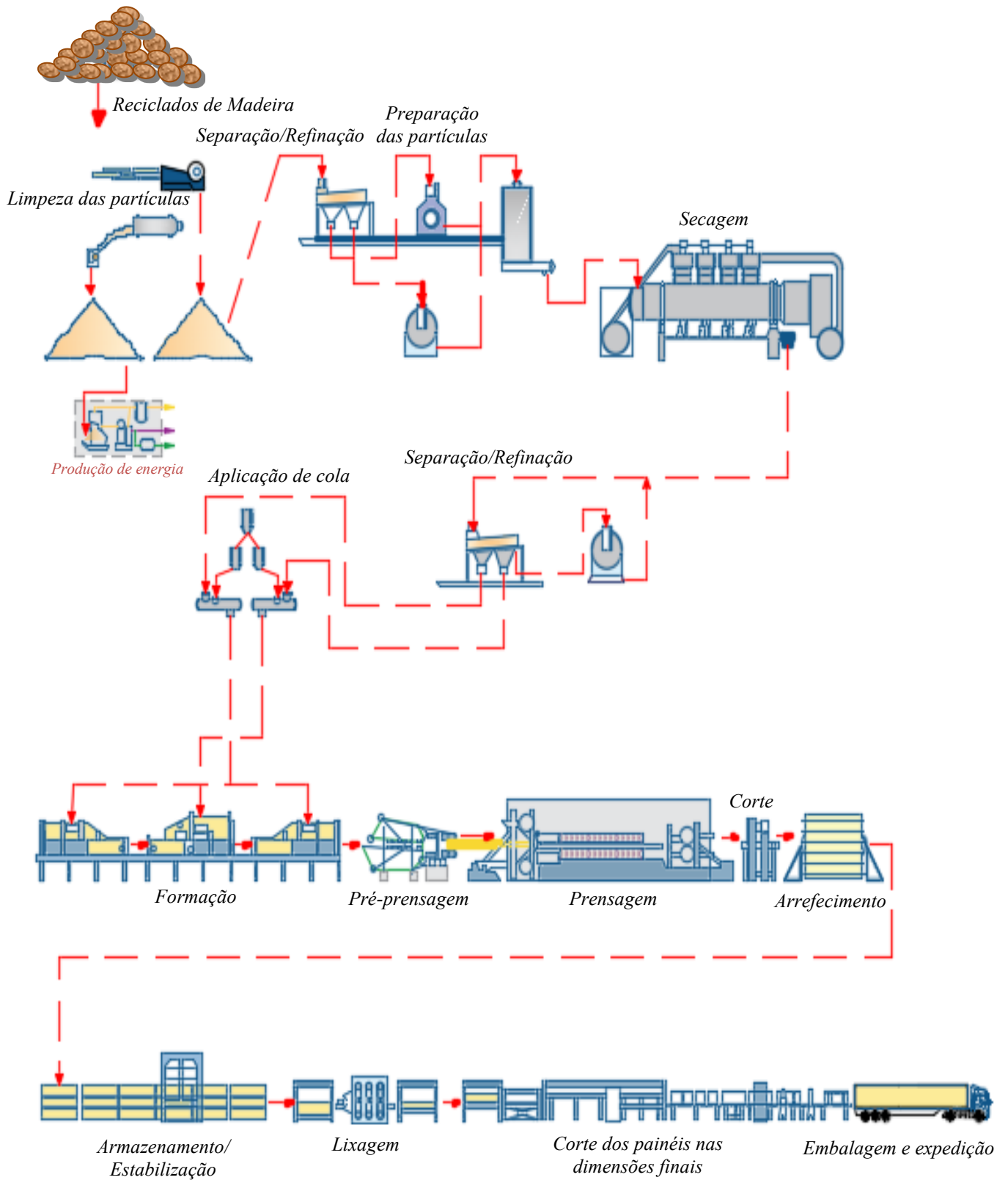


Figura 1.1 – Processo de fabricação dos Aglomerados de Partículas (adaptado de Carvalho, 2006 e Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites, 2005)

O processo é conceitualmente simples, no entanto, a produção dos aglomerados à escala industrial requer equipamentos de alta tecnologia. Uma das relevantes vantagens deste processo, é que os materiais utilizados podem ser aproveitados ao máximo, uma vez que, concluído o ciclo de vida do produto, este pode ser reciclado, convertendo-se novamente em produto ou em energia (Santos, 2010).

Para além desta vantagem, a tecnologia empregue na produção de painéis aglomerados agrega uma série de benefícios, tais como: (i) redução do fator anisotrópico da madeira sólida; (ii) propriedades físicas e mecânicas mais homogêneas; (iii) eliminação de fatores redutores da resistência da madeira, como nós, inclinação do fio, lenho juvenil, entre outros; (iv) adaptação das propriedades dos painéis através do controle dos parâmetros do processo; (v) menores exigências em termos de qualidade da madeira, como diâmetro do tronco, forma do fuste e outros defeitos; (vi) menor custo de produção, decorrente dos requisitos de qualidade da madeira e automação do processo produtivo (Maloney, 1993; Iwakiri, 2005).

1.2.1 Matérias-primas

a) Madeira e desperdícios

Na Figura 1.2 estão representados os 14 elementos básicos que podem ser obtidos a partir da madeira, sete ou oito dos quais são utilizados para o fabrico de painéis Aglomerados de Partículas (Maloney, 1993). A casca não está incluída na lista, embora pequenas quantidades sejam usadas em diversas unidades industriais.

Recentemente tem-se acentuado a tendência para a utilização de resíduos de origem florestal, resíduos de madeira pós-industriais (por exemplo: serradura, partículas de serração, resíduos do corte de painéis, partículas) e resíduos de madeira pós-consumo (por exemplo: móveis usados, resíduos de madeiras resultantes de demolições, paletes, embalagens de madeira), que se tornaram matérias-primas amplamente reconhecidas para a indústria de Aglomerados de Partículas (Vefago e Avellaneda, 2013; Diyamandoglu e Fortuna, 2015).

Porém, outros tipos de materiais lenho-celulósicos podem ser utilizados no fabrico de painéis de aglomerado. Têm sido realizadas várias tentativas de utilização de espécies de crescimento rápido como o cânhamo, o linho, o sisal e o bambu e também de incorporação de resíduos agrícolas como palha, bagaço e algodão (Jorge, 2008). Sendo que, não podem ser utilizados como matérias-primas, materiais à base de madeira que contenham substâncias orgânicas provenientes do revestimento aplicado, nem madeiras tratadas com produtos

preservadores contendo metais pesados, tais como postes de eletricidade ou vigas de caminho-de-ferro (Irle *et al.*, 2004).

No caso particular da indústria portuguesa de Aglomerados de Partículas, é essencialmente usada madeira de pinho marítimo sob a forma de rolaria, estilha, serrim e outros desperdícios de serração. Também é usada madeira reciclada, como por exemplo: paletes e embalagens e subprodutos oriundos da segunda transformação. Para além destas, são correntemente usadas: a parte central do toro não aproveitada durante o desenrolamento, os costaneiros, a madeira seca sob a forma de desperdício originada na indústria do mobiliário, e os resíduos resultantes do corte de aglomerados e contraplacados.














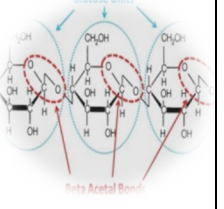
<i>Non Periodic</i>	TABLE OF WOOD ELEMENTS				
LOGS 	LUMBER 	THIN LUMBER  THICK VENEER	VENEER 	LONG FLAKES  SHORT VENEER	
CHIPS 	FLAKES 	EXCELSIOR 	STRANDS 	PARTICLES 	
FIBER BUNDLES 	PAPER FIBER 	WOOD FLOUR 	CELLULOSE 	?	

Figura 1.2 – Tipos de elementos básicos obtidos a partir da madeira (adaptado de Maloney, 1993)

b) Adesivos sintéticos

Os principais adesivos comercialmente empregues na indústria de madeira aglomerada são de origem sintética e têm a propriedade de serem termoendurecíveis, ou seja, reticularem pela ação do calor ou de catalisadores específicos. São amplamente empregues com esse propósito resinas sintéticas à base de formaldeído, nomeadamente: de ureia-formaldeído (UF), melamina-ureia-formaldeído (MUF), e menos frequentemente fenol-formaldeído (PF), embora também sejam utilizados adesivos à base de isocianatos (MDI) (Carvalho *et al.*, 2012, Gonçalves *et al.*, 2018).

As resinas UF constituem o grupo mais importante de adesivos utilizados na produção dos Aglomerados de Partículas. Estas resinas são mais baratas e a sua cor clara torna-as totalmente indicadas para a produção de produtos decorativos, embora sejam pouco resistentes à imersão em água (Carvalho *et al.*, 2012). Os painéis fabricados com resinas UF quando sujeitos a exposição contínua à humidade poderão ter perda de resistência mecânica, inchamento e/ou acentuada deformação. O aglomerado impregnado com humidade a teores superiores a 26% em massa por períodos prolongados, poderá originar a desagregação do painel (Zhao *et al.*, 2011). Por outro lado, a libertação de formaldeído durante o processo de prensagem, bem como durante a sua vida útil, pode representar riscos para a saúde em casos de exposição prolongada (Pizzi, 1994; Carvalho *et al.*, 2012).

As resinas MUF exibem vantagens adicionais em relação às UF, de destacar: maior estabilidade hidrolítica (Pizzi, 1994), melhor comportamento em termos de variação dimensional e manutenção de resistência físico-mecânica em ambientes húmidos (Carvalho *et al.*, 2012). De salientar igualmente a maior transparência e menor emissão de formaldeído para maiores razões molares de melamina (Fink, 2005). No entanto, as resinas MUF apresentam um custo de produção mais elevado em relação às UF.

As resinas PF são mais caras mas apresentam maior durabilidade e resistência à humidade, o que permite a sua utilização em aplicações exteriores. O seu processo de cura é semelhante ao das resinas à base de UF, no entanto, exigem maiores cuidados na sua aplicação, nomeadamente no que diz respeito às condições de prensagem: temperatura, pressão e principalmente à humidade da madeira. Tem surgido alguns problemas durante o processo de fabrico dos aglomerados com a utilização destes adesivos, devido à necessidade de temperaturas mais elevadas e maiores tempos de cura, que não só conduzem a uma redução da produtividade como aumentam a penetração do adesivo nas partículas diminuindo os resultados da adesão entre estas (Ressel, 2008).

Os adesivos a base de isocianatos (pMDI) são especialmente indicadas para o fabrico de painéis destinados a ambientes exteriores devido a formarem um produto de alta resistência à humidade. Por outro lado, proporcionam uma redução do tempo de prensagem e baixo consumo e não há emissão de formaldeído (Zhao *et al.*, 2011). Todavia, a utilização destes adesivos está limitada devido ao seu preço extremamente elevado, sendo por isso frequentemente utilizadas em combinação com outras resinas principalmente as fenólicas (Irle e Barbu, 2010).

c) Aditivos

Para a produção dos Aglomerados de Partículas podem ser utilizados catalisadores latentes como o cloreto de amónio e o sulfato de amónio adicionados na resina UF, com a função de reativar a pré-condensação e aumentar a velocidade de polimerização e cura da resina. O uso destes agentes reduz o *pH* da resina, torna o meio mais ácido e facilita a ação de endurecimento por combinação com o formaldeído livre (Pizzi, 1994). Porém, na Europa já não é possível usar o cloreto de amónio, pois quando os painéis são queimados produzem foscénio, substância tóxica e cancerígena.

A parafina é um dos aditivos mais utilizados, e visa diminuir a absorção de água dos PB. A quantidade de parafina aplicada é geralmente na proporção de 5%, baseado no teor de sólidos de resina seca, e tem a finalidade de reduzir a higroscopicidade das partículas de madeira e melhorar a estabilidade dimensional dos painéis (Iwakiri, 2005; Carvalho *et al.*, 2010).

Para produção de painéis resistentes ao fogo, adicionam-se componentes químicos como o fosfato de amónio, o ácido bórico, o sulfato de amónio e o bromato de amónio, que podem ser incorporados durante o processo de produção, ou através da impregnação dos painéis após a prensagem (Iwakiri, 2005; Martinka *et al.*, 2021).

Alguns compostos químicos podem ser incorporados durante o processo produtivo numa proporção variando entre 0,25% a 2,5% base massa-seca das partículas, para tornar os painéis resistentes a fungos e insetos. Produtos à base de boro, em proporções de 1% a 2% são suficientes para melhorar a resistência ao ataque de fungos, e apresentar eficiência razoável contra insetos. Produtos à base de hexaclorociclohexano (HCH) são recomendáveis contra o ataque de insectos xilófagos (Iwakiri, 2005). No entanto, e através de consulta ao site “Encyclopaedia of Occupational Health & Safety, Set., 2021”, constata-se que este inseticida

foi classificado como “susceptível de ser cancerígeno para os humanos”, pelo que suspeitamos que num futuro próximo o seu uso nos PB poderá ser condicionado.

1.2.2 Preparação da estilha/partículas

Tal como referimos na secção anterior, apesar da utilização crescente de resíduos de serração e de madeira reciclada no fabrico dos Aglomerados de Partículas, na indústria portuguesa a incorporação de madeira em rolo continua a representar um volume significativo. Por esta razão, apresentam-se seguidamente os equipamentos normalmente integrados no *layout* das fábricas portuguesas destinados à preparação das partículas.

a) Descasque

No início do processo de fabrico a rolaria é sujeita à operação de descasque para remoção completa da casca. Idealmente a casca não deverá ser incluída no fabrico do Aglomerado de Partículas uma vez que reduz as propriedades de resistência e aumenta as necessidades de resina. A remoção da casca é feita em descascadores do tipo abrasivo, hidráulico ou mecânico. O tambor de descascamento é um dos equipamentos do tipo abrasivo mais utilizado. A casca é normalmente usada como combustível nas caldeiras das fábricas atendendo ao seu elevado valor calorífico, fornecendo cerca de 30% da energia térmica necessária para a indústria (Irle e Barbu, 2010).

b) Destroçamento

Dependendo do tipo de Aglomerado de Partículas a fabricar, o tamanho ideal das partículas e o processo de redução da madeira em partículas tem de ser realizado de acordo com as especificações do produto final. Este processo pode acontecer interna ou externamente à unidade fabril e é feita através de equipamentos de corte de tecnologia relativamente simples.

Destacam-se entre estes equipamentos, os destroçadores de tambor que são utilizados nas transformações primárias dos rolos em estilha, os trituradores usados para a obtenção de estilha reciclada, os destroçadores em anel indicados para a transformação de resíduos provenientes de resíduos florestais e madeiras residuais, e os moinhos de martelos que moem e esmagam estilha de reciclados e de madeira para redução do seu tamanho (Maloney, 1993).

c) Secagem das partículas

Após a limpeza (no caso de resíduos/reciclados) e preparação das partículas a etapa seguinte é a secagem, que é considerada uma parte crítica no processo de fabrico dos Aglomerados de Partículas. Esta operação visa reduzir o teor de água do material para valores entre 2 a 8%, dependendo do tipo de resina a utilizar e da sua viscosidade (Irle e Barbu, 2010). Se a humidade estiver alta durante a operação de prensagem pode ocorrer “delaminação” ou *rebentamento* do painel no momento da abertura dos pratos da prensa. Por outro lado, uma secagem a temperaturas elevadas pode aumentar o risco de incêndio e/ou uma descoloração das partículas (Youngquist, 1999). O teor de água inicial da matéria-prima depende da proveniência (madeira verde ou madeira seca) e da espécie (em geral a espécie *pinus* têm humidades elevadas, situação que vai afetar a economia da operação de secagem). A operação de secagem depende fortemente do tamanho e forma das partículas, da temperatura e humidade ambiente e dos métodos de alimentação da matéria-prima (Irle e Barbu, 2010). Os equipamentos habitualmente usados para a secagem das partículas são os secadores rotativos (secador de tambor de três passagens e secador de tambor de uma passagem) e os secadores horizontais (secadores de jato e secadores de tubos) (Maloney, 1993; Ressel, 2013b).

d) Separação/Refinação

Terminada a etapa de secagem, as partículas seguem para a operação de separação. Existem fundamentalmente dois tipos de equipamentos para a separação de partículas: os peneiros mecânicos e os classificadores por fluxo de ar (Irle e Barbu, 2010). As partículas são classificadas de acordo com a sua granulometria em quatro tipos: *oversize*, camada central, camada externa e pó. As partículas *oversize* são redirecionadas para os moinhos de martelos ou destroçadores para a redução da sua granulometria, sendo posteriormente reintroduzidas no processo. As partículas mais finas são destinadas às camadas externas do painel e as partículas maiores à camada interna. O pó resultante desta etapa é destinado à produção de energia térmica (Ressel, 2013a). As partículas seguem posteriormente até aos aplicadores onde são misturadas com resinas, emulsão de parafina, catalisador e água.

1.2.3 Encolagem

A quantidade e o tipo de resina usados no Aglomerado de Partículas dependem do tipo de produto pretendido. A quantidade da resina é calculada em função do teor em sólidos da

resina e da massa seca das partículas e pode variar entre 4% e 10%, para o caso das resinas UF. No misturador as partículas são agitadas enquanto a resina e outros aditivos são pulverizados. O objetivo da difusão das gotas de resina é garantir a uniformidade sobre as partículas, que devem ficar cobertas com uma quantidade de resina suficiente para se garantirem as propriedades exigidas no produto final. A resina (UF) contida na camada externa é maior (8% a 14%) em relação à interna (4% a 8%), devido às diferenças na área superficial das partículas (Ressel, 2008; 2013c). A parafina é normalmente misturada com a resina antes da encolagem. Porém, no caso das resinas fenólicas, as emulsões de parafina não podem ser misturadas inicialmente com a resina (Youngquist, 1999).

1.2.4 Formação

A mistura de partículas/resina é depositada de forma ordenada sobre um tapete ou tabuleiro metálico. A quantidade de partículas é pré-determinada em função da densidade e espessura do painel. O fator mais importante é a massa volúmica das partículas, uma vez que estas são depositadas por gravidade para se espalharem uniformemente em camadas distintas ao longo da largura da máquina à medida que o tapete avança. As máquinas formadoras são projetadas tendo em conta o tipo de matéria-prima a utilizar no processo de fabrico e as características do produto final. O funcionamento destas máquinas baseia-se fundamentalmente em três princípios: formação por efeito do peso das partículas, segregação pelo efeito do tamanho das partículas auxiliada por jatos de ar e separação através de rolos texturados, e estão projetados para uma adequação perfeita ao tamanho das partículas destinadas às distintas camadas (Ressel, 2013d).

1.2.5 Pré-prensagem

Antes do colchão ser alimentado à prensa é necessário diminuir a sua altura para reduzir o “daylight” (abertura da prensa) e conseqüentemente a pré-cura da superfície devido a um tempo de fecho da prensa mais prolongado. Existem dois tipos de equipamentos de pré-prensagem: as prensas de pratos e as prensas contínuas de alta pressão que são as mais adequadas para os Aglomerados de Partículas (Irle e Barbu, 2010).

1.2.6 Prensagem

A prensagem é a operação mais importante e a mais cara de todo o processo, o que exige um controlo rigoroso de todos os parâmetros. A prensagem a quente tem a função de conferir propriedades plásticas à madeira para reduzir a sua resistência à compressão, facilitando a consolidação do colchão até a espessura desejada e a polimerização da resina entre as partículas adjacentes (Carvalho 2012; Ressel, 2013d).

As prensas podem ser divididas em dois tipos: prensas de pratos (de abertura simples ou múltipla) e contínuas. As temperaturas de prensagem situam-se habitualmente entre os 200°C a 220 °C. A pressão depende de vários fatores, mas está geralmente situada entre 2 a 4 MPa para painéis de média densidade (Irle e Barbu, 2010).

Com o emprego da tecnologia de prensa contínua e melhor controlo da granulometria das partículas, as características de painéis aglomerados passaram por melhorias significativas, principalmente no que se refere à sua densificação, resultando em melhor distribuição do gradiente vertical de densidade, com as faces mais compactadas e textura mais fina da superfície do painel (Iwakiri *et al.*, 2008, Thoemen, 2013).

1.2.7 Acabamento

Depois de saírem da prensa, as placas são simultaneamente seccionadas longitudinalmente e transversalmente (normalmente num comprimento não superior a 6,5 m), através de serras de disco paralelas e diagonais. Cada placa é de seguida controlada em termos de defeitos internos através de um sistema de ultrassons, seguindo depois para o controlo de espessura e peso num processo contínuo. Este sistema efetua a rejeição das placas que não respeitem as tolerâncias impostas pelas normas (Irle e Barbu, 2010).

São de seguida arrefecidas num sistema de garfos giratórios, em que o arrefecimento gradual visa atingir a temperatura de equilíbrio através da eliminação (tanto quanto possível) dos gradientes de humidade. De referir, que se as placas fossem empilhadas imediatamente a seguir à prensagem, o calor residual poderia causar a degradação térmica da cola (Irle e Barbu, 2010).

Para que seja obtido um acabamento de superfície adequado à sua utilização posterior, e ao mesmo tempo garantir uma espessura correcta e uniforme, as placas são lixadas através da passagem por várias cabeças de lixagem de grão progressivamente mais fino, inicialmente

para calibragem com lixas de grão entre 60-80, e em seguida, para conferir o acabamento final, com lixas de granulometria entre 100-150 (Irle e Barbu, 2010). Na última fase do processo de acabamento as placas são cortadas em serras de disco nas dimensões comerciais, e empilhadas em lotes com quantidades moduladas de forma a otimizar o seu transporte (Thoemen, 2013).

1.3 Fatores que afetam as propriedades dos Aglomerados de Partículas

De acordo com Maloney (1993), os principais parâmetros que afetam as propriedades dos Aglomerados de Partículas, são: a espécie de madeira, a dimensão e geometria das partículas, o tipo e a quantidade de resina, os aditivos, a estrutura do painel formado pela orientação das partículas, a disposição das camadas e as condições de prensagem.

Na Tabela 1.1 apresentam-se os parâmetros que têm uma influência direta na produção dos painéis de partículas e conseqüentemente nas suas propriedades físico-mecânicas. Quase todos os parâmetros interagem entre si, por conseguinte, a mudança num desses fatores resultará na alteração de vários outros. Uma vez verificada a existência dessas interações é possível desenvolver um controle mais completo do processo (Maloney, 1996).

Experiências industriais mostraram que as propriedades dos painéis estão intimamente ligadas às características da matéria-prima, sendo que, algumas dessas ligações dependem igualmente dos vários estádios intermédios do processo. A variabilidade natural da madeira e as diferentes proveniências dos reciclados tornam estas interações bastante complexas. A sua morfologia afeta por exemplo a condutividade térmica e conseqüentemente a temperatura no interior do colchão e o desenvolvimento da ligação adesiva. A estrutura química afeta a adesão e cura do adesivo e também a higroscopicidade das placas, que terão influência na transferência de vapor de água durante a prensagem a quente e na estabilidade dimensional do produto final (Maloney, 1993). As propriedades mecânicas dos aglomerados são afetadas pelas características anteriores, e estas conseqüentemente vão influenciar na qualidade da maquinação (Garrido *et al.*, 2009).

Entre os parâmetros intervenientes no processo de fabrico dos painéis que podem ser controlados visando melhorar a qualidade e minimizar o custo, destacam-se particularmente: a dimensão e geometria das partículas, a quantidade de resina, a humidade e os requisitos de prensagem (Bodig e Jayne, 1989; Maloney, 1993; Youngquist, 1999).

Tabela 1.1 - Fatores que afetam as propriedades dos painéis de Aglomerados de Partículas (Maloney, 1993)

Inerentes à Madeira	Inerentes ao Processo
Espécies	Massa específica dos painéis
Massa específica da madeira	Razão de compactação
pH	Composição dos painéis
Teor de humidade	Resina e aditivos
Extrativos	Dimensão, geometria e orientação das partículas
Local de crescimento	Teor de água das partículas
Idade cambial	Tempo de fecho da prensa e prensagem
Substâncias estranhas	Temperatura de prensagem
Forma do tronco	Pressão específica

1.3.1 Dimensão e geometria das partículas

Segundo Bodig e Jayne (1989), a dimensão e a forma das partículas é uma das variáveis que mais influencia nas propriedades mecânicas dos PB. Partículas mais longas e mais finas produzem painéis com maior resistência à flexão estática e garantem maior estabilidade dimensional, enquanto partículas mais curtas e mais espessas produzem painéis com maior resistência interna, mas menor estabilidade dimensional. A geometria das partículas influencia também no acabamento, na colagem e na aplicação de revestimento nas superfícies das placas. Conforme Maloney (1993), as propriedades mecânicas como resistência e rigidez à flexão, resistência à tração paralela e perpendicular à superfície (resistência interna), resistência ao arrancamento de parafusos e pregos, são afetadas pela geometria das partículas. A geometria das partículas também influencia as propriedades físicas dos painéis, assim como a absorção de humidade (na forma líquida ou de vapor), com mudanças correspondentes nas dimensões e características da superfície. Refira-se a propósito, que uma das propriedades dos PB que mais influencia nas características da maquinação é a densidade das partículas. Experiências industriais mostraram que as espécies de madeira com uma massa volúmica compreendida entre 300 kg/m^3 a 500 kg/m^3 conduzem à produção de painéis com uma ótima relação resistência/custo. Espécies de madeira com densidades superiores podem ser usadas para produção de painéis de elevada resistência, mas o rácio resistência/custo piora, e a operação de maquinação revela-se também mais difícil (Wong, 2007). Para além da densidade, a forte variabilidade da madeira pode conduzir a

diferenças significativas nas propriedades de maquinação, como teremos oportunidade de discutir nos capítulos seguintes.

1.3.2 Resina

Segundo Vick (1999), o adesivo deve fazer um contacto molecular com a matriz lenhocelulósica da madeira e penetrar suficientemente para se unir mecanicamente com a estrutura celular da madeira. Devido ao facto da resina representar um custo elevado no fabrico dos aglomerados, as quantidades usadas estão bem abaixo do intervalo de saturação (entre 14 a 17%), embora sejam suficientes para satisfazer os requisitos impostos pelas normas. O ponto de saturação corresponde à quantidade de resina acima da qual mais adição de resina não produz melhorias nas propriedades dos painéis, como por exemplo na resistência interna (RI). Em termos práticos o fabrico dos Aglomerados de Partículas com teores de resina acima dos 14% do ponto de saturação é muito difícil acontecer, devido a aumentar o teor de água e contribuir para eventuais roturas. Em contrapartida, os Aglomerados de Partículas produzidos com níveis muito abaixo do ponto de saturação, resultam numa insuficiente cobertura nas superfícies das partículas, que por sua vez influenciam na resistência interna e na qualidade da maquinação. Saliente-se que o ponto de saturação é tipicamente empírico e dependente da quantidade de resina, e não existe nenhum método conhecido para o calcular (Wong, 2007). Alguns estudos, quer ao nível industrial, quer laboratorial, indicam que a cobertura da resina na partícula pode variar significativamente. Segundo Wong (2007), um painel de aglomerado standard chega a apresentar uma variação na quantidade de resina por partícula acima dos 25% entre os provetes. Este autor verificou os efeitos da variação da distribuição da resina no comportamento da maquinação, e concluiu que a rugosidade da superfície de corte diminuiu com o aumento do teor de resina. Isso não surpreende, uma vez que o aumento da resistência de ligação inter-partículas em relação à resistência individual das partículas reduz a probabilidade de *esmilhamento* ou desagregação das partículas durante a maquinação.

1.3.3 Prensagem

Segundo Gonçalves *et al.* (2020), o teor de água do colchão, a velocidade de fecho da prensa, o tempo e a temperatura de prensagem, são os parâmetros de prensagem que mais significativamente afetam as propriedades dos Aglomerados de Partículas.

a) Humidade do colchão

Para a produção dos painéis são adicionadas significativas quantidades de água, particularmente na CE, facto que tem grande influência no processo de produção e na qualidade dos painéis. Segundo vários autores, a humidade (teor de água) presente nas partículas e no adesivo líquido determina a humidade do colchão. A humidade do colchão é um fator extremamente crítico, não apenas no tempo de prensagem total, mas também no desenvolvimento do gradiente vertical de densidade (Iwakiri, 1989). Convém salientar, que níveis demasiadamente elevados, ou demasiadamente reduzidos de humidade na mistura das partículas provocam problemas operacionais, conduzindo à produção de painéis de baixa qualidade. O controlo da humidade das partículas tem grande importância não só na formação do painel, como também no cálculo da quantidade de resina. Quando a humidade nas camadas superficiais do painel se transforma em vapor através do contacto com os pratos aquecidos da prensa, esta migra para o centro do painel fazendo com que a resina reaja mais facilmente do que se fosse por transferência de calor. Esta situação impõe um ciclo de prensagem muito mais longo, para se conseguir eliminar essa humidade pelas extremidades do painel, e para evitar a sua rotura no momento da libertação da pressão e abertura da prensa. Por outro lado, partículas com humidade elevada causam bolsas de vapor na região central do painel durante a prensagem. Tal efeito prejudica o desenvolvimento de uma resistência adequada no painel, especialmente a coesão perpendicular que se torna muito reduzida. Além disso (e como vimos), as partículas húmidas demais como necessitam de um período de tempo mais longo na prensagem, conduzem a uma redução da capacidade de produção da indústria. Em contrapartida, um colchão com uma humidade excessivamente reduzida, provoca uma baixa transferência de calor da superfície para o centro, resultando numa densidade não uniforme (perfil de densidades ao longo da espessura mais acentuado), além de uma aspereza superficial inaceitável. Além disso, provoca uma inibição do fluxo da resina e transferência, bem como geram uma alta absorção de resina que prejudica o contacto partícula - partícula. Contudo, o principal inconveniente associado a um colchão muito seco está relacionado com a redução da área total de contacto na estrutura do colchão devido à falta de flexibilidade, particularmente nas espécies de madeira mais densas (Gonçalves *et al.*, 2020).

b) Velocidade de fecho da prensa

O tempo de fecho da prensa é o tempo de compressão das partículas desde o contacto dos pratos da prensa com o material, até atingir a espessura desejada.

De acordo com Kelly (1997) e Winistorfer (1999), numa prensagem a quente a transferência de calor e vapor, aliada à velocidade de consolidação e características do colchão de partículas, interagem produzindo um gradiente vertical de densidade nos painéis caracterizado por alta densidade nas camadas superficiais e baixa densidade no centro. Esta diferença de densidade entre as camadas é mais intensa quanto menor o tempo de fecho da prensa.

O gradiente vertical de densidade tem por isso, consideráveis efeitos sobre as propriedades dos painéis. Em geral, melhora as suas propriedades porque uma maior densidade das camadas externas do painel provoca melhoria nas propriedades de resistência à flexão (módulos de rotura e de elasticidade). Porém, um tempo muito longo de fecho faz com que o adesivo nas partículas em contacto com os pratos aquecidos da prensa polimerize antes que um contacto suficiente entre as partículas tenha ocorrido, resultando na redução da adesão do material e causando pré-cura nas camadas superficiais, o que reduz as propriedades de resistência (Gonçalves *et al.*, 2020).

c) Tempo do ciclo de prensagem

Irle *et al.*, (2012), referem que por questões económicas, a prensagem do painel de partículas deve situar-se entre 1 a 5 minutos, mas o adesivo deve possuir um *gel time* (tempo decorrido desde a preparação do adesivo até a sua cura) em média de 20 a 30 minutos, para que não haja uma pré-cura antes ou durante a prensagem. O tempo mínimo de prensagem depende principalmente da eficiência na transferência de calor, da espessura do painel, da temperatura de prensagem e da distribuição da humidade no colchão. A redução no tempo de prensagem dos painéis é desejável, uma vez que contribui para uma maior produção por unidade de tempo, bem como provoca uma redução no consumo de energia. Todavia, o principal efeito do decréscimo no tempo de prensagem é a redução nas propriedades de resistência, que por sua vez têm um impacto direto no desempenho dos painéis, e particularmente na maquinação (ver Capítulo V e VII). A heterogeneidade do material empregue para a produção de partículas, devido sobretudo à obtenção de matérias-primas de diversos fornecedores, aliada à forte variabilidade da madeira, pode ser monitorizada por um sistema informático que poderá promover as alterações necessárias de acordo com os dados obtidos do colchão (Ranita *et al.*, 2005). Assim, será possível determinar o tempo de prensagem ideal para cada colchão, já que a temperatura mínima necessária para efetuar a cura do adesivo (reatividade da resina) poderá ser determinada com mais ou menos exatidão.

Dessa forma, serão evitados tempos insuficientes de prensagem, o que diminui a qualidade dos painéis em razão da cura incompleta do adesivo. Por outro lado, um tempo excessivo de prensagem gera maior consumo de energia e provoca uma redução na capacidade produtiva. Por último, o tempo de prensagem também necessita ser tal que permita evaporar a água existente, para que ocorra perfeita cura do adesivo e não promova a concentração de vapor de água no centro do painel, o que pode conduzir à formação de bolhas ou à “explosão” do painel.

d) Temperatura de prensagem

A principal função da temperatura da prensa na produção de painéis de partículas é a aceleração da polimerização da resina distribuída entre as partículas e a “plasticização” da madeira. A temperatura de prensagem é determinada pelo tipo de adesivo utilizado, e esta deve proporcionar calor necessário para a perfeita evaporação de água, e conseqüentemente a cura mais rápida da resina. O calor é transferido através do colchão por radiação, condução e convecção (movimento de vapor de água). Este último mecanismo de transferência é o mais usual, particularmente nos estágios iniciais do processo de prensagem (Bolton *et al.*, 1989, citado em Irle e Barbu, 2010). Quanto maior a temperatura de prensagem maior será o fluxo de calor, permitindo melhor densificação das camadas mais internas dos painéis. Todavia, apesar de melhorar a resistência interna, diminui a resistência à flexão estática. Também a qualidade da aresta de corte, apresenta maior degradação em aglomerados produzidos a temperaturas de prensagem mais elevadas (Capítulo V). A monitorização da temperatura no interior do colchão de partículas durante a prensagem pode contribuir de forma relevante para a otimização efetiva do processo. Esse método de controlo pode ser feito *on-line*, fornecendo dados individualizados para cada painel em produção.

e) Pressão específica

A principal função da pressão aplicada sobre as partículas é promover a consolidação do colchão na espessura final desejada e assegurar o contacto adequado entre as partículas. Para espécies do género *Pinus* obtêm-se painéis de boa qualidade com uma pressão a variar entre 2.0 a 4.0 MPa, embora esteja sobretudo dependente da densidade final pretendida (Irle e Barbu, 2010; Gonçalves *et al.*, 2020).

f) Razão de compactação

A razão de compactação T_c (razão entre a densidade do painel e a densidade da madeira) para painéis comerciais é sempre superior a um. Isto porque durante a prensagem torna-se necessário comprimir as partículas de forma a produzir boa união com o mínimo de adesivo, e também para reduzir os espaços interiores e as irregularidades da superfície do painel. Para a determinação do cálculo da razão da compactação é usada a seguinte expressão:

$$T_c = \frac{d_{\text{painel}}}{d_{\text{madeira}}} = \frac{t_{\text{colchão}}}{t_{\text{painel}}} \quad (1.1)$$

Sendo:

T_c	: Razão de compactação
$d_{\text{painéis}}$: Massa volúmica do painel (kg/m^3)
d_{madeira}	: Massa volúmica da madeira (kg/m^3)
$t_{\text{colchão}}$: Espessura do colchão (mm)
t_{painel}	: Espessura do painel (mm)

Em geral, todas as propriedades físico-mecânicas dos painéis são afetadas pela razão de compactação (ou taxa de compressão) em maior ou menor grau. De uma maneira sucinta, pode-se afirmar que taxas de compressão muito baixas não produzem bom contacto entre as partículas, o que prejudica a colagem e a resistência do painel. Também afetam a absorção de água por permitir maiores espaços para a sua penetração. Em contrapartida, painéis feitos sob altas taxas de compressão necessitam maior força de prensagem, o que origina problemas em relação à liberação da água evaporada no momento da prensagem, e exigem mais matéria - prima. Além disso, causam a produção de painéis de alta densidade o que, muitas vezes, torna o painel muito pesado.

1.4 Medição das Propriedades dos Aglomerado de Partículas

Apresentam-se em seguida os ensaios normalizados usados para a determinação das propriedades dos Aglomerados de Partículas. Para a série de experiências realizadas neste trabalho, todos os provetes foram cortados a partir das placas de acordo com a norma NP EN 326-1 (2002), que regulamenta a localização e as dimensões dos provetes para os diversos ensaios.

1.4.1 Propriedades Físicas

a) Massa volúmica NP EN 323 (2002)

Para a determinação da massa volúmica de um provete, medem-se as suas dimensões e pesa-se a amostra após condicionamento numa atmosfera com (65 ± 5) % de humidade relativa, e temperatura de (20 ± 2) °C até massa constante. A massa volúmica, ρ , de cada provete (em kg/m^3) é calculada pela expressão:

$$\rho = \frac{m}{b_1 \times b_2 \times t} \times 10^6 \quad (1.2)$$

onde:

m – é a massa do provete, em gramas;

b_1, b_2, t – largura, comprimento e espessura do provete, em milímetros.

A massa volúmica do Aglomerado de Partículas varia normalmente entre 650 e 850 kg/m^3 . De salientar que nos Aglomerados de Partículas existem boas correlações entre a massa volúmica e algumas propriedades físico-mecânicas.

b) Teor de água NP EN 322 (2002)

O teor de água (expresso em percentagem) é determinado por pesagem, sendo obtido pela perda de massa de um provete após secagem em estufa a (103 ± 2) °C até massa constante, em relação à massa do provete seco. Atinge-se a massa constante quando os resultados de duas pesagens sucessivas, obtidas num intervalo de 6 horas, não diferirem mais de 0,1 % da massa do provete. Após secagem, as amostras devem ser arrefecidas num exsiccador antes de se proceder à pesagem.

O cálculo do teor de água (%) é obtido através da seguinte expressão:

$$H = \frac{m_H - m_0}{m_0} \times 100 \quad (1.3)$$

onde:

m_H – é a massa inicial do provete, em gramas;

m_0 – é a massa do provete após secagem, em gramas.

O painel de Aglomerado de Partículas contém normalmente um baixo teor de água, sendo determinado inicialmente pelas condições de fabricação e subsequentemente pelas condições de transporte e armazenagem. As variações de humidade como resultado das condições de exposição, vão afetar sobretudo os topos expostos e as camadas superiores dos painéis armazenados em pilha, mas podem estender-se até ao centro do painel.

c) Inchamento em espessura NP EN 317 (2002)

A determinação do inchamento em espessura é feita pela medição do aumento da espessura do provete após imersão total em água com um pH de 7 ± 1 e uma temperatura de (20 ± 1) °C, durante 24 horas. Para o cálculo do inchamento em espessura de cada provete, G_1 (expresso em percentagem da espessura de origem), recorre-se à seguinte fórmula:

$$G_1 = \frac{(t_2 - t_1)}{t_1} \times 100 \quad (1.4)$$

onde:

t_1 – é a espessura do provete antes da imersão, em milímetros;

t_2 – é a espessura do provete após imersão, em milímetros.

O inchamento em espessura é uma das propriedades mais importantes em termos de estabilidade dimensional dos painéis. Pode ser afetado pela espécie de madeira, geometria das partículas, massa específica dos painéis, quantidade de resina, quantidade de parafina, eficiência da aplicação da resina e condições de prensagem.

1.4.2 Propriedades mecânicas

a) Módulo da elasticidade e resistência à flexão NP EN 310 (2002)

A resistência à flexão interessa sobretudo para os cálculos de aplicações estruturais do Aglomerado de Partículas. O cálculo das deflexões das superfícies sujeitas a cargas, como numa mesa ou prateleira, é realizado a partir da carga aplicada, tendo em conta as dimensões e o módulo de elasticidade do material usado na sua construção. O ensaio preconizado para o cálculo destas propriedades mecânicas, é realizado com um provete de comprimento igual a 20 vezes a sua espessura acrescido de 50 mm, e largura de 50 mm. O dispositivo de flexão é constituído por dois apoios cilíndricos para o provete, e a carga é aplicada no centro (Figura 1.3). A deformação vai sendo medida enquanto a carga aumenta. O módulo de elasticidade E_m

(N/mm²) é calculado usando a região linear do gráfico força/deslocamento; o valor calculado é o módulo aparente, uma vez que o provete fica sujeito a tensões de corte:

$$E_m = \frac{l_1^3(F_2 - F_1)}{4bt^3(a_2 - a_1)} \quad (1.5)$$

onde:

- l_1 - é a distância entre os centros do suporte, em milímetros;
- b - é a largura do provete, em milímetros;
- t - é a espessura do provete, em milímetros;
- $(F_2 - F_1)$ - é o incremento de força na região linear da curva força-deformação, em Newton;
- $(a_2 - a_1)$ - é o incremento de força no centro do provete, correspondente a $F_2 - F_1$, em milímetros.

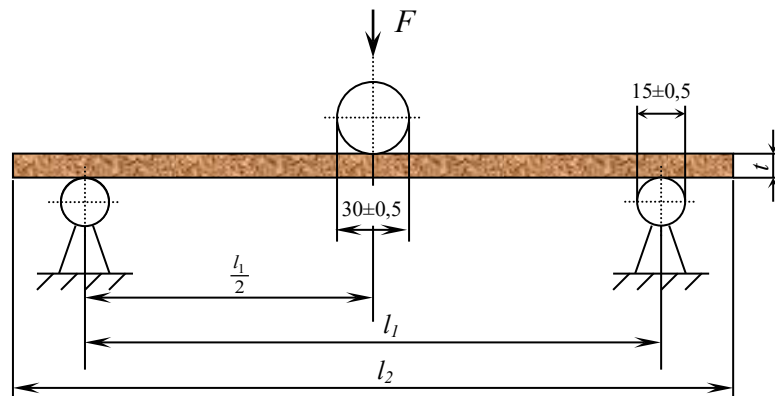


Figura 1.3 – Representação esquemática do dispositivo para o ensaio de flexão em 3 pontos

A resistência à flexão f_m (N/mm²) é calculada através da fórmula seguinte:

$$f_m = \frac{3F_{m\acute{a}x}.l_1}{2bt^2} \quad (1.6)$$

sendo:

- $F_{m\acute{a}x}$ - a carga de rotura, em Newton;
- l_1, b, t - definidos na fórmula anterior, em milímetros.

b) Resistência à tração perpendicular às faces NP EN 319 (2002)

A resistência à tração perpendicular às faces (resistência interna) ou “internal bond”, dá uma indicação sobre a resistência interna do painel à delaminação, sendo um indicador importante para a sua utilização no mobiliário e sobretudo em aplicações que envolvam a

molduração de cantos ou a junção de componentes. Para a determinação da resistência à tração perpendicular às faces, um provete de 50×50 mm é submetido a uma solicitação de tração uniforme até à rotura, numa máquina de ensaios universal. Os suportes de ensaio (metal, madeira de folhosas ou contraplacado de folhosas) devem ser compatíveis com o dispositivo de fixação, sobre o qual os provetes devem ser colados (Figura 1.4). Os fatores principais que afetam esta propriedade são o teor de resina, o teor de humidade inicial, e a temperatura de prensagem. A qualidade da maquinação é fortemente influenciada por esta propriedade (Garrido *et al.*, 2009).

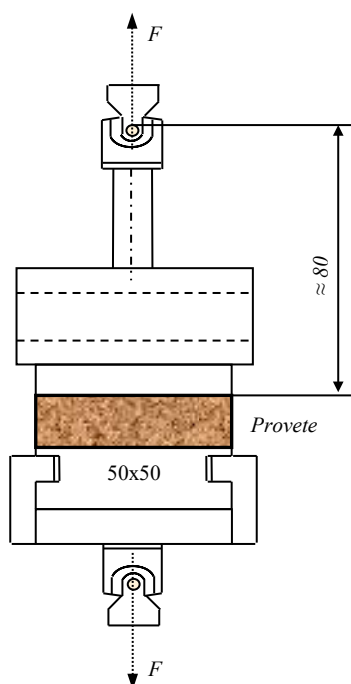


Figura 1.4 – Esquema do dispositivo para determinação da resistência à tração perpendicular

A resistência à tração perpendicular (em N/mm²) é determinada pela relação entre a carga máxima e a superfície do provete, através da seguinte fórmula:

$$f_{t\perp} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{a \times b} \quad (1.7)$$

onde:

$F_{m\acute{a}x}$ – é a carga de rotura, em Newton;

a, b – são o comprimento e largura do provete, em milímetros.

1.4.3 Determinação de formaldeído nos Aglomerados de Partículas

O formaldeído é emitido pelas superfícies não revestidas e pelos topos dos painéis, verificando-se a emissão mais elevada logo após o seu fabrico. A velocidade de emissão aumenta em condições de elevada humidade e temperatura. Esta emissão é reduzida pela aplicação de pinturas, lacas, ou outros materiais de acabamento. A concentração de equilíbrio de formaldeído num local onde existam produtos que o emitam, vai depender da velocidade de emissão e da velocidade da sua remoção por ventilação.

Na Tabela 1.2 apresentam-se os vários métodos para determinação da quantidade de formaldeído contida ou emitida a partir dos Aglomerados de Partículas. A cada método estão associadas condições específicas (Athanasiadou E., Ohlmeyer M., 2009; Carvalho *et al.*, 2012).

Tabela 1.2 - Ensaios para determinação de formaldeído aplicáveis a placas de aglomerados (adaptado de Athanasiadou E., Ohlmeyer M., 2009)

Método de teste	Norma	Condições do teste
Câmara	EN 717-1 ASTM E 1333-96, ASTM D 6007 JIS A 1901, JIS A 1911 ISO 12460-1, ISO 12460-2	Simula condições reais de ar interior residencial (temperatura, pressão, circulação de ar, fator de carga)
Análise de gás	NP EN ISO 12460-3 ISO 12460-3	Condições que aceleram as emissões (temperatura e taxa de circulação do ar elevadas)
Frasco	EN 717-3, método AWWA	Humidade relativa elevada na ausência de circulação de ar
Exsicador	ASTM D 5582 JIS A 1460, JAS MAFF 235, JAS 233 ISO 12460-4	Humidade relativa elevada na ausência de circulação de ar
Extração	NP EN ISO 12460-5	Extração do formaldeído contido na amostra, com tolueno

Um dos métodos mais usados para determinar o teor de formaldeído extraído do Aglomerado de Partículas (ou de outros derivados da madeira), é o método do perforador (NP EN ISO 12460-5), sendo bem aceite em toda a Europa. Este método é realizado num aparelho denominado com o mesmo nome, e consiste na extração do formaldeído de pequenos provetes de Aglomerado de Partículas pelo tolueno em ebulição, que depois é transferido para água destilada (Figura 1.5). A grande desvantagem deste método reside no impacto ambiental por via do uso do tolueno nas experiências.

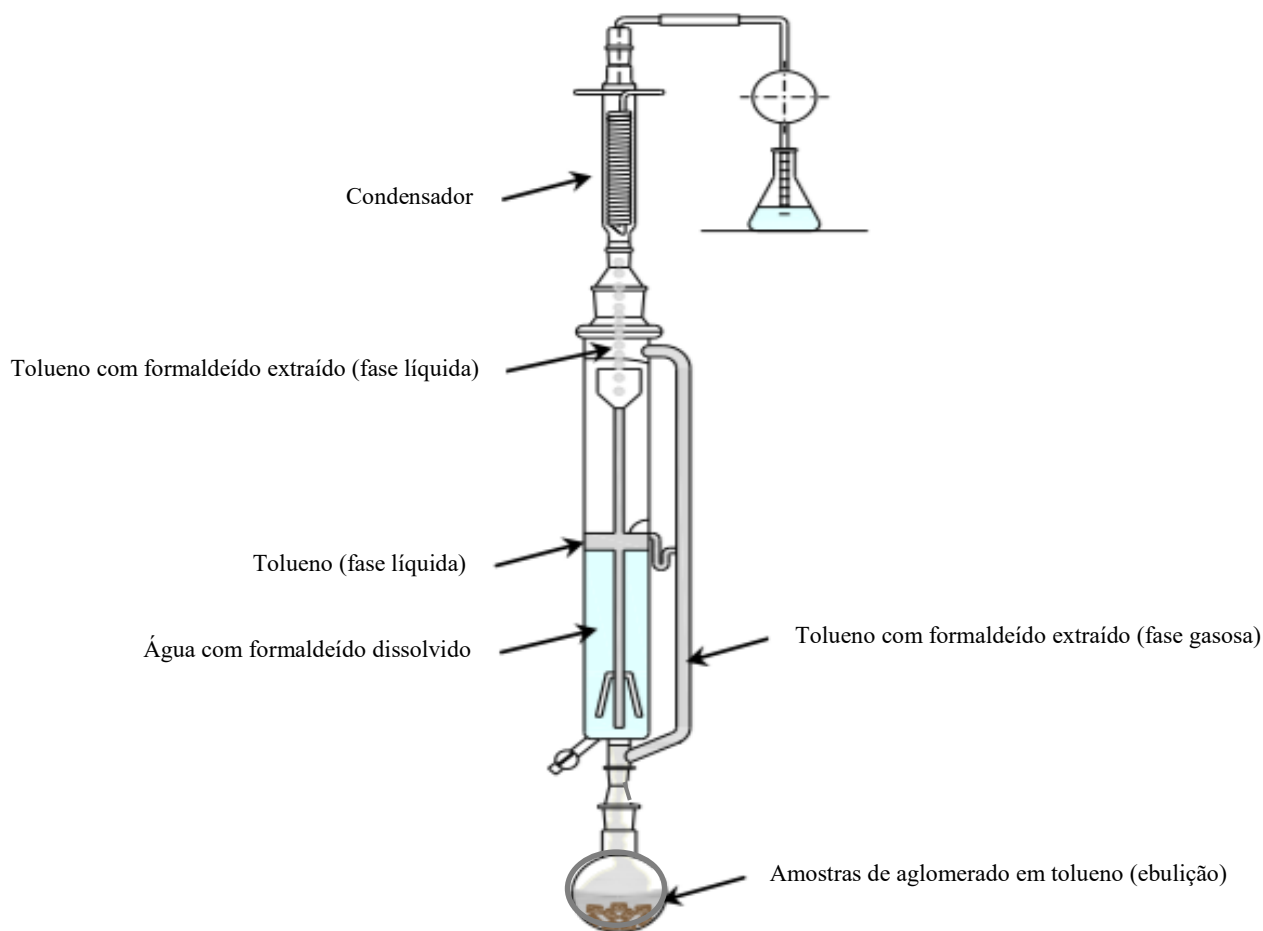


Figura 1.5 – Ilustração do método do perfurador para medição do teor de formaldeído (adaptado de Salthammer *et al.*, 2010)

1.4.4 Propriedades de durabilidade

Não existem ainda normas específicas para avaliar a durabilidade aos agentes biológicos dos derivados da madeira. Todavia, a norma NP EN 335-1 (2018) regulamenta as classes de risco para a madeira maciça e derivados da madeira. Já a EN 335-3 (1995) descreve, especificamente para os derivados da madeira, as classes de risco que correspondem às diferentes situações em serviço, às quais os derivados (contraplacados, Aglomerados de Partículas, OSB e Aglomerados de Partículas com cimento) podem estar expostos. Esta parte da norma indica também os agentes biológicos que podem atacar nessas condições.

Uma descuidada maquinação muitas vezes traduzida numa reduzida qualidade da aresta, pode promover a entrada de agentes biológicos. Esta situação é especialmente preocupante em aglomerados instalados em ambientes húmidos.

1.5 Referências bibliográficas

Athanassiadou E., Ohlmeyer M., (2009): “Emissions of Formaldehyde and VOC from Wood-based Panels”, London.

Bodig, J. and Jayne, B.A., (1982), “Mechanics of Wood and Wood Composites”, Van Nostrand-Reinhold, New York, USA.

Carvalho, L.H., Martins, J.M.S., Costa, C.A.V., (2010), “Transport Phenomena. In Wood Based Panels: An Introduction for Specialists”. Thoemen, H., Irle, M., Sernek, M. (eds.), London: Brunel University Press, 2010.

Carvalho, L., Magalhães, F., Ferra, J., (2012), “Formaldehyde Emissions from Wood-Based Panels - Testing Methods and Industrial Perspectives”, in Chemistry, Applications and Role in Polymerization, edited by Chan Bao Cheng and Feng Hu Ln, Nova Science Publishers, Inc., Hauppauge, NY (ISBN 978-1-62257-228-1).

Diyamandoglu, V., Fortuna, LM., (2015), “Deconstruction of wood-framed houses: material recovery and environmental impact”. *Resour Conserv Recycl* 100:21–30.

EN 309: 2005: “Particleboards - Definition and classification”. Brussels: CEN Comité Européen de Normalisation.

EN 312: 2010: “Particleboards-Specifications”. Brussels: CEN Comité Européen de Normalisation.

EN 335-3: 1995: “Durability of wood and wood-based products - definition of hazard classes of biological attack - part 3: application to wood-based panels”. Brussels: CEN Comité Européen de Normalisation.

EN 717-1: 2004: “Wood-based panels – Determination of formaldehyde release. Part 1: Formaldehyde emission by the chamber method”. Brussels: CEN Comité Européen de Normalisation.

EN 717-3 (1996): “Wood-based panels – Determination of formaldehyde release. Part 3: Formaldehyde emission by the flask method”. Brussels: CEN Comité Européen de Normalisation.

EOHP (2021): “Encyclopaedia of Occupational Health & Safety”, accessed online on September 1st 2021, web page: <https://www.iloencyclopaedia.org/contents/part-i-47946/cancer>

EPF European Panel Federation (2019): “Annual Report 2018-2019”.

Fink, J.K., (2005), “Reactive Polymers Fundamentals and Applications. A Concise Guide to Industrial Polymers”. Norwich, NY 13815: William Andrew Publishing. ISBN 0-8155-1515-4.

Garrido N., Martins J., Carvalho L.H., Mendes J.G., Costa C., (2009): “Effect of recycled wood on particleboard machining”, Workshop Proceedings of COST E49 “Adding Value through Physical Functionality”, Edited by Prof. Dr. M.Hakkı ALMA and Prof. Dr. Hulya Kalaycioglu, pp. 86-99, Istanbul, Turkey, 28-29 April 2009.

Gonçalves Carolina, J. Pereira, N. T. Paiva, J. M. Ferra, J. Martins, F. D. Magalhães, A. Barros-Timmons, L. Carvalho, (2020): “A study of the influence of press parameters on particleboards’ performance”, European Journal of Wood and Wood Products, © Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2020. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01507-y>

Gonçalves Carolina, Nádia T. Paiva, João M. Ferra, Jorge Martins, Fernão Magalhães, Ana Barros-Timmons and Luísa Carvalho, (2018): “Utilization and characterization of amino resins for the production of wood-based panels with emphasis on particleboards (PB) and medium density fibreboards (MDF). A review”. De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/hf-2017-0182>

Iwakiri, S. A., (1989): “Influência de variáveis de processamento sobre propriedades de chapas de partículas de diferentes espécies de *Pinus*”. Curitiba: 129f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 1989.

Iwakiri, S., (2005), “Painéis de madeira reconstituída”. Curitiba: FUPEF, 247p.

Iwakiri S., Stingen A., Silveira E., Zamarian E., Prata J., Bronoski M., (2008): “Influência da massa específica sobre as propriedades mecânicas de painéis aglomerados”, Curitiba, Floresta, PR, v. 38, n. 3, jul./set.

Irle, M., Maher, K., Fru, C., Sawyer, G., (2004): “An Investigation of the Metal Contaminants in Particleboards made from Recycled Wood”. In: Proceedings of the Eighth European Panel Products Symposium. Llandudno, Wales.

Irle M., Barbu M. C., (2010): “Chapter 1 - Wood-Based Panel Technology”. In: Wood-Based Panels - An Introduction for Specialists. Published by Brunel University Press, London, UB8 3PH. England, supported by COST. ISBN 978-1-902316-82-6.

Irle, M. A.; Barbu, M. C.; Reh, R.; Bergland, L.; Rowell, R. M., (2012): “Wood Composites”. In: Rowell, R. M. Handbook of wood chemistry and wood composites. Boca Raton: CRC Press, Cap. 10.

Jorge, F.C., (2008): “Recent Advances on Lignocellulosic-Based Composites for Performance and Environmentally-Compatibility Improvement”. *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 484(1): 51-70.

Maloney, T. M., (1993): “Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing”, 2nd. ed. San Francisco, M. Freeman, 1993.

Maloney, T. M., (1996): “The family of wood composite materials”. *Forest Products Journal*, v. 46, n. 2.

Martinka Jozef, George I. Mantanis, Charalampos Lykidis, Petar Antov & Peter Rantuch (2021): “The effect of partial substitution of polyphosphates by aluminium hydroxide and borates on the technological and fire properties of medium density fibreboard”, *Wood Material Science & Engineering*, DOI: 10.1080/17480272.2021.1933175

NP EN 310: 2002: “Placas de derivados de madeira – Determinação do módulo de elasticidade em flexão e da resistência à flexão”. Instituto Português da Qualidade, Comissão Técnica CT-14.

NP EN 317: 2002: “Aglomerado de Partículas e aglomerado de fibras – Determinação do inchamento em espessura após imersão em água”. Instituto Português da Qualidade, Comissão Técnica CT-14.

NP EN 335: 2018: “Durabilidade da madeira e de produtos derivados de madeira - Classes de risco: definições, aplicação à madeira maciça e a produtos derivados de madeira”. Instituto Português da Qualidade, Comissão Técnica CT-14.

NP EN 319: 2002: “Aglomerado de Partículas e aglomerado de fibras – Determinação da resistência à tração perpendicular às faces da placa”. Instituto Português da Qualidade, Comissão Técnica CT-14.

NP EN 322: 2002: “Placas de derivados de madeira – Determinação do teor de água”. Instituto Português da Qualidade, Comissão Técnica CT-14.

NP EN 323: 2002: “Placas de derivados de madeira – Determinação da massa volúmica”. Instituto Português da Qualidade, Comissão Técnica CT-14.

NP EN 326-1: 2002: “Placas de derivados de madeira; Amostragem, corte e inspeção; Parte 1: Amostragem e corte dos provetes e expressão dos resultados dos ensaios”. Instituto Português da Qualidade, Comissão Técnica CT-14.

NP EN ISO 12460-3: 2018: “Placas de derivados de madeira; Determinação da emissão de formaldeído; Parte 3: Método de análise do gás”. Instituto Português da Qualidade, Comissão Técnica CT-14.

NP EN ISO 12460-5: 2017: “Placas de derivados de madeira; Determinação do teor de formaldeído; Parte 5: Método de extração (dito método do perforador)”. Instituto Português da Qualidade, Comissão Técnica CT-14.

Kelly M.W., (1997): “Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard”. General Technical Report FPL-10, U.S.

Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI., USA., pp: 65.

Pizzi, A.; Mittal, K. L., (1994): “Handbook of Adhesive Technology”, Marcel Dekker, Chapter 19, p. 347-358.

Ranita, J.; Martins, J.; Garrido, N.; Carvalho, L.H.; Costa, C., (2005): “Influência do ciclo de prensagem na qualidade do aglomerado de partículas de madeira fabricado com teor elevado de partículas recicladas”. In Proceedings of the Anais de Congresso Floresta Nacional-A Floresta e as Gentes, Viseu, Portugal.

Ressel, J., (2008): “Adhesive application”. Presentation during the 3rd International Wood Academy, University of Hamburg.

Ressel, J., (2013a): “Particle generation and screening”. In: Proceedings of Wood Based Panels: Processes, Properties, Uses. Hamburg: University of Hamburg, Department of Wood Science.

Ressel, J., (2013b): “Particle Drying”. In: Proceedings of Wood Based Panels: Processes, Properties, Uses. Hamburg: University of Hamburg, Department of Wood Science.

Ressel, J., (2013c): “Adhesive Application”. In: Proceedings of Wood Based Panels: Processes, Properties, Uses. Hamburg: University of Hamburg, Department of Wood Science.

Ressel, J., (2013d): “Mat formation”. In: Proceedings of Wood Based Panels: Processes, Properties, Uses. Hamburg: University of Hamburg, Department of Wood Science.

Salthammer, T., Mentese, S., Marutzky, R., (2010): “Formaldehyde in the Indoor Environment”. Chemical Reviews 110 (4): 2536-2572.

Santos, J., (2010): “Estudo e Modelação do Processo de Fabrico de Placas de Madeira Revestidas com Folha de Madeira Natural”. Dissertação de Mestrado em Análise de Dados e Sistemas de Apoio à Decisão, Faculdade de Economia da Universidade do Porto.

Thoemen, H., (2013): “Simulation of the hot-pressing process”. In Proceedings of Wood Based Panels: Processes, Properties, Uses. Hamburg: University of Hamburg, Department of Wood Science.

Vansteen., K., R., (1981): “Surface treatment of wood based panels”, Seminar on wood based panels and furniture industries, Beijing, China.

Vefago, L., Avellaneda, J., (2013): “Recycling concepts and the index of recyclability for building materials”. *Resour Conserv Recycl* 72:127–135.

Winistorfer P.M., Wang S., (1999): “Densification of wood composite mats during pressing: Implications of mat structures and pressing schedules on density profile formation and panel properties”. In Proceedings: Fourth International Conference on the Development of Wood Science, Technology, and Forestry. Missenden Abbey, England, July 14 – 16, 1999.

Wong D., (2007): “Particleboard simulation model to improve machined surface quality”, PhD Thesis, University of British Columbia, Canada, 2007.

Vick C. B., (1999): “Adhesive bonding of wood materials”. In: United State Forest Products Laboratory – USDA Forest Service. Wood handbook: wood as an engineering material. Madison: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Youngquist J. A., (1999): “Wood-based composites and panel products”. In: Wood Handbook – Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR- 113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Zhao, L., Liu, Y., Xu, Z., Zhang, Y., Zhao, F., Zhang, S., (2011): “State of research and trends in development of wood adhesives”. *Forestry Studies in China* 13 (4): 321-326.

CAPÍTULO II

MAQUINAÇÃO DOS AGLOMERADOS DE PARTÍCULAS

Revisão da literatura

Introdução

A maquinação dos Aglomerados de Partículas tem a peculiaridade de ser um processo essencialmente prático, que envolve um elevado número de variáveis que interagem entre si. Partindo do princípio que é praticamente impossível prever o seu desempenho durante corte, a investigação detalhada da influência de diversos fatores tem contribuído para um melhor entendimento dos processos de maquinação.

Por estas razões, o interesse pelos fenómenos envolvidos na maquinação dos derivados de madeira, conduziu nas últimas décadas a uma intensa investigação. A maioria destes trabalhos centrou-se na qualidade da aresta maquinada de aglomerados revestidos a papel melamínico, determinada a partir da análise de parâmetros operatórios associados ao processo e à ferramenta, tais como: velocidade de corte, avanço por dente, consumo energético, geometria da ferramenta e desgaste. Outros trabalhos consagraram-se ao estudo da influência das características dos painéis (estrutura, composição, perfil de densidades) na mecânica do corte. Mais recentemente a tendência da investigação centra-se na necessidade de monitorizar e otimizar o processo de maquinação. Daqui resultaram novas vias de investigação que se baseiam em sistemas acústicos e óticos, que sugerem ser adequados para aquisição de informação válida durante a operação de corte.

O objetivo deste capítulo é apresentar uma revisão sumária dos principais trabalhos que foram publicados no âmbito da maquinação dos Aglomerados Partículas, com especial ênfase para aqueles que se dedicaram à caracterização da qualidade do perfil da aresta maquinada.

2.1 Fatores que influenciam a maquinação dos Aglomerados de Partículas

2.1.1 Influência dos parâmetros operatórios e da ferramenta

Pahlitzsch e Jostmeier (1964) foram os primeiros investigadores a medir as forças de corte e a potência consumida na fresagem de Aglomerados de Partículas. Estas medições foram feitas variando condições de corte, e conduziram ao desenvolvimento de métodos para aumentar a velocidade do processo de maquinação. A qualidade da aresta não era um aspeto importante na altura em que este estudo foi realizado, uma vez que os Aglomerados de Partículas foram primeiramente usados em revestimentos de paredes e em apainelados para pavimentos, nos quais a aresta ficava oculta. Porém, a qualidade da superfície dos

aglomerados começou a ser um fator chave para a limitação do seu uso, principalmente em aplicações de maior valor acrescentado como móveis e roupeiros (Wong, 2007).

Tröger e Läuter (1983) propuseram o uso da equação de Kienzle (1952), originalmente desenvolvida para o corte de metais, para estimar a força total de corte F_c (N) na maquinação dos Aglomerados de Partículas:

$$F_c = k_c \times A \quad (2.1)$$

Onde, k_c é a força específica de corte (N/mm^2), e A ($b \times h$) a área da secção da apara expressa em mm^2 , sendo b e h , respectivamente, a largura e a espessura da apara.

A força específica de corte (k_c) é estimada a partir de medições empíricas da potência de corte em relação a condições específicas de corte, e a espessura da apara h é calculada através da análise geométrica do modo de corte periférico em fresagem.

No modelo da força da equação de Kienzle, são introduzidos os coeficientes característicos ($k_{c1.1}$ e $1-m_c$), determinados por meio da representação gráfica linearizada da variação da relação F_c/b em função de h em escala bi-logarítmica (Figura 2.1, Equações 2.2 e 2.3).

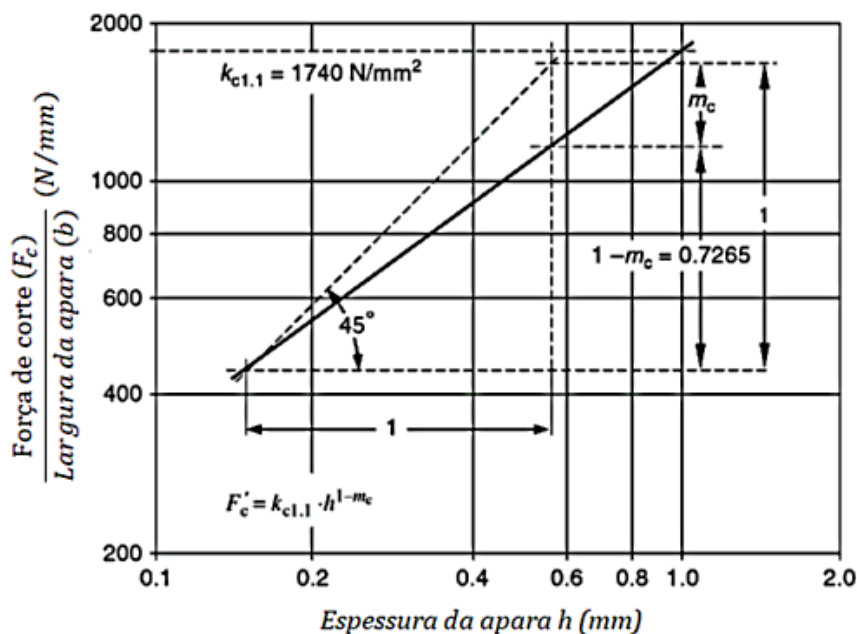


Figura 2.1 - Determinação gráfica dos valores característicos $k_{c1.1}$ e $1-m_c$ adaptado de Kienzle (1952)

A equação linear da reta correspondente à Figura 2.1, é expressa no formato seguinte:

$$\log (F_c/b) = \log (k_{c1.1}) + (1-m_c) \times \log (h) \quad (2.2)$$

Partindo da expressão (2.2), a fórmula de Kienzle pode ser reescrita então, na seguinte forma:

$$F_c = k_{c1.1} \times b \times h^{(1-m_c)} \quad (2.3)$$

Da expressão anterior, resulta que a partir das constantes $k_{c1.1}$ e $(1-m_c)$ é possível estabelecer a força total de corte (F_c), através da formação de uma apara de espessura teórica h . Define-se $k_{c1.1}$ como sendo a força específica de corte (k_c), requerida para uma apara de área unitária ($b \times h = 1 \times 1 \text{ mm}^2$).

Através da aplicação do modelo da força expresso na Equação 2.3, Tröger e Läuter (1983) observaram que a força específica de corte (k_c) varia linearmente com a espessura da apara (h) dentro de um pequeno intervalo de parâmetros de corte, mas não é linear num intervalo de maior dimensão. Verificaram ainda, que tal como as forças de corte, também a potência requerida aumenta com o desgaste da ferramenta e com a velocidade de corte. Anos mais tarde, Ettelt (1987) propôs para os Aglomerados de Partículas, uma única constante (k_{c05}) para ser usada na equação de Kienzle.

Saljé (1984) investigou a influência de alguns parâmetros operatórios e da ferramenta na maquinação de aglomerados revestidos a papel melamínico. Este autor verificou que a qualidade da aresta e os custos da produção são afetados pela velocidade de corte. Também reconheceu que a durabilidade da ferramenta (que é igualmente afetada pela velocidade de corte), tem um efeito significativo nos custos de produção (citado em Wong, 2007). No seguimento deste trabalho, Saljé e Drückhammer (1984) desenvolveram um método para avaliar a qualidade da aresta tendo por base o desgaste da ferramenta. Verificaram que o desgaste da ferramenta aumenta e a qualidade da aresta diminui quanto maior for a distância maquinada. Em relação ao avanço por dente (f_z), foi verificado que uma variação em f_z provoca grande influência na qualidade da aresta. Por outro lado, verificaram que a qualidade da aresta é fortemente afetada pelo desgaste da ferramenta. Porém, a relação entre o avanço por dente, o desgaste da ferramenta e a qualidade da aresta foi descrita como sendo não linear. Deste estudo resultou ainda a conceção de um equipamento capaz de medir a dimensão do dano e consequentemente quantificar a qualidade da aresta nos Aglomerados de Partículas. Em trabalho de investigação posterior, Saljé *et al.*, (1985) identificaram que o avanço por

dente tinha um efeito mais significativo no dano da aresta do que a velocidade de corte e a profundidade de corte. Também constataram que o desgaste da ferramenta e a potência requerida tendem a aumentar até um limite de velocidade de corte de 60 m/s, valor a partir do qual estes parâmetros decrescem (Wong, 2007).

O modo de como os parâmetros do processo de maquinação poderiam ser ajustados para resolver problemas na qualidade da maquinação dos aglomerados, foi também examinado por Licher (1991). Este investigador estabeleceu algumas relações empíricas para o dano da aresta maquinada, avanço por dente e distância de corte. Concluiu que estas relações podiam ser usadas no aumento do avanço por dente, com o objetivo de compensar o desgaste da ferramenta, particularmente quando o avanço por dente se encontra abaixo do seu valor ótimo (Wong, 2007).

Riegel (1995) investigou a influência de aspetos físico-mecânicos da ferramenta no dano da aresta de aglomerados revestidos a laminado de baixa pressão (papel melamínico). Este autor verificou que as irregularidades na aresta eram causadas por tensões produzidas pela ferramenta, e sustentou que a força de fricção desune o laminado provocando desagregamento entre o revestimento de papel melamínico e o substrato. Concluiu também, que as tensões de corte entre as camadas criam tensões de tração, fendas e delaminação. A nível microscópico foram identificadas delaminações no revestimento de papel melamínico dos painéis. Este autor atesta ainda, que o dano provocado na aresta dos painéis se estende para o interior do aglomerado.

No trabalho de Boucher *et al.* (2004) foram investigados os efeitos do ângulo da inclinação da aresta da ferramenta (λ) nas forças de corte e no desgaste da ferramenta, num processo de fresagem de MDF e Aglomerados de Partículas. Estes autores apontam que a vida útil de uma ferramenta de fresagem, dentro das características estudadas e dos parâmetros analisados, é cerca de 10 km. Os resultados forneceram importantes informações sobre as forças de corte e sobre o dano no revestimento melamínico. Todavia, foram apenas informações fenomenológicas, e as propriedades do aglomerado e dos materiais constituintes da ferramenta não foram tomados em consideração. Na Figura 2.2 está ilustrado o modelo geométrico adotado por estes autores para este trabalho, onde se pode identificar o ângulo de inclinação da aresta da ferramenta (λ) estudado.

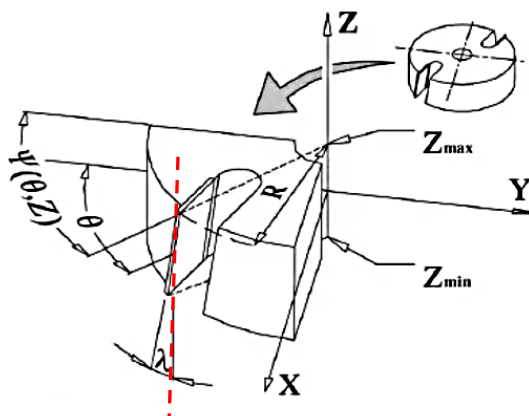


Figura 2.2 – Modelo geométrico da ferramenta adotado em Boucher *et al.* (2004)

Sinn *et al.* (2006) estudaram o efeito da velocidade na fresagem de MDF e de Aglomerados de Partículas. Foi usada uma ferramenta com 125 mm de diâmetro, foram selecionadas velocidades de corte compreendidas entre 9 a 31 m/s, e imposto um valor constante para o avanço por dente de 2.1 mm. Estes investigadores concluíram que a força máxima de avanço diminui ligeiramente com a velocidade, e em contrapartida a força normal aumenta. Estes resultados estão em concordância com os obtidos por Kivimaa (1952) e McKenzie (1960) aplicados à madeira maciça.

Em Kowaluk *et al.* (2006) foi analisada a influência da velocidade de corte sobre as forças de corte e trabalho específico de corte, na fresagem de painéis de partículas laminados. Em relação ao trabalho específico de corte, os componentes *trabalho específico de criação de nova superfície* e *trabalho específico de deformação da avara*, foram identicamente alvo de análise. Esta investigação é a primeira tentativa conhecida na literatura de estudar a distribuição do trabalho específico de corte usando uma fresadora industrial equipada com um suporte de pesquisa. Estes investigadores confirmaram que com o aumento da velocidade de corte as forças diminuem. Também o trabalho específico de corte, e um de seus componentes, o *trabalho específico de formação da avara*, diminui com o aumento da velocidade de corte. Porém, o *trabalho específico na criação de uma nova superfície* aumenta à medida que a velocidade de corte também aumenta. Estes autores referenciam que esta situação é o resultado de uma maior resistência à fratura em relação as condições de corte, e também devido ao elevado atrito. Na sequência deste trabalho, Kowaluk (2007) demonstrou que a teoria da distribuição do trabalho específico de corte pode ser aplicada à fresagem. Conclui que o trabalho de corte, o trabalho na criação de uma nova superfície e o trabalho de deformação da avara, baseada na medição das forças no corte circular, são mais realísticos e

precisos. No entanto, é complexa a medição das forças de corte em equipamentos com velocidades de corte semelhantes às usadas na indústria, sendo necessários equipamentos mais sofisticados para a sua medição.

Em Palubicki *et al.* (2007), foram investigadas alterações na qualidade da aresta de aglomerados laminados num processo de corte com serra de disco. A ênfase foi dada à influência do desgaste da ferramenta na qualidade da aresta maquinada. Estes autores verificaram que era evidente que o desgaste progressivo dos dentes diminuía a qualidade da aresta dos painéis de partículas laminados, no entanto, aludiram que mais indicadores eram necessários para melhor caracterizar a qualidade de aresta. Neste âmbito, apresentaram três indicadores diferentes para a qualidade da aresta, baseados no *comprimento máximo do dano de corte*, na *área relativa* e na *área ponderada da zona “lascada” da aresta*. Concluíram que, especialmente a área de *lascagem ponderada* era o indicador de qualidade da aresta mais promissor, uma vez que é sensível ao desgaste progressivo dos dentes ao longo de todo o comprimento do corte e às características geométricas do dano na aresta maquinada.

Szwajka (2014), analisou a delaminação na furação de Aglomerados de Partículas, e verificou que o dano é significativamente influenciado pelos parâmetros de maquinação. Constatou que a força axial desenvolvida durante a furação desempenha um papel importante na minimização da tendência de delaminação, e conseqüentemente na caracterização da qualidade da superfície. Neste estudo foram realizados dezoito ensaios de durabilidade das ferramentas para os diferentes valores dos parâmetros de corte analisados. Com base nos resultados obtidos, Szwajka propôs alguns modelos matemáticos a partir da análise de variância, que possibilitam estimar o valor das forças de corte. Em estudo posterior, Szwajka e Trzepieciński (2017), investigaram a influência dos parâmetros básicos de maquinação (velocidade de corte e velocidade de avanço) e desgaste da ferramenta, na delaminação de aglomerados revestidos a melamina. Nesse trabalho, a maquinação dos provetes foi realizada com recurso a um equipamento de fresagem. Para determinarem a durabilidade da ferramenta de corte, estes autores adotaram um critério geométrico, que denominaram de desgaste máximo do gume da ferramenta VB_{max} . Concluíram que o aumento no valor da componente da força de corte não foi proporcional ao aumento do desgaste do VB_{max} , e que o maior aumento da amplitude do sinal, associada ao aumento do desgaste da ferramenta, foi observado na componente F_x da força de corte. Concluíram ainda, que existia uma clara relação entre a velocidade de corte e a vida útil da ferramenta em função do comprimento de corte, e que uma diminuição da velocidade de corte e um aumento de VB_{max} , conduzem a um aumento do

valor do fator de delaminação A_{del} . Em relação ao avanço por dente f_z , não foi identificado um efeito claro desse parâmetro sobre a intensificação do fenômeno de *delaminação*.

Mais recentemente, Chladil *et al.* (2019) investigaram a influência das condições de corte e do desgaste da ferramenta na maquinação de derivados de madeira. O trabalho experimental foi focado no monitoramento das mudanças do gume da ferramenta de corte (T) e na influência da velocidade de corte (Vc) no seu desgaste. Os ensaios de maquinação foram realizados durante um processo de fresagem a velocidades de corte situadas na faixa de 7,95 a 17,9 m/s (477 a 1074 m/min), profundidade de corte de 9,5 mm, e a um avanço por dente de 0,05 mm/rotação. Estes autores concluíram que o curso do desgaste de materiais à base de madeira exibiu similaridades (em termos de representação gráfica) com o corte de materiais abrasivos. Concluíram também, que a dependência $T=fn(Vc)$ na maquinação do painel de partículas laminado pode ser usada para selecionar a velocidade de corte adequada para uma dada vida útil da ferramenta. Sugeriram então, que esta equação podia ser usada para o cálculo da relação entre a velocidade de corte e a vida útil da ferramenta, tendo em conta as exigências da produção *versus* qualidade.

2.1.2 Influência da estrutura e composição dos aglomerados

Os estudos anteriores aplicados à maquinação dos Aglomerados de Partículas, mostraram que a qualidade é afetada não só pelos parâmetros operatórios relativos ao processo de corte, mas também pelas características intrínsecas da ferramenta. Porém, nos trabalhos iniciais os investigadores basearam-se no princípio de que as propriedades dos Aglomerados de Partículas eram uniformes. Este aspeto revelou-se um problema particularmente crítico, uma vez que a estrutura, composição e propriedades dos aglomerados comerciais (quer ao nível micro, quer macro), são fortemente variáveis. Por essa razão, alguns estudos focaram o exame em detalhe do substrato e composição dos Aglomerados de Partículas, com o objetivo de perceberem a sua influência na resistência à fratura durante o processo de maquinação, no desgaste da ferramenta e na qualidade da superfície maquinada.

Ilcewicz e Wilson (1981) verificaram que a resistência à fratura durante a maquinação dos aglomerados é afetada pela quantidade de resina e pelo comprimento e espessura das partículas. Concluíram que esta aumenta linearmente com a raiz quadrada da espessura das partículas para baixos teores de resina (5%), e para elevados teores de resina (11,4%), o

coeficiente de regressão linear é baixo. Os resultados de Ilcewicz e Wilson (1981) mostram que a resistência à fratura do painel de partículas pode ser prevista pelas equações seguintes:

$$k_{1c} = \sigma_{1B} \sqrt{a_0 Y(a_0/w)}, \quad (2.4)$$

$$\sigma_{1B}^2 a_0 = \frac{\lambda}{2k^2} \sigma_c^2, \quad (2.5)$$

onde k_{1c} é a resistência à fratura no Modo I (psi/in²), σ_{1B} a força interna (psi), a_0 o tamanho intrínseco da fenda (in), $Y(a_0/w)$ o fator geométrico da resistência à fratura, w a largura do provete (in), λ a dimensão característica do material (espessura das partículas em in), σ_c a força intrínseca (psi) e k o fator de concentração de tensões igual a 0,73.

Com base nas equações anteriores, Ilcewicz e Wilson (1981) constataram que as partículas longas aumentam a propagação das fendas e reduzem a resistência à fratura. Estes autores sugeriram que esta situação se devia à fraca adesão entre as partículas no momento da prensagem. Por outro lado, verificaram uma elevada resistência à fratura quando as partículas de madeira são mais uniformes e sem danificações, ou seja, quando o adesivo é uniforme na espessura, e com um rácio óptimo madeira/adesivo. Porém, estas observações revelam-se complexas, uma vez que os painéis comerciais são tipicamente variáveis quer ao nível da resina, quer ao nível da espessura e comprimento das partículas.

Outros estudos examinaram os efeitos da estrutura, composição e propriedades dos Aglomerados de Partículas na qualidade da aresta e no desgaste da ferramenta (Boehme e Münz, 1984 e 1987). Estes autores verificaram que o dano na aresta aumenta com a distância maquinada em resultado do desgaste da ferramenta e da alteração na geometria do gume da ferramenta de corte. O tamanho e a quantidade de sílica presente nos aglomerados, foi considerado como o fator que mais influencia o desgaste da ferramenta. Verificaram que quanto maior for o teor de sílica e o seu tamanho, maior é o desgaste da ferramenta. Observaram ainda, que a densidade dos Aglomerados de Partículas tem um efeito significativo no desgaste da ferramenta. Daqui concluíram que o desgaste da ferramenta é maior na maquinação das camadas externas de maior densidade, e menor na camada interna de menor densidade.

Porankiewicz (1997a) examinou os efeitos da composição dos Aglomerados de Partículas no desgaste de ferramentas de carboneto durante a operação de fresagem. Seis tipos de Aglomerados de Partículas revestidos com papel decorativo impregnado com resinas melamínicas, e sem revestimento, e oito tipos de carbonetos foram testados neste estudo. Foi

efetuada uma análise de correlação bidimensional para determinar o efeito sobre a composição do aglomerado e os materiais de revestimento da ferramenta no desgaste da ferramenta. Porankiewicz verificou que existiam elevados coeficientes de correlação entre o desgaste da ferramenta e o índice de presença de minerais no Aglomerado de Partículas (0.84), e entre o desgaste e o tamanho médio das partículas minerais (0.73).

Nos trabalhos de Bouzakis *et al.* (1998, 1999, 2000) foi investigada a influência da composição dos painéis de Aglomerados de Partículas nas forças de corte num processo de fresagem. Estes autores verificaram que o diagrama das forças distribuídas de corte em relação às camadas do Aglomerado de Partículas apresentava valores significativamente maiores nas regiões de maior densidade, ou seja, nas camadas externas. Estes resultados mostraram concordância com as conclusões apresentadas nos trabalhos de Boehme e Münz publicados em 1984 e 1987.

Porankiewicz e Tanaka (2001), examinaram a qualidade da aresta de aglomerados revestidos a melamina produzida no modo de corte periférico. Estes investigadores estabeleceram múltiplas correlações entre propriedades do aglomerado, parâmetros de corte, desgaste e características da ferramenta na qualidade resultante da aresta maquinada.

Num trabalho elaborado por Wang (2000), o corte dos Aglomerados de Partículas é examinado como se tratando de uma “extensão” do corte da madeira maciça. Este autor sugeriu que um novo modo de formação da aparta fosse acrescentado aos modos típicos de formação da aparta, propostos por Franz (1958) e McKenzie (1960) para a madeira maciça. Este autor sugeriu ainda que a maquinação dos Aglomerados de Partículas fosse uma sucessão de comportamentos dependentes de cada partícula. A orientação e o tamanho de cada partícula afetam o modo de formação da aparta, e múltiplos modos de corte poderão ocorrer na mesma partícula. Constatou que estes fatores localizados causavam uma forte flutuação nas forças de corte durante a maquinação dos aglomerados. Porém, neste estudo não foi examinada em que medida as características dos Aglomerados de Partículas têm influência nos quatro modos de corte. Wang (2000) desenvolveu também um modelo por elementos finitos, anteriormente aplicado à maquinação de madeira maciça e também proposto para outros materiais anisotrópicos. Este modelo usa a combinação de um modelo de material ortotrópico elasto-plástico com um critério de separação da aparta, e um modelo ortotrópico da mecânica de fratura usando um fator de concentração de tensões. O modelo foi aplicado à madeira maciça mas nunca à maquinação de Aglomerados de Partículas. Também no trabalho de Bouzakis *et al.* (2000, 2003) foi sugerido um possível conceito para a maquinação de

Aglomerados de Partículas usando por base a simulação por elementos finitos. Os resultados da simulação foram sustentados nos processos de formação da apara através da análise da área das diferentes camadas de partículas e respectivas densidades. Os modelos foram desenvolvidos a partir dos diagramas de tensão-deformação fornecidos pelos testes de flexão para baixos raios de deformação. As propriedades mecânicas do aglomerado foram determinadas por medições experimentais e complementadas pelos resultados da simulação numérica. Os modelos estabelecidos foram otimizados pelas forças de corte obtidas nas medições em ensaios de fresagem. Nas simulações, a boa concordância das forças obtidas no processo de maquinação das diferentes camadas foram utilizadas para caracterizar as propriedades mecânicas das respectivas camadas de material.

Wong e Schajer (2003, 2005) investigaram a interferência de parâmetros energéticos durante o corte de Aglomerados de Partículas. Estes investigadores verificaram a existência de correlações entre a densidade do Aglomerado de Partículas e o consumo de energia durante a maquinação. Observaram que existe uma forte relação entre a dimensão das partículas e o consumo de energia. Para além deste aspeto, constataram um aumento das forças de corte e uma grande dispersão nos resultados com aumento do tamanho das partículas.

Outros investigadores focaram a sua atenção no trabalho específico de corte e no trabalho de deformação plástica da apara durante o corte de Aglomerados de Partículas revestidos a laminado (Kowaluk *et al.*, 2004; Beer *et al.*, 2005a). Em Kowaluk *et al.* (2004) foi analisada a influência dos parâmetros da produção (temperatura e pressão) dos Aglomerados de Partículas nas propriedades de maquinação. Os fatores que definiram as propriedades de maquinação foram o trabalho específico de corte e o trabalho de deformação da apara. Tanto o trabalho específico de corte como o trabalho de deformação da apara, não mostram diferenças significativas quando comparadas à mesma temperatura para pressões diferentes (Figura 2.3). No estudo de Beer *et al.*, (2005b) foi analogamente determinado o trabalho específico de corte e o trabalho de deformação plástica no Aglomerado de Partículas. Estes investigadores verificaram que uma parte significativa da energia foi consumida durante a criação da apara e uma parte menor usada no trabalho específico de corte. Na conclusão deste estudo, referem que os valores obtidos calculados aplicando a mecânica da fratura no domínio *elásto-plástico*, não podem ser aplicados directamente para determinar o trabalho específico de corte num processo de corte, uma vez que o percurso da fenda de fratura e a zona de processo são diferentes.

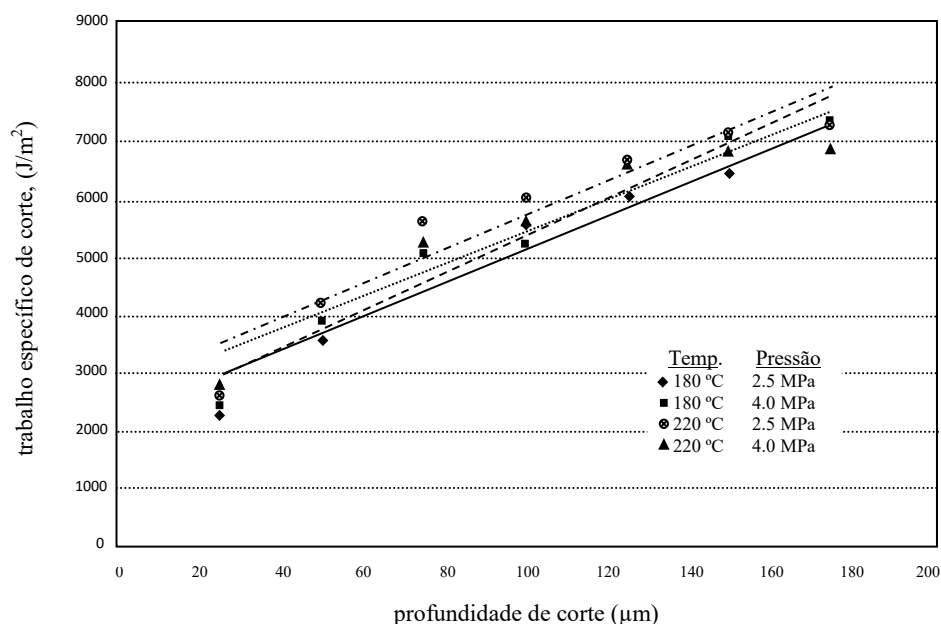


Figura 2.3 – Relação entre o trabalho específico de corte (J/m^2) e a profundidade de corte (μm) na maquinação de Aglomerados de Partículas sujeitos a diferentes combinações de temperatura e pressão, adaptado de Kowaluk *et al.* (2004) e Beer *et al.* (2005)

Marcin *et al.* (2006) investigaram a influência do tamanho das partículas em vários parâmetros de maquinação durante um processo de fresagem de Aglomerados de Partículas. Estes autores concluíram que um aumento limitado da espessura da apra não causa alterações importantes nos parâmetros de corte estudados. Contudo, um aumento excessivo da espessura de apra (ou uso de elevadas velocidades de alimentação) pode levar a resultados indesejados, especialmente em termos de qualidade. Por outro lado, o aumento das forças axiais e de corte e a maior potência consumida, conduzem igualmente à redução da qualidade da maquinação dos aglomerados, bem como ao excessivo desgaste das ferramentas.

No trabalho de Boucher *et al.* (2007) foi analisada a influência da variação da densidade e do ângulo de inclinação da aresta de corte nas forças de corte envolvidas na maquinação de derivados de madeira. Neste estudo, a aresta cortante foi dividida em pequenos elementos finitos e as forças de corte para cada um destes elementos foram formuladas de forma a incluírem a variação da densidade dos derivados de madeira em estudo. As constantes de corte foram obtidas através da medição das forças de corte em diversas experiências de fresagem ortogonal em MDF e Aglomerados de Partículas. Para validarem as três forças de corte ortogonal compararam dados anteriormente publicados, com os obtidos nestes novos ensaios. A modelização desenvolvida por estes investigadores incluiu também o efeito do ângulo de inclinação da aresta de corte na vida útil da ferramenta.

No trabalho de Wong (2007), foram examinados alguns métodos que tinham em vista o melhoramento da qualidade da superfície maquinada através da qualidade dos painéis e das suas interações com a ferramenta de corte. Este autor desenvolveu um modelo analítico e uma ferramenta informática para simular os efeitos destes fatores. O Aglomerado de Partículas foi simulado como se tratando de uma matriz de partículas composta por material disperso e com resistência interna e individual por partícula. Os resultados experimentais e o modelo analítico mostraram que as forças de corte aumentam com a profundidade de corte, quantidade de cola e resistência individual de cada partícula. Em contrapartida as forças de corte diminuem com o aumento do ângulo de inclinação da aresta de corte. Este autor concluiu que empregando ângulos maiores de inclinação na aresta da ferramenta e minimizando o tamanho e frequência dos espaços vazios entre as partículas, a qualidade da superfície pode ser beneficiada (Davim, 2011).

Sinn *et al.* (2008) investigaram as propriedades associadas à fratura nas três camadas que constituem o Aglomerado de Partículas. Discutiram a linearidade e não-linearidade das propriedades da mecânica da fratura em relação aos aspetos da produção dos aglomerados, e as suas consequências na maquinação. Concluíram que as propriedades da fratura dos painéis são influenciadas pelas aparas maiores que constituem a zona central dos aglomerados, e a melhor forma de caracterizar estas propriedades é através do trabalho específico de fratura.

No trabalho de Paulo Sá (2013), foi investigada a qualidade da aresta resultante da maquinação de várias placas de derivados de madeira através da manipulação de diferentes condições de operação (número de dentes, velocidade de avanço e variação de frequência). Os ensaios foram executados numa molduradora de quatro faces equipada com uma serra de disco. A examinação dos resultados foi efetuada através de uma análise de variância (ANOVA), para avaliar o nível de significância dos diferentes de fatores (tipo de Aglomerado de Partículas, MDF, número de dentes no disco e velocidade de avanço), nas três propriedades que considerou mais importantes para a otimização da qualidade do corte, nomeadamente: a qualidade da aresta, a vibração e a energia específica. Este autor concluiu que os fatores que influenciam significativamente a qualidade da aresta refletem essencialmente os diferentes tipos de derivado de madeira e os tipos de discos utilizados na maquinação. Conclui ainda, que o material com melhor qualidade de aresta é o MDF, e que esta aumenta com o número de elementos cortantes, atingindo o seu valor máximo no disco de 60 dentes.

2.1.3 Desgaste da ferramenta na maquinação dos Aglomerados de Partículas

Nas secções anteriores, vimos que o desgaste da ferramenta foi um dos tópicos analisados em alguns trabalhos de investigação. Daqui se pode inferir, que as condições de corte e as propriedades do material (por exemplo: humidade, densidade e composição), associadas a alguns mecanismos de desgaste, obrigam a um controlo rigoroso dos processos com o objetivo de garantir, por um lado a maior duração em serviço das ferramentas, e por outro, a obtenção da melhor qualidade de superfície. Saliente-se, que parte da extrema dificuldade e complexidade do processo de maquinação dos Aglomerados de Partículas, está inequivocamente associada à vida útil da ferramenta.

A contaminação por via da presença de minerais nos aglomerados tem sido considerada como uma das principais causas que contribuem para o processo de desgaste do gume da ferramenta durante a maquinação dos painéis de partículas (Bridges 1971; Sparks e Taylor 1981; Saljé e Stühmeier 1983a, 1983b; Hubber 1985; Boehme e Münz 1987; Porankiewicz, 1993, 1997a; Porankiewicz e Wieloch, 2008, Ratnasingam *et al.*, 2008 e Müller *et al.*, 2011).

Alguns estudos, apontam a corrosão devido a elevadas temperaturas durante a maquinação, como o segundo fator mais importante no desgaste da ferramenta durante o corte dos Aglomerados de Partículas (Mouseev 1981; Porankiewicz 1997b, 1998; Sheikh-Ahmad e Bailey, 1999a). A influência de temperaturas elevadas no processo de desgaste das ferramentas foi consistentemente demonstrada através de análise térmica e por métodos analíticos espectrais de superfície (Stühmeier 1989; Porankiewicz e Wagner 1997; Porankiewicz 1998).

Outros estudos, revelam que o conhecimento rigoroso dos processos de controlo do desgaste durante a maquinação dos aglomerados tem conduzido a melhores escolhas de materiais para ferramentas, bem assim como ao desenvolvimento de novos materiais com melhores características de resistência ao desgaste (Szwajka e Trzepieciński, 2016).

Em Okumura *et al.* (1978) foi investigado o desgaste de serras de disco empastilhadas com carboneto de tungsténio no corte de Aglomerados de Partículas. Estes autores examinaram através do microscópio electrónico de varrimento (SEM) que as superfícies da ferramenta que revelam maior desgaste são as arestas dos elementos cortantes, principalmente devido à remoção da camada superficial de cobalto. Esta situação origina o aparecimento de grãos de carboneto de tungsténio à superfície da ferramenta que se vão desagregando da sua

matriz compacta, e subsequentemente desaparecendo por acção mecânica. Estes autores verificaram que o desgaste na parte posterior da ferramenta era proporcional à componente da força normal, o que sugeria que a fricção na superfície posterior fosse responsável pelo desgaste da ferramenta durante o corte dos Aglomerados de Partículas.

Em Sugihara *et al.* (1979), foi estudada a influência do tamanho do grão de carboneto de tungsténio nos insertos (pastilhas) de serras circulares durante o corte de Aglomerados de Partículas. Este trabalho revelou que o desempenho do inserto composto pelo grão mais grosso era o que melhor contribuía para a vida útil da ferramenta em comparação com o grão médio e fino.

Saljé e Stühmeier (1988a), investigaram a influência do uso de ferramentas de carboneto de tungsténio e diamante policristalino (PCD) no corte por fresagem de aglomerados laminados. Neste estudo foi demonstrado que as ferramentas de PCD revelam maior durabilidade e qualidade de maquinação comparativamente às de carboneto. Todavia, a decisão para a sua escolha já é mais complicada, porque apesar do menor desgaste das ferramentas em PCD, persistem aspetos económicos que não são negligenciáveis (custo da ferramenta, paragens mais frequentes da máquina para substituição da ferramenta) e que têm de ser necessariamente tomados em consideração. No trabalho de Saljé e Stühmeier (1988b), foi examinado o desempenho de cinco classes de carbonetos de tungsténio na fresagem periférica de Aglomerados de Partículas. A espessura das camadas de carboneto de tungsténio variou entre 2,0 a 0,5 μm , e a sua dureza entre 1750 a 2350HV₁₀. Relata-se neste trabalho que a resistência ao desgaste é particularmente dependente da dureza da ferramenta, e verifica-se que existe uma boa correlação entre a vida útil da ferramenta e esta propriedade para todas as classes de carbonetos de tungsténio testadas. Estas conclusões foram confirmadas pelos resultados de Bansyoya *et al.* (1995), Sheikh-Ahmad *et al.* (1995) e Sheikh-Ahmad e Bailey (1999b), que usaram diversas classes de ferramentas de carboneto do tungsténio na furação de MDF e Aglomerados de Partículas. Estes trabalhos revelaram que um aumento da dureza da ferramenta conduz a um menor desgaste, e que o desgaste da ferramenta é proporcional à componente da força normal. A existência de micro-fraturas no carboneto foi igualmente evidente (Sheikh-Ahmad e Bailey 1999b). Estas observações reforçam a conclusão de que a remoção mecânica da cobertura do metal é a causa mais provável da degradação do gume da ferramenta durante a maquinação dos Aglomerados de Partículas.

Enßle (2008), analisou a influência da geometria de ferramentas com ponta de diamante na maquinação de madeira e derivados com vista à melhoria da vida útil da

ferramenta. Para simular as condições de corte considerando uma micro geometria da aresta de corte, Enßle usou o método dos elementos finitos para a modelação em 2D. A remoção do material foi simulada retirando elementos no lado da peça, contudo, os efeitos do contato entre as aparas e a ferramenta não foram descritos com precisão.

As ferramentas de carboneto de tungsténio apresentam, portanto, algumas limitações particularmente patentes nos rácios relativamente elevados de desgaste, causadas pelos fenómenos de abrasão, oxidação e altas temperaturas envolvidas na operação de corte (Sheikh-Ahmad *et al.*, 1995, 1999; Darmawan *et al.*, 2008). Por via destas limitações, algumas tecnologias inovadoras têm vindo a ser desenvolvidas com o propósito de melhorarem a resistência ao desgaste, como por exemplo, as baseadas na deposição de filmes de revestimento na superfície das ferramentas. Ainda assim, alguns trabalhos de investigação relatam que a aplicação de materiais de revestimento (monocamada) na superfície das ferramentas de carboneto de tungsténio, nem sempre gera mais resistência ao desgaste quando comparadas com as ferramentas não revestidas. Os resultados destes estudos, enfatizam especialmente que os revestimentos de monocamada não proporcionam melhorias significativas no corte e na vida útil da ferramenta (Sheikh-Ahmad *et al.*, 1995, Salje e Stühmeier, 1988a,b; Fuuch e Raatz, 1997; Darmawan *et al.*, 2001). Para ultrapassar esta insuficiência, alguns investigadores sugerem que os revestimentos multicamadas são a técnica mais promissora para melhorar o desempenho das ferramentas revestidas a uma só camada (Son *et al.*, 2002; Chang *et al.*, 2007; Guo *et al.*, 2008, Pinheiro *et al.*, 2009). No estudo de Yang *et al.*, 2008, foi demonstrado que multicamadas de nitreto de titânio-silício (TiSiN) / nitreto de crómio (CrN) geram menor taxa de desgaste ($0,6 \mu\text{m}^2/\text{min}$) em comparação com uma camada única de TiSiN ($2,87 \mu\text{m}^2/\text{min}$). Outros estudos relataram também, que ferramentas de carboneto de tungsténio revestidas a multicamadas de TiSiN / nitreto de óxido de alumínio e titânio (TiAlN) apresentam maior dureza, maior resistência à corrosão e baixo coeficiente de atrito. Contudo, a aplicação de materiais duros no revestimento de ferramentas com recurso à técnica multicamada, não é ainda amplamente praticada na maquinação de madeira e seus derivados (Fahrussiam *et al.*, 2015).

Para descrever e quantificar o desgaste da aresta de corte, alguns estudos focaram a sua atenção nas características geométricas da superfície desgastada (perfil da aresta da ferramenta de corte), e na variação do desgaste ao longo do comprimento do seu gume. Pahlitzsch e Sandvoss (1970) e McKenzie e Karpovich (1975), mostraram que as mudanças na geometria associadas ao perfil do desgaste no gume da ferramenta, estão mais relacionadas

com o desempenho da ferramenta, do que propriamente com a quantidade de desgaste. A qualidade da superfície maquinada e a componente da força normal são particularmente sensíveis a essas mudanças. Em relação aos trabalhos que investigaram a variação do desgaste ao longo do gume da ferramenta, não existe um método estatístico unificado na literatura relativamente à quantificação do seu desgaste na maquinação dos Aglomerados de Partículas. Bridges (1971) obteve talvez o indicador mais preciso de desgaste calculado a partir da área do desgaste do perfil ao longo da aresta do elemento cortante. Outros autores: Saljé *et al.*, (1985), Saljé e Stühmeier (1988a,b) e Stewart (1988), consideraram apenas o desgaste próximo às superfícies externas dos aglomerados onde a densidade dos painéis é maior e onde provoca mais desgaste. Para colmatar estas lacunas Sheikh-Ahmad e McKenzie (1997), desenvolveram um método para a monitorização *on-line* do desgaste, que permite avaliar os efeitos associados ao desgaste da ferramenta através das forças envolvidas no processo de maquinação. Neste estudo, a temperatura da ferramenta e a temperatura da superfície do aglomerado foram também alvo de investigação, e a componente de força normal foi identificada como sendo o melhor indicador para caracterizar o perfil do desgaste no gume da ferramenta. Nasir e Cool (2018) produziram uma revisão sobre trabalhos consagrados à maquinação da madeira, dando especial ênfase ao processo de corte com serras circulares. Neste artigo referem alguns estudos que quantificaram o mecanismo de desgaste, e relatam a título conclusivo sobre este tópico, que inevitavelmente é essencial o uso de sistemas de monitorização *on-line* aplicados a processos industriais onde estão presentes complexos mecanismos de desgaste. Em Jegorowa *et al.* (2021), foi investigado um conjunto de melhorias realizadas num algoritmo desenvolvido em trabalhos anteriores (Jegorowa *et al.*, 2019, 2020), capaz de efetuar o reconhecimento do desgaste em ferramentas de furacão. As imagens dos furos foram captadas a partir de aglomerados revestidos a papel melamínico, e foram usadas como fatores entrada. Para as experiências definiram três classes: verde, amarelo e vermelho, que correspondem ao estado da ferramenta. Este é confirmado empiricamente por um operador, que deve substituir imediatamente a ferramenta no caso de detetar anomalias, uma vez que a continuação do seu uso na produção pode posteriormente resultar em perdas de produtividade, devido à baixa qualidade do produto. Estes autores referem que durante as experiências, e em resultado de diálogo direto com um fabricante, notaram que embora no geral a precisão do operador foi importante, é muito mais crucial que um algoritmo possa ser usado, para de forma automática para distinguir claramente as classes vermelhas e verdes para evitar erros de classificação (ou pelo menos alcançar o mínimo erro possível). O algoritmo proposto por estes autores foi baseado num conjunto de modelos

bastante diversos, e que refletiram o melhor desempenho para as condições pretendidas. Estes investigadores concluem que o modelo selecionado tem uma precisão geral relativamente alta, ou seja, com praticamente nenhum erro de classificação tendo em conta as classes definidas. Nadolny *et al.* (2021), realizaram um trabalho de investigação com o objetivo de determinarem como a vida útil de ferramentas de corte utilizadas nas operações de aplainamento da madeira de pinho (*Pinus sylvestris L.*), pode ser afetada pela aplicação de revestimento de nitreto de alumínio crómio (AlCrN). Para o efeito foram efetuadas experiências em ambiente industrial numa empresa de processamento de madeiras de médio porte. O estudo investigou o tempo de trabalho efetivo, raio de arredondamento, perfil ao longo da lâmina de corte (extensão/comprimento do dano da aresta, área de desgaste da aresta de corte), bem com parâmetros relacionados com a textura da face de inclinação da lâmina, através de análises da condição da aresta de corte das lâminas revestidas com AlCrN e não revestidas. Os resultados deste trabalho mostraram que é possível aumentar até 154% a vida útil das lâminas revestidas com AlCrN em relação aos resultados obtidos com as lâminas não revestidas. Estes autores concluem que a modificação nas características das lâminas proposta, não envolve nenhuma alteração no processo tecnológico do aplainamento, e não implica nenhuma interferência no processo de maquinação nem nos seus parâmetros, o que permite em termos práticos uma implementação rápida e fácil desta solução em ambiente industrial.

2.2 Monitorização e otimização da operação de corte

Devido às exigências produtivas relacionadas principalmente com a qualidade dos produtos, e por outro lado devido à necessidade de dar uma resposta adequada às solicitações do mercado, a automação dos processos de fabrico de produtos feitos de materiais à base de madeira, tornou-se uma prioridade. A monitorização do processo de corte é essencial por numerosas razões tecnológicas: qualidade da superfície, estado do equipamento, energia consumida, desgaste da ferramenta e determinação do seu tempo óptimo de serviço dependente dos regimes de maquinação (Mandić *et al.*, 2015). No entanto, persistem alguns problemas que têm a ver com o monitoramento automatizado dos processos de maquinação e das condições da ferramenta de corte (Iskra e Hernández, 2012; Jemielniak *et al.*, 2012, Wei *et al.*, 2018). Aqui bem assenta a ideia do desenvolvimento de dispositivos autónomos, sensores e máquinas que se auto monitorizam e diagnosticam em contínuo, através da execução de pequenas tarefas descentralizadas baseadas na condição do

equipamento/ferramenta (Bergweiler, 2016). Porém, é honesto admitir que a indústria da madeira e do mobiliário não são ramos industriais principais em termos de fabricação inteligente. Apesar de alguns sucessos de investigação nessa área (Iskra e Hernandez, 2012), é por mais evidente que muito há a desenvolver em comparação com a indústria metalomecânica e especialmente com a indústria automóvel, por exemplo. Uma das lacunas apontadas centra-se na falta de oferta comercial, ou mesmo no desenvolvimento de protótipos de sistemas de monitorização automática da condição da ferramenta (TCM), adaptados à indústria de transformação da madeira e derivados (Jegorowa *et al.*, 2020). Ainda assim, alguns interessantes trabalhos de investigação sobre este assunto têm sido publicados ao longo dos anos (Porankiewicz, 1988; Lemaster, 2000a; Lemaster, 2000b; Szwejka e Górski, 2006; Górski *et al.*, 2019; Jegorowa *et al.*, 2019). Outros estudos têm considerado não só os parâmetros operatórios, as propriedades dos aglomerado, e o desgaste da ferramenta, mas também a emissão acústica e os sistemas de visão artificial baseados no processamento digital de imagem, como métodos efetivos para a aquisição de informação válida durante a operação de corte (Hoffmeister *et al.*, 2005; Coelho *et al.*, 2005, 2008; Garrido *et al.*, 2009, 2010, 2011; Coelho *et al.*, 2011; Davim, 2011; Eschelbacher *et al.*, 2019).

2.2.1 Utilização de métodos acústicos

Os métodos acústicos permitem obter dados consistentes em relação às vibrações decorrentes do corte mecânico. Todavia, o uso destas técnicas revela-se muito limitado, uma vez que dependem em muito do estado/condição da ferramenta de corte. Ainda assim, as emissões acústicas geradas no processamento da madeira maciça parecem constituir um método promissor para monitorizar o desgaste da ferramenta, a formação da apara e a rugosidade da superfície maquinada, entre outras características (Lemaster *et al.*, 1982, 1985; Murase *et al.*, 1988, 1995; Zhu *et al.*, 2004; Denaud *et al.*, 2004; Suetsugi *et al.*, 2005; Iskra e Tanaka, 2006; Nasir *et al.*, 2019). Em relação aos derivados de madeira, Jemielniak e Nejman (2006) apresentaram resultados preliminares de um trabalho de investigação, que visou estabelecer uma metodologia para o registo da vibração, emissão acústica e sinais de pressão acústica durante a maquinação de Aglomerados de Partículas revestidos a MDF, bem assim como encontrar a dependência desses sinais na condição da ferramenta. No trabalho de Murase *et al.* (2008) foi examinada a emissão acústica no processo de corte de MDF e Aglomerados de Partículas, com o objetivo centrado na obtenção de informação relativa às características da emissão acústica na maquinação destes produtos. No caso do Aglomerado

de Partículas, o aumento do teor de resina no fabrico do Aglomerado de Partículas conduziu a uma tendência de subida da resistência durante o corte e a emissão acústica também aumentou. Todavia, ficou demonstrado que a emissão acústica gerada durante o corte dos Aglomerados de Partículas é difícil de relacionar, quer com a qualidade do corte, quer com o teor de adesivo. No trabalho de Wilkowski e Górski (2011), foi investigado o potencial dos sinais vibro-acústicos como fonte de informação válida para a caracterização do desgaste da ferramenta durante a fresagem de Aglomerados de Partículas revestidos. Estes autores verificaram experimentalmente a capacidade dos sinais vibro-acústicos (vibração mecânica, ruído e emissão acústica) para a avaliação indireta do desgaste da ferramenta. O mais útil, do ponto de vista de monitorização das condições da ferramenta, foi o sinal de vibração medido por meio de um acelerómetro conectado ao cabeçote da máquina-ferramenta CNC. A característica mais relevante do sinal de vibração foi a amplitude visível no espectro de potência para a faixa estreita de frequência desse sinal, associado à frequência de passagem das lâminas da ferramenta (600 Hz). Outros estudos procuraram em tentativas sistemáticas determinar quais os sinais mais úteis e as suas características, com vista a uma identificação inequívoca, rápida e confiável da condição da ferramenta durante o processo de maquinação (Kurek *et al.*, 2016; Świdorski *et al.*, 2017). No trabalho de Eschelbacher *et al.* (2019), foram apresentados resultados da fresagem de seis diferentes madeiras e de materiais à base de madeira. Durante a maquinação, as forças e a emissão acústica medidas na zona de amarração do sistema, foram registadas e analisadas para reconhecer o material maquinado. A análise e resultados deste trabalho mostram que a tarefa de monitorização desafia as fronteiras e limitações das contingências técnicas atuais.

2.2.2 Sistemas de visão artificial

Tal como vimos anteriormente, um dos principais critérios para a avaliação da qualidade dos Aglomerados de Partículas, pode ser definido pela análise do perfil da aresta maquinada medido por via de sistemas de visão artificial. Os trabalhos iniciais que empregaram este tipo de sistemas, foram sobretudo dedicados à investigação do seu potencial para a caracterização qualitativa da superfície da madeira maciça e derivados. Os métodos desenvolvidos mais recentemente baseiam-se em aperfeiçoadas técnicas de medição e avaliação. As técnicas de medição enquadram-se normalmente em duas categorias ou métodos distintos: contato e não contato. Está além do intento deste capítulo discutir em detalhe todas as técnicas de medição para a avaliação da superfície da madeira maciça que

foram investigadas no passado. Todavia, merecem aqui destaque pelo seu contributo científico neste domínio, os trabalhos de Lemaster (1997a,b, 2004), onde foi desenvolvido um sistema ótico com capacidade de distinguir defeitos anatómicos, tais como nós e bolsas de resina, e outros defeitos resultantes da maquinação, como marcas de elementos cortantes e irregularidades originadas pela lixagem. Ainda no trabalho de Lemaster (2004), podemos encontrar uma visão geral dos vários relatórios de investigação sobre este tópico, e para uma revisão geral das técnicas óticas (e técnicas de rugosidade da superfície em geral) podemos encontrar informação válida em várias obras de referência: (Thomas e King, 1977; Lemaster e Dornfeld, 1983; Jouaneh *et al.*, 1987; DeVries e Lemaster, 1991; Riegel, 1993; Whitehouse, 1994; Thomas, 1999; Lemaster, 2010 e Whitehouse, 2011). Em Coelho *et al.*, (2005, 2008) encontramos uma descrição detalhada sobre um método inovador concebido para a avaliação e caracterização da influência dos parâmetros de maquinação da madeira na qualidade de acabamento da superfície. Este método consiste em iluminar uma superfície de madeira recorrendo a uma luz rasante. Daqui resulta um perfil de rugosidade, em que os vértices abertos ficam na sombra e as pontas fechadas iluminadas. A etapa seguinte consiste em analisar uma imagem da superfície para estimar a rugosidade. Estas imagens são analisadas por computador através de uma placa de aquisição que efetua a digitalização da imagem, e por um software interativo que executa o seu processamento. Este trabalho é considerado um importante contributo científico no domínio da avaliação da qualidade de uma superfície de madeira com acabamento, por via da análise digital de imagem baseado num inovador e funcional sistema de visão artificial.

Em relação aos estudos que se dedicaram à profilometria ótica para a avaliação da superfície de corte dos derivados de madeira, destacamos na literatura os trabalhos de: Lemaster e DeVries, 1992; Lemaster e Beall, 1996; Lemaster 1997a. Estes autores desenvolveram um sistema baseado no princípio da profilometria ótica, capaz de quantificar consistentemente o estado de um processo fabril através da monitorização da qualidade da superfície. Estes trabalhos focaram fundamentalmente três áreas: 1) hardware (otimização dos sistemas de profilómetros óticos para aplicações na maquinação de madeira e derivados); 2) desenvolvimento de técnicas de extração de parâmetros utilizando técnicas tradicionais e processamento avançado de sinais, análise *wavelet*, etc., incluindo identificação da superfície no conjunto de parâmetros que possam quantificar, caracterizar e identificar irregularidades superficiais; e 3) interface do operador e esquemas de tomada de decisão, que forneçam ao operador da máquina informações sobre o estado da operação de maquinação e a causa dos

defeitos de maquinação. A partir da análise dos resultados dos ensaios experimentais, estes investigadores concluíram que estes testes forneceram bons indicadores para o controlo *online* da qualidade da superfície dos derivados de madeira, fator indispensável para o fabrico de diversos produtos.

No que respeita aos trabalhos de investigação dedicados à análise e caracterização do perfil da aresta de corte nos Aglomerados de Partículas, destacam-se os trabalhos de Saljé e Drückhammer 1984, Saljé 1984 (descritos na subsecção 2.2.2), e os trabalhos de Garrido *et al.*, 2006, 2007a, 2007b, 2009, 2010 e 2011, onde foi proposto um inovador sistema de visão artificial, que permitiu a definição de diversos parâmetros para a caracterização do perfil da qualidade da aresta de corte. Estes últimos trabalhos estão na base da elaboração desta tese, e serão descritos em detalhe nos próximos capítulos.

2.3 Referências bibliográficas

Bansyoya K., Fukuda H., Mantani T., Murase Y., (1995): “Wear of cemented carbide bits in machine boring of particelboard and MDF”. *Wood Ind* 50:413-417.

Beer P., Sinn G., Gindl M., Stanzl-Tschegg S., (2005a): “Work of fracture and of chips formation during linear cutting of particle-board”, *Journal of Materials Processing Technology* 159, 224–228.

Beer P., Sinn G., Kowaluk G., Lacki W., Dziurka D., (2005b): "Mechanical properties of particleboards induces work to cut", *Proceedings of the 17th International Wood Machining Seminar, Rosenheim, Germany.*

Bergweiler S., (2016): “Smart Fatory Systems - Fostering Cloud-based Manufacturing based on Self-Monitoring Cyber-Physical Systems”. *International Journal on Advances in Systems and Measurements* 9(1-2): 91-101.

Boehme C. & Münz U. V., (1984): “Effects of the properties of plastic-overlaid decorative particleboards on cutter wear and edge quality during peripheral milling. 1. Evaluation of the structure, composition, and properties of test boards. 2. Evaluation of cutting tool wear and board edge quality during milling. 3. Overall evaluation of results and conclusions. *Holz-Zentralblatt*. Vol. 110, no. 18; 24; 60, pp. 261-264; 361-364; 947, 949, 956.

Boehme C. & Münz U. V., (1987): “Machining cutting Behaviour and Abrasion Effect of Coated Chip Boards”, *Holzbearbeitung*, vol. 34, no. 6, pp 19-25.

Boucher J., Meausoone P.J., Perrin L., (2004): “Effects of diamond tool edge direction angle on cutting forces and tool wear during milling of medium density fibreboard and particleboard”, in: *Proceedings of Second International Seminar of Wood Machining, Vienna, 5–7 July*, pp. 241–248.

Boucher J., Méausoone P.-J., Martin P., Auchet S., and Perrin L., (2007): "Influence of helix angle and density variation on the cutting force in wood-based products machining," *J. Mater. Process. Technol.* 189(1-3), 211-218. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.01.024.

Bouzakis K-D, Koutoupas G., (1998): "Determination of material properties of chipboard layers evaluating cutting force components". In: *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering*, Lausanne, Switzerland.

Bouzakis K-D, Koutoupas G Siganos and Nikolakakis P., (1999): "Improvement of cutting performance of PVD coated cemented carbide inserts in chipboard milling considering the chip formation". In: Bouzakis K-D, Toenshoff HK and Geiger M (eds). *Proceedings of the 1st International Conference on Coatings*, October 1999, Thessaloniki, Greece.

Bouzakis K-D., Koutoupas G., PApapanagiotou A., Nikolakakis P., Kalamaras G., and Venieris Y., (2000): "Determination of material strength and cutting loads in chipboard milling". In: *Proceedings of the 2nd International Seminar on Improving Machine Tool Performance*, July, 2000, Nantes-La Baule, France.

Bouzakis K. D., Koutoupas G., (2003): "Bending and indentation tests to determine chipboards' mechanical strength critical stresses and their correlation to the specific cutting force in milling", *J Wood Sci Technol*, 37.

Bridges RR., (1971): "A quantitative study of some factors affecting the abrasiveness of particleboard", *Forest Products Journal*, Vol. 21, No. 11, p. 39 – 41.

Chladil J., Sedlak J., Rybafova E. S., Kucera M., and Dado M., (2019): "Cutting conditions and tool wear when machining wood-based materials," *BioResources* 14(2), 3495-3505. DOI: 10.15376/biores.14.2.3495-3505.

Coelho C., Martins J., Carvalho L., Costa C., Masson D., Méausoone P., (2005): "A Novel Method for Evaluating the Influence of Wood Machining Conditions on the Quality of a Finished Surface". *Proceedings of the 17th International Wood Machining Seminar*, Rosenheim, Germany.

Coelho C., Martins J., Meausoone P.J., Masson D., Carvalho L., Costa C., (2008): “Method for evaluating the influence of wood machining conditions on the objective characteristics and subjective perception of a finished surface”. *Wood Sci. and Technol.*, 42: 181-195.

Coelho C., Garrido N., Martins J., Carvalho L.H., Costa C., (2011): “Wood and Wood-based panels machining quality”, in *Wood Machining -Chapter 2*, edited by J. Paulo Davim, pp. 27-82, ISTE-Wiley (ISBN: 978-1-84821-315-9).

Darmawan W., Tanaka C, Usuki H, Ohtani T., (2001): “Performance of coated carbide tools in turning wood-based materials: effect of cutting speeds and coating materials on the wear characteristics of coated carbide tool in turning wood-chip cement board”. *J Wood Sci*, 47(5): 342-349, 2001.

Darmawan W., Usuki H., Quesada J., Marchal R., (2008): “Clearance wear and normal force of TiN-coated P30 in cutting hardboards and wood-chip cement boards:”. *Holz Roh Werkst*, 66 89-97.

Davim J. P., (2011). “Wood Machining”. First ed. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc. Great Britain and the United States, pp. 275.

Denaud L–E., Bleron L., Marchal R., Ratle A., (2004): “Contribution to an on–line control of the peeling process: The vibro–acoustic approach”. *Proc. of 2nd International symposium on Wood Machining*, Vienna, Austria, pp. 175–183.

DeVries W.R. and Lemaster R.L., (1991): “Processing methods and potential applications of wood surface roughness analysis”. *Proceedings of the 10th International Wood Machining Seminar*, October 21-23. pp. 276-292.

Enßle M.O., (2008). “Standwegverlängerung durch gezielte Änderung der Mikrogeometrie an Diamantwerkzeugen für die Holz- und Holzwerkstoffbearbeitung”, *Dissertation*, Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart.

Eschelbacher S., Duntschew J., Möhring HC., (2019): “Recognition of wood and wood-based materials during machining using acoustic emission”. In: Wulfsberg J., Hintze W., Behrens BA. (eds) Production at the leading edge of technology. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.

Ettelt B., (1987): “Saw, milling, planing, boring: Wood cutting and its tools”. DRW-Verlag, Stuttgart, Germany.

Fahrussiam F., Praja I.A., Darmawan W., Wahyudi I., Nandika D., Usuki H., Koseki S., (2015): “Tribology in Industry”, Vol. 38, No. 1 66-73.

Franz N.C., (1958): “An Analysis of the Wood Cutting Process”. University of Michigan.

Fuuch I, Raatz C., (1997): “Study of wear behaviour of specially coated (CVD, PACVD) cemented carbide tools while milling of wood-based material”. Proceedings of the 13th International Wood Machining Seminar. North Carolina State University. June 17-20, pp.

Garrido N., Martins J., Carvalho L., Mendes J., Costa C., (2006): “A novel method for evaluating the influence of wood machining conditions on the quality particleboard edges”. Proceedings of the International Conference on integrated approach to wood structure, behaviour and applications” COST E35, Florence, Italy.

Garrido N., Martins J., Carvalho L., Mendes J., Costa C., (2007a): “Influence of sawing conditions on the quality of particleboard edges”. Proceedings of the 18th International Wood Machining Seminar, Vancouver, Canada.

Garrido N., Martins J., Carvalho L., Mendes J., Costa C., (2007b): “Influence of the sawing conditions on particleboard edge quality”. Proceedings of the Third International Symposium on Wood Machining, Lausanne, Switzerland.

Garrido N., Pereira J., Martins J., Carvalho L., Mendes J., Costa C., (2009): “Effect of formaldehyde scavengers on the machining of particleboard”, International Panel Products Symposium 2009, Nantes, France, 16-18 de Setembro.

Garrido N., Martins J., Pereira J., Carvalho L., Mendes J., Costa, C., (2010): “Effect of recycled wood and alternative species on particleboard machining”, Proceedings of the 1st International Conference on Processing Technologies for the Forest and Bio-based Products Industries. Salzburg/Kuchl, Austria, 07-08 Outubro.

Garrido N., Martins J., Carvalho L.H., Mendes J.G., Costa C., (2011): “Influência da incorporação de resíduos e espécies alternativas na qualidade de maquinação dos Aglomerados de Partículas”, CIMAD 11 – 1º Congresso Ibero-Latino Americano da Madeira na Construção, Livro de Resumos, edited by J. H. Negrão and A. G. Dias, pp. 95-96, 7-9 June, Coimbra, Portugal (ISBN 978-989-96461-2-4).

Górski J., Szymanowski K., Podziewski P., Smietanska K., Czarniak P., Cyrankowski M., (2019): “Use of cutting force and vibro-acoustic signals in tool wear monitoring based on multiple regression technique for compreg milling”. *BioResources*, 14 (2) (2019), pp. 3379-3388, 10.15376/biores.14.2.3379-3388.

Guo C.T., Lee D. and Chen P.C., (2008): “Deposition of TiSiN coatings by arc ion plating process”, *Applied Surface Science*, vol. 254, pp. 3130-3136.

Hoffmeister H., Grübler T., Looß T., (2005): “Image Processing as a Tool for Process-Integrated Quality Assessment”. Proceedings of the 17th International Wood Machining Seminar, Rosenheim, Germany.

Hubber H., (1985): “Tool Wear Influences by the Contents of Particleboard,” in Proc. 8th Int’l Wood Machining Seminar, R. Lemaster (ed.), p. 72 – 85.

Ilcewicz L.B. and Wilson J.B., (1981): “Fracture Mechanics of Particleboard Using Nonlocal Theory”. *Wood Science*, Vol. 14, No. 2, pp. 65-72.

Iskra P., Tanaka C., (2006): A” comparison of selected acoustic signal analysis techniques to evaluate wood surface roughness produced during routing”. *Wood Sci. Technol.* 40(3): 247-259.

Iskra P., and Hernández R. E., (2012): "Toward a process monitoring of CNC wood router. Sensor selection and surface roughness prediction". *Wood Science and Technology* 46(1-3), 115-128. DOI: 10.1007/s00226-010-0378-7.

Jegorowa A., Górski J., Kurek J., Kruk M., (2019): "Initial study on the use of support vector machine (SVM) in tool condition monitoring in chipboard drilling". *European Journal of Wood and Wood Products* 77: 957-959.

Jegorowa A., Górski J., Kurek J., Kruk M., (2020): "Use of nearest neighbors (K-NN) algorithm in tool condition identification in the case of drilling in melamine faced particleboard". *Maderas Ciencia y Tecnología* 22(2):189–196.

Jegorowa A., Kurek J., Antoniuk I., Dołowa W., Bukowski M., Czarniak P., (2021): "Deep learning methods for drill wear classification based on images of holes drilled in melamine faced chipboard". *Wood Science and Technology* (2021) 55:271–293. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01245-7>

Jemielniak K., Nejman M., (2006): "Applicability of vibration, acoustic pressure and acoustic emission signals for tool condition monitoring while machining wood materials". 1st Jubilee Conf.: "Manufacturing Engineering in Time of Information Society", 1-2 June, Gdańsk, Poland, 159-162.

Jemielniak K., Urbański T., Kossakowska J., and Bombiński, S., (2012): "Tool condition monitoring based on numerous signal features," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 59(1-4), 73-81. DOI: 10.1007/s00170-011-3504-2.

Jouaneh M.K., R.L. Lemaster, and D.A. Dornfeld, (1987): "Measuring workpiece dimensions using a non-contact laser detector system". *International J. of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 2(1):59-74, ISSN: 0268-3768.

Kienzle, (1952): "The analysis of forces and performances at cutting tools and machine tools". *VDI-Z Integrierte Produktion*, Springer VDI Verlag, 94:229.

Kivimaa E., (1952): "Blunting of wood-working tools". *HolzRoh Werkst* 10(11):425-428.

Kowaluk G., (2007): “Application of the theory of work of cutting distribution in milling”. *Electron J Pol Agric Univ* 10(3):1-8.

Kowaluk G, Szymanski W, Palubicki B, Beer P., (2006): “Quality of milling of laminated particleboard correlated to cutting parameters”. *Proc. of Joint Meeting of ESWM and COST Action E35, Florence, Italy, 14.–17. May 2006.*

Kowaluk G., Dziurka D., Beer P., Sinn G., Teschegg S., (2004): “Influence of particleboard production parameters on work of fracture and work of chips formation during cutting”. *Electronic J. of Polish Agricultural Universities*, 7 (1) (available Online: <http://www.ejpau.media.pl/volume7/issue1/wood/art-01.html>).

Kurek J., Kruk M., Osowski S., Hoser P., Wiczorek G., Jegorowa, A., Górski J., Wilkowski J., Śmietańska K., and Kossakowska J., (2016): “Developing automatic recognition system of drill wear in standard laminated chipboard drilling process,” *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* 64(3), 633-640. DOI: 10.1515/bpasts-2016-0071.

Lemaster RL, Klamecki BE, Dornfeld DA., (1982): “Analysis of acoustic emission in slow speed wood cutting”. *J Wood Sci* 15(2):150–160.

Lemaster R., Dornfeld D., (1983): “Measurement of surface quality of sawn and planed surfaces with a laser”. *Proceedings, University of California Forest Products Laboratory, 7th Wood Machining Seminar, October 1982.* pp. 52-70.

Lemaster RL, Dornfeld DA., (1985): “Monitoring tool wear during wood machining with acoustic emission”. *Wear* 101:273–282.

Lemaster R.L. and W.R. DeVries., (1992): “Non-contact measurement and signal processing methods for surface roughness of wood products”. *Proceedings of the 8th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, September 23-25, 1991. Vancouver, WA,* pp. 203-218.

Lemaster R.L., and F.C. Beall, (1996): “The use of an optical profilometer to measure surface roughness in medium density fibreboard”. *Forest Products Journal*, Vol. 46(11/12):73-78, ISSN: 0015-7473.

Lemaster R.L., (1997a): “The use of an optical profilometer to monitor product quality in wood and wood-based products”. *Proceedings of the National Particleboard Association Sanding and Sawing Seminar*, Charlotte, NC, November 1995, published by the Forest Products Society, ISBN: 0-935018-51-4, Madison, Wisconsin, USA, 17 pages.

Lemaster R.L., (1997b): “Hardwood machining R&D: surface quality and process monitoring technologies”. *Proceedings of the Eastern Hardwood Resource, Technologies, and Markets Conference*. April 21-23, Camp Hill, Pennsylvania. Published by the Forest Products Society, pp. 109-120.

Lemaster R. L., Lu L., and Jackson S., (2000a): “The use of process monitoring techniques on a CNC wood router. Part 1. Sensor selection,” *Forest Products Journal* 50(7/8), 31–38.

Lemaster R. L., Lu L., and Jackson S., (2000b): “The use of process monitoring techniques on a CNC wood router. Part 2. Use of vibration accelerometer to monitor tool wear and workpiece quality,” *Forest Products Journal* 50(9), 59–64.

Lemaster R.L., (2004): “Development of an optical profilometer and the related advanced signal processing methods for monitoring surface quality of wood machining applications”. Ph.D. Thesis, North Carolina State University, 254p.

Lemaster R.L., (2010): “The use of frequency and wavelet analysis for monitoring surface quality of wood machining applications. Scanning”, *The Journal of Scanning Microscopies: Special Issue on Diverse Applications of Surface Metrology I*, July/August, Volume 32, Issue 4, Pages 224 - 232, Issue edited by: Christopher A. Brown. ISSN: 1932-8745.

Licher E., (1991): “A machinability database for the woodworking industry. *Holz-als-Roh-und-Werkstoff*. Vol. 49, No. 11, pp. 439-444.

Mandić M.; Porankiewicz B.; Danon G., (2015): “An Attempt at Modelling of Cutting Forces in Oak Peripheral Milling”. *BioResources* 10(3): 5489-5502.

Marcin Zbieć, Andrzej Mazurek, Zdeněk Kopecký, (2006): “Influence of chip thickness on various cutting parameters in milling of chipboard”. *Trieskové a Beztrieskové Obrábanie Dreva* 2006, 12. - 14. 10. 2006, pag. 299.

McKenzie, W. M., (1960): “Fundamental Aspects of the Wood Cutting Process”. *Forest Products Journal*, September, pp. 447.

McKenzie W. M. and Karpovich, H., (1975): “Wear and Blunting of the Tool Corner in Cutting a Wood-Based Material,” *Wood Science and Technology*, Vol. 9, p. 59 – 73.

Moiseev A., (1981): “Resistance to Attrition of Wood Cutting Tool” – Moscow, Wood industry, 109 p.

Müller C., Deetz R., Schwarz U., and Thole V., (2011): "Agricultural residues in panel production - Impact of ash and silica content". In: 20th International Wood Machining Seminar, Skellefteå, Sweden.

Murase Y., Matsumoto K. and Ohuchi T., (2008): “Acoustic Emission and Cutting Resistance in Cutting of Solid Wood, MDF and Particleboard”. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 53(2), 485-490.

Murase Y., Ogawa M., Matsumoto H., (1995): “Acoustic emission characteristics in wood sanding. I. Effect of the grain sizes and sanding times emission on acoustic in belt sanding”. *Mokuzai Gakkaishi*. 41(7): 647–651.

Murase Y., Ike K., Mori M., (1988): “Acoustic monitoring of wood cutting. I. Detection of tool wear by AE signals”. *Mokuzai Gakkaishi*. 34(3): 207–213.

Nadolny K., Kapłonek W., Sutowska M., Sutowski P., Myśliński P., Gilewicz A., Warcholiński B., (2021): “Experimental tests of PVD AlCrN-coated planer knives on

planning Scots pine (*Pinus sylvestris L.*) under industrial conditions”. *European Journal of Wood and Wood Products* (2021) 79:645–665. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01660-y>

Nasir V., Cool J. & Sassani F., (2019): “Acoustic emission monitoring of sawing process: artificial intelligence approach for optimal sensory feature selection”. *Int J Adv Manuf Technol* 102, 4179–4197.

Nasir V., Cool J., (2018): “A review on wood machining: characterization, optimization, and monitoring of the sawing process”. *Wood Mater Sci Eng. Taylor & Francis Group.* 15:1, 1-16, DOI: 10.1080/17480272.2018.1465465.

Okumura S, Sugihara H, Ikeuchi K., (1978): “Wearing process of tungsten carbide tipped circular saw - interrupted cutting of particleboard with a single saw tooth”. *Bull Kyoto Univ For* 50:201-208.

Pahlitzsch G. and Jostmeier H., (1964): “Further Observations on Blunting Behaviour and Effect of Cutting Rate in the Milling of Particleboard,” *Holz als Roh- und Werkstoff*, Vol. 22, p. 424 – 429.

Pahlitzsch G. and Sandvoss E., (1970): “Analysis of Edge Bluntness in the Milling of Hardboards,” in *Proc. from the meeting of the working group on mechanical conversion of wood*, section 41, IUFRO, p. 5 – 38.

Palubicki B., Olejniczak K., Kowaluk G., Hric J., Beer P., (2007): “The change of laminated particleboard edge quality while sawing with progressing teeth wear”. In: *Proceedings of the 3rd International Symposium on Wood Machining*, Lausanne, Switzerland. pp. 163–166.

Paulo Alexandre Garcia de Sá, (2013): “Manual de utilização de derivados da madeira: influência das condições de maquinação na qualidade da aresta”. *Tese de Mestrado, Mestrado em Engenharia de Madeiras, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Instituto Superior Politécnico de Viseu*, Julho de 2013.

Pinheiro D., Vieira M.T., and Djouadi M.A., (2009): “Advantages of depositing multilayer coating for cutting wood-based products”, *Surface & Coating Technology*, vol. 203, pp. 3197-3205.

Porankiewicz B., (1988): “Mathematical model of edge dullness for prediction of wear of wood cutting tools”. In: *Proceedings of 9th wood machining seminar (WMS)*, UC Forest Products Laboratory, Richmond, USA, 1988:83–88.

Porankiewicz B., (1993): “Does exist the chemical corrosion of carbide cutting edge when milling particle board?” *Ann Agricultural Univ Poznan’ CCXLIX*: 59–69.

Porankiewicz B, Wagner K., (1997): “The study of high temperature corrosion of cemented carbide cutting edge after coated particle board processing using advanced surface analyzing methods”. In: *Proc of 13th IWMS, Vancouver, Canada*, pp 651–657.

Porankiewicz B., (1997a): “Variation in composition of micro-grain cemented carbide, and its impact on cutting edge wear during particle board machining”. In: *Proc of 13th IWMS, Vancouver, Canada* pp 791–799.

Porankiewicz B., (1997b): “The simulation of high temperature corrosion of components of cemented carbide cutting edge in contact with particle board”. In: *Proc of 13th IWMS, Vancouver, Canada*, pp 779 -790.

Porankiewicz B., (1998): “Investigation of chemical wear of cemented carbide cutting edges by processing board materials”. *Project Report No. MR/USDA-95-219*, p 32.

Porankiewicz B., Tanaka C. (2001): “The work piece edge quality after milling melamine-coated particleboard”. *Mem. Facul. Sci. Eng. Shimane Univ. A*, 35: 139-147.

Porankiewicz B., Wieloch G., (2008): “Drill wear during the boring of particle board: a multi-factor analysis including effects of mineral contaminants”. *BioResources* 3, 425–436.

Ratnasingam J., T.T. Chew and S.R. Farrokhpayam, (2008): “Tool wear characteristics of oil palm empty fruit bunches (EFB) particleboard”. *J. Applied Sci.*, 8: 1594-1596.

Riegel A., (1993): “Quality measurements in surface technologies. International Conference on Woodworking Technologies”, Conference at the Ligna 1993, Hannover, Germany. April 20-23. pp. 23.1-23.10.

Riegel A., (1995): “Phenomenology of edge breakage during peripheral milling of Kaurit-formaldehyde particleboards”. Holz als Roh und Werkstoff 53(5): 288.

Saljé E. & Stühmeier W., (1983a): “Effect of gross density and sand content on the cutting property of chip boards when milling”. Holz-Zentralblatt, vol. 109, No. 135, pp. 1912-1913.

Saljé E. & Stühmeier W., (1983b): “Effect of gross density and sand content on the cutting property of chip boards when milling Part 2”. Holz-Zentralblatt, vol. 109, No. 136, pp. 1930-1931.

Saljé E. & Drückhammer, J., (1984): “Quality control during edge machining”. (Qualitätskontrolle bei der Kantenbearbeitung). Holz-als-Roh-und-Werkstoff. Vol. 42, No. 5, pp. 187-192.

Saljé E., (1984): “Economic aspects and quality characteristics in woodworking”. (Wirtschaftlichkeitsfragen und Qualitätsmerkmale bei der Holzbearbeitung). Holz-als-Roh-und-Werkstoff, Vol. 42, No. 5, pp. 161-167.

Saljé E., Drückhammer J. & Stühmeier W., (1985): “Milling of particleboard under various cutting conditions”. Holz-als-Roh-und-Werkstoff. Vol. 43, No.12, pp. 501-506.

Saljé E. and Stuehmeier W., (1988a): “Milling particleboard with high hard cutting materials”. In: Proceedings of the Ninth International Wood Machining Seminar. University of California Forest Products Laboratory, Richmond, California, October 10-12, pp 211–228.

Saljé E., Stühmeier W., (1988b): “Milling laminated chipboard with tungsten carbide and PDC”, Industrial Diamond Review 4/88.

Sheikh-Ahmad J. Y., Stewart J. S., Bailey J. A., (1995): “Performance of different PVD coated tungsten carbide tools in the continuous machining of particleboard”. Proceeding of the 12th International Wood Machining Seminar, October 2-4, 1995, Kyoto, Japan.

Sheikh-Ahmad J. and McKenzie, W., (1997): “Measurement of tool wear and dulling in the Machining of particleboard”. In: Proceeding of the 13th International Wood Machining Seminar. 17–20 June, 1997, Vancouver, Canada. pp. 659-670.

Sheikh-Ahmad J.Y., Bailey J.A., (1999a): “High-temperature wear of cemented tungsten carbide tools while machining particleboard and fibreboard”. *J. Wood Sci.*, 45 (6), 445-455.

Sheikh-Ahmad, J. Y., Bailey JA (1999b): “The wear characteristics of some cemented tungsten carbides in machining particleboard”. *Wear* 225-229:256-266.

Sinn G., Beer P., Stanzl-Tschegg S., (2006): “Analysis of cutting forces in circumferential flat milling of MDF and particleboard”, *Proc. of the Int. Conference on Integrated. Approach to Wood Structure, Behaviour and Applications*, Florence, Italy.

Sinn G., Beer P., Gindl M., and Stanzl-Tschegg, S., (2008): “Wedge splitting experiments on three-layered particleboard and consequences for cutting,” *Holz als Roh- und Werkstoff* 66, 135-141.

Son M.J., Kang S.S., Lee E.A. and Kim, K.H., (2002): “Properties of TiBN coating on the tool steels by PECVD and its applications”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 130-131, pp. 266-271.

Sparks AJ., Taylor V., (1981): “Chip board machinability. Part 1: the effect of cut on cutter wear”. FIRA, no 928/271/81, UK.

Stewart H., (1988): “Tool Forces and Edge Recession from Cutting Medium Density Fiberboard,” *Forest Products Journal*, Vol. 38, No. 4, p. 51 – 54.

Stühmeier W., (1989): “Fräsen von Spanplatten mit hochharten Schneidstoffen”. TU Braunschweig, F-B VDI R.2, no 181, pp 191.

Suetsugi Y., Ando K., Hattori N., Kitayama S., (2005): “A tool wear sensor for circular saws using wavelet transform signal processing”. *Forest Product J.* 55(11): 79-84.

Sugihara H., Okumura S., Haoka M., Ohi T., Makino Y., (1979): “Wear of tungsten carbide tipped circular saws in cutting particleboard: effect of carbide grain size on wear characteristics”. *Wood Sci Technol* 13:283-299.

Świdorski B., Kurek J., Osowski S., Kruk M., and Jegorowa A., (2017): "Diagnostic system of drill condition in laminated chipboard drilling process," in: 21st International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers, Crete, Greece, pp. 1-6.

Szwajka K., Górski J., (2006): “Evaluation tool condition of milling wood on the basis of vibration signal”. *J Phys: Conf Ser* 48: 1205-1209.

Szwajka K., (2014): “Analysis of the delamination in drilling of particleboard.” *Scientific Letters of Rzeszow University of Technology - Mechanics* 31: 621-628.

Szwajka K., and Trzepieciński T., (2016): “Effect of tool material on tool wear and delamination during machining of particleboard,” *Journal of Wood Science* 62(4), 305-315. DOI: 10.1007/s10086-016-1555-6.

Szwajka K., and Trzepieciński T., (2017): “The influence of machining parameters and tool wear on the delamination process during milling of melamine-faced chipboard,” *Drew no* 60(199), 118–131. DOI: 10.12841/wood.1644-3985.189.

Thomas T.R. and M. King, (1977): “Surface topography in engineering - a state of the art review and bibliography”. *Cotswold Press LTD*, ISBN-13: 978-0900983665.

Thomas T. R., (1999): “Surface Roughness”, 2nd Edition, *Imperial College Press*, London, England, ISBN: 1-86094-100-1, 278 pages.

Tröger J., & Lauter G., (1983): "Cutting productivity and power during milling of particleboard with herringbone - or helical-toothed tools". *Holztechnologie*. Vol. 24, No. 4, 203-206.

Wang X., (2000): "An Experimental and Numerical Investigation of the Machining of Anisotropic Materials Including Wood and Wood Composites". Doctoral Thesis, North Carolina State University, NC.

Wei W., Li Y., Xue T., Tao S., Mei C., Zhou W., Wang J., and Wang T., (2018): "The research progress of machining mechanisms in milling wood-based materials," *BioResources* 13(1), 2139-2149. DOI: 10.15376/biores.13.1.2139-2149.

Whitehouse D. J., (1994): "Handbook of Surface Metrology", Institute of Physics Publishing, London, England, ISBN: 0-7503-0039-6, 988 pages.

Whitehouse D. J., (2011): "Handbook of Surface and Nanometrology", 2nd Edition, CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL, U.S.A, ISBN: 1978-1-4200-8201-2, 976 pages.

Wilkowski J, Górski J., (2011): "Vibro-acoustic signals as a source of information about tool wear during laminated chipboard milling". *Wood Res-Slovakia* 56(1): 57-66. <http://www.woodresearch.sk/wr/201101/06.pdf>

Wong Darrell C., Schajer Gary S., (2007): "Particleboard Cutting Model". 18th International, Wood Machining Seminar, Vancouver, Canada.

Wong D. C., & Schajer G. S., (2003): "Effect of particle size on particleboard machining". In: *Proceedings of the international wood machining seminar, Matsue, Japan*.

Wong D. C., Schajer G. S., (2005): "Particleboard Machining Quality Improvement by Control of Particle Geometry", *Proceedings of the 17th International Wood Machining Seminar, Rosenheim, Germany*: 141-151.

Yang S.M., Chang Y.Y., Lin D.Y., Wang D.Y. and Wu W., (2008): “Mechanical and tribological properties of multilayer TiSiN/CrN coating synthesized by a cathodic arc deposition process”, Surface and Coating Technology, vol. 202, pp. 2176-2181.

Zhu N., Tanaka C., Ohtani T., Takimoto Y., (2004): “Automatic Detection of a Damaged Router Bit During Cutting”. Holz Roh Werkst 62: 126-130.

CAPÍTULO III

TEORIA DO CORTE

Madeira maciça e derivados

Introdução

As operações de corte nos Aglomerados de Partículas são complexas e dependentes de diversos parâmetros, tal como tivemos oportunidade de descrever no capítulo anterior. A variedade de opções para os parâmetros de entrada num processo de maquinação resulta em infinitas combinações, e há apenas três maneiras de lidar com tal complexidade: por meio da experiência adquirida por sucessivas tentativas e erros ao longo dos anos, além de comparações com situações análogas; por meio da experimentação, que é onerosa, demorada e restrita a uma determinada situação, não podendo ser generalizada; e por intermédio de modelos teóricos, que vão desde modelos matemáticos simplistas até sofisticados modelos numéricos. Em geral, nenhuma dessas abordagens é capaz de, sozinha, encontrar soluções satisfatórias, sendo recomendada a combinação de duas delas, ou mesmo das três abordagens.

Um aspeto crítico no corte da madeira e dos seus derivados, prende-se com a adequação das máquinas e ferramentas às diferentes tipologias de corte. A contribuir para esta dificuldade, não é alheio o facto da madeira e a maioria dos produtos fabricados à base de madeira, apresentarem uma heterogeneidade significativa e uma anisotropia acentuada, ou seja, propriedades distintas nas três direcções fundamentais (L , R , T). Devido a estas características, estes materiais apresentam, por isso, um comportamento mecânico diferenciado e planos de corte distintos. Além disso, não existe actualmente nenhum ensaio ou procedimento normalizado, que permita a determinação dos parâmetros de maquinação na madeira ou derivados, segundo uma base científica. Em termos práticos, a investigação tem contribuído para a melhoria dos processos com vista à otimização das diferentes operações de corte. Todavia, reconhecemos que é necessário ainda, um conhecimento mais profundo sobre os fenómenos envolvidos no corte, sobretudo no que diz respeito aos Aglomerados de Partículas. Um caso paradigmático desta situação é a análise dos parâmetros de corte nas serras de disco, que são intensamente usadas na maquinação da madeira e derivados.

Neste capítulo, pretendemos fornecer uma visão geral sobre a teoria do corte que tem vindo a ser aplicada aos Aglomerados de Partículas. Em particular, será dado destaque à análise das forças e condições de corte envolvidas na maquinação com serras de disco, uma vez que estas serão mais tarde usadas na expressão dos resultados experimentais. Um pequeno apontamento sobre a mecânica de corte associada à madeira maciça será também aqui apostado na primeira secção deste capítulo, sendo que, tem apenas o propósito de inferir da madeira

maciça, alguns conceitos teóricos que possam ser transpostos para o corte dos Aglomerados de Partículas.

3.1 Mecânica do corte na madeira maciça

A influência das propriedades mecânicas e da estrutura anisotrópica da madeira nas forças de corte tem sido matéria de investigação em numerosos estudos (Kivimaa, 1950; McKenzie, 1960; Stewart 1969, 1971, 1979; Morri 1971; Inoue e Mori, 1979; Axelsson *et al.*, 1993; Eyma *et al.*, 2001, 2004; B. Bučar e D. Bučar 2002; Boucher *et al.*, 2007; Porankiewicz *et al.*, 2007; Goli *et al.*, 2009a,b; Zhang *et al.*, 2021). Os objetivos destes estudos centraram-se fundamentalmente na determinação da força específica de corte (k_c), por se tratar de um parâmetro tecnológico relevante para o processo de maquinação.

Nas últimas décadas, alguns investigadores têm continuado a insistir na importância da influência das propriedades físico-mecânicas e estruturais da madeira maciça nas forças de corte. Destacam-se aqui, pela sua pertinência científica, os trabalhos de Cristóvão *et al.*, 2011; Moradpour *et al.*, 2013; Porankiewicz e Goli, 2014; Goli *et al.*, 2018; Curti *et al.*, 2018.

Outros estudos visaram fundamentalmente o desenvolvimento de modelos de corte, e concentraram a sua atenção na influência das condições de maquinação nas forças envolvidas, considerando diversos processos de transformação da madeira (Kivimaa, 1950; McKenzie, 1960, 1967; Gonçalves *et al.*, 1997; Costes *et al.*, 2004; Cristóvão *et al.*, 2011; Kujick *et al.*, 2013).

Na revisão da literatura, verificamos ainda que para além do efeito das propriedades do material e das condições de maquinação na magnitude das forças de corte, a qualidade de superfície e a formação da aparas são igualmente temas de investigação extensivamente estudados, tanto teórica quanto experimentalmente (Woodson, 1970; Ohta e Kawasaki, 1995; Sawada e Ohta 1995; Aguilera e Martin, 2001; Marchal *et al.*, 2009; Coelho 2005; Coelho *et al.*, 2005, 2008, 2011; Wang *et al.*, 2015).

A partir destes trabalhos, percebemos que as forças de corte, podem ser identificadas por três componentes fundamentais: a força de corte principal (F_C); a força de avanço (F_A); e a força de fricção promovida na aresta do dente (F_L). Cada uma destas forças é influenciada pelas propriedades da madeira, geometria de corte e parâmetros de corte.

Para a medição das forças de corte vários métodos têm vindo a ser usados, tais como: dinamómetros, transdutores piezoelétricos e extensómetros (Moradpour *et al.*, 2016). Para a medição de F_C têm sido frequentemente usados métodos indirectos baseados na medição da energia elétrica de corte, determinada através da medição da corrente consumida pelo motor (Ãbele e Tuherm, 2014), e na energia de corte mecânico medida a partir do binário do eixo da máquina (Krilek *et al.*, 2014).

Outras abordagens têm sido usadas para a previsão das forças de corte, e consistem em usar a mecânica de fratura (Atkins 2009). Para a abordagem baseada na mecânica da fratura é necessário o conhecimento da resistência da madeira, do atrito entre a ferramenta e a peça de trabalho, da resistência à fratura e do campo das tensões de corte. Recentemente, a mecânica da fratura tem sido usada para determinação analítica da energia de corte na serragem com recurso a serras de disco (Orlowski *et al.*, 2013a, 2013b, 2014; Orlowski e Ochrymiuk 2017). A partir da energia de dissipação causada pela criação de uma nova superfície e pela compressão da madeira por baixo do dente da serra de disco, Hellström *et al.*, (2014), desenvolveram um modelo para previsão da energia de corte (citado em Nasir V. e Cool J., 2018).

Mais recentemente (Zhang *et al.*, 2021), realizaram uma série de experiências de corte em madeira de maple (*Acer saccharum*), tendo utilizado para o efeito ferramentas pontiagudas de formato cónico, com o objetivo de investigarem o tipo de superfície criada e o correspondente comportamento ao corte. As ferramentas utilizadas possuíam ângulos de vértice $2\alpha= 84^\circ$ e $2\alpha= 108^\circ$ e foram selecionados com vista a esclarecer o efeito de ângulos de inclinação negativos. A ferramenta com ângulo $2\alpha= 108^\circ$ fez com que as fibras menos fraturadas se projetassem da superfície superior. A porosidade da madeira foi enfatizada, e foi estabelecido um modelo analítico de deformação elástica para esta tipologia de corte. A relação média das forças de corte com a ferramenta de ângulo $2\alpha= 84^\circ$ foi visivelmente superior, e conduziu a melhor desempenho de corte. Estes investigadores concluíram que comparando com experiências em materiais metálicos, a evidente capacidade de absorção de energia do ácer é responsável pela energia específica de corte relativamente alta.

3.1.1 Variabilidade da madeira

A variabilidade da madeira representa uma enorme dificuldade na caracterização de algumas propriedades importantes no seu desempenho, e particularmente na sua maquinaria. Esta situação é tanto visível na sua forma maciça original, como na forma de madeira

aglomerada, como veremos no capítulo dedicado à influência do *mix* no corte dos Aglomerados de Partículas (Capítulo V). A madeira é considerada como um material anisotrópico com propriedades distintas nas três direções fundamentais, conhecidas no referencial de simetria material como *LRT*. Este referencial é definido em cada ponto pela direção longitudinal das fibras (*L*), pela direção radial dos anéis de crescimento (*R*) e pela direção tangencial aos anéis de crescimento (*T*). A composição da madeira e as suas propriedades nas direções fundamentais conduzem então a dois modos essenciais de rotura que podem ser provocados por fratura das fibras e ou por separação das fibras (Boatright *et al.*, 1983; Gibson *et al.*, 1988). Na árvore estas fibras são paralelas ao eixo longitudinal tal como está ilustrado na Figura 3.1. Estas fibras individuais possuem elevada rigidez e resistência ao longo do seu comprimento, embora estejam frouxamente ligadas às fibras adjacentes.

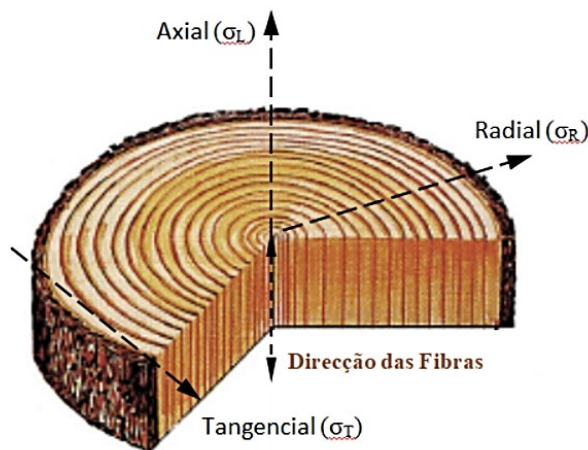


Figura 3.1 – Direções fundamentais na madeira (Garrido, 2006)

Refira-se que a resistência da madeira paralela às fibras (σ_L) pode ser 20 vezes maior em relação à direção transversal (σ_R) tal como é apresentado na Tabela 3.1. No caso da madeira maciça o seu comportamento pode ser previsto a partir da fórmula de Hankinson (Wong 2007; Wood Handbook, 2010):

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_L \sigma_R}{\sigma_L \sin^n \theta + \sigma_R \cos^n \theta} \quad (3.1)$$

onde σ_L representa a tensão na madeira na direção axial paralela às fibras, σ_R representa a tensão transversal relativamente ao fio da madeira, e σ_{θ} a tensão na direção correspondente a um ângulo θ em relação ao fio da madeira. As tensões σ_L e σ_R na madeira são tipicamente

medidas empíricas determinadas a partir de ensaios normalizados. O valor de n (Tabela 3.1) depende do tipo de solicitação a que o provete está sujeito (Wong, 2007).

Tabela 3.1 – Valores de n na equação de Hankinson (Wong, 2007; Wood Handbook, 2010)

Propriedade	n	σ_R / σ_L
Tensão de tração	1.5 – 2.0	0.04 – 0.07
Tensão de compressão	2.0 – 2.5	0.03 – 0.04
Tensão de flexão	1.5 – 2.0	0.04 – 0.10
Módulo de elasticidade	2.0	0.04 – 0.12
Dureza	1.5 – 2.0	0.06 – 0.10

Transpondo o exposto para o caso dos Aglomerados de Partículas, ou seja, se analisarmos teoricamente a dependência da composição das fibras e da direção (orientação) das partículas dentro do painel, verificamos que este fenômeno não pode ser negligenciado, uma vez que exerce uma importante influência nas propriedades físico-mecânicas, e particularmente no processo de maquinação. Esta situação conduz-nos a uma matriz de resistência complexa dentro do aglomerado, devido precisamente às distintas propriedades, tamanho e orientação de cada partícula (Wong, 2007).

3.1.2 Planos de corte

O corte convencional é definido como sendo a ação da ferramenta sobre uma peça de madeira, produzindo aparas de dimensões variáveis. Estas podem ser definidas como sendo o fragmento de madeira produzido pela ferramenta de corte. A formação destas aparas depende da geometria da ferramenta, do teor de humidade da madeira e do movimento da ferramenta em relação à orientação das fibras.

Existem dois tipos básicos de corte, o ortogonal e o periférico. O corte ortogonal é definido como sendo a situação na qual o fio de corte da ferramenta é perpendicular à direção do movimento da peça de madeira. A superfície obtida é um plano paralelo à superfície original. O corte periférico é produzido pelo corte sucessivo das ferramentas (lâminas ou dentes) instaladas na periferia de um porta-ferramentas (Carvalho A., 1996).

McKenzie (1960) definiu uma notação para o corte ortogonal com a utilização de dois números. O primeiro é o ângulo entre a aresta principal da ferramenta de corte e a direção das fibras da madeira; e o segundo define o ângulo entre a direção de corte e as fibras da madeira. Desta forma, ficam definidos três tipos de corte: 90° - 0° (situação paradigmática do aplainamento), 90° - 90° (reconhecida na serragem de abrir ao desfiar) e 0° - 90° (típica da operação de desenrolamento). Estas três direções principais de corte ilustram-se de seguida na Figura 3.2.

A qualidade da superfície maquinada está associada ao tipo de formação da aparas, a qual por sua vez está diretamente relacionada com o ângulo de saída da ferramenta, com a espessura de corte e com o valor e direção da força normal. No corte 90° - 0° , dependendo dos parâmetros de corte citados, podem ser obtidos três tipos distintos de aparas: Tipo I, Tipo II e Tipo III (Franz 1958).

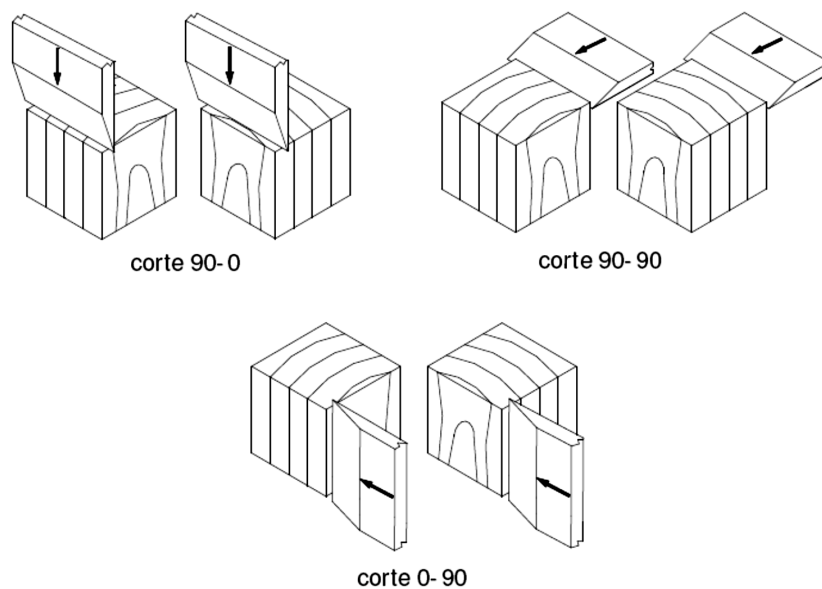


Figura 3.2 - Principais tipos de corte ortogonal (McKenzie, 1960)

No caso dos Aglomerados de Partículas o corte é essencialmente executado por meio de serras de disco (aproximada ao tipo 90° - 0° , ou 90° - 90° , dependendo da regulação em altura da serra de disco). Todavia, e como facilmente se pode depreender, as características específicas do Aglomerado de Partículas associado a esta tipologia de corte, sugerem que a interação da ferramenta com o material é bastante mais complexo do que na madeira maciça. Primeiro, a separação da aparas e a superfície de corte são originadas

Na indústria da madeira e derivados os processos de corte são realizados principalmente por serras circulares. Os dentes trabalham numa situação de corte próxima ao tipo $90^\circ-0^\circ$, sobretudo quando a serra é ajustada para fazer uma ranhura rasa, contudo, a condição de corte aproxima-se ao tipo $90^\circ-90^\circ$ quando a serra é utilizada na sua máxima altura, ou seja, quando a serra corta o mais próximo possível da sua parte central.

3.2.1 Características dos dentes

As serras de disco são caracterizadas por três componentes fundamentais: aresta do dente (f_β), face de corte (f_α) e costa do dente (f_γ), e por três ângulos: de ataque (α), interno (β) e de saída (γ), conforme se ilustra na Figura 3.4. A ponta do dente, aresta ou gume da ferramenta, é responsável pelo corte efetivo. A face interna é a superfície da ferramenta sobre a qual as aparas fluem, e a costa do dente, ou face de saída, é a superfície da ferramenta que passa pela superfície já maquinada. A interação da ferramenta com a matéria a cortar é distinta em cada uma destas áreas devido às características do material que provém em cada face ser significativamente diferente, situação que se aplica também aos Aglomerados de Partículas. O ângulo de ataque (α) controla a ação da aresta da ferramenta (f_α). Em geral, quanto maior é este ângulo, menores são as forças de corte envolvidas na maquinação e conseqüentemente torna-se mais fácil cortar a madeira ou aglomerados. O ângulo interno (β) controla a resistência da aresta de corte da ferramenta, e em geral, quanto maior for o ângulo interno maior será a durabilidade da aresta de corte da ferramenta. O ângulo de saída (γ) controla o espaço necessário para a passagem da parte posterior da ferramenta de corte durante a maquinação, e deverá ter um valor mínimo e suficiente para evitar o contato da superfície da ferramenta com a peça de material a cortar.

O somatório do ângulo de ataque (α) com o ângulo interno (β) e o ângulo de saída (γ) é 90° . A escolha individual de cada um destes ângulos é feita pelo equilíbrio entre os benefícios e os efeitos que cada um oferece à maquinação. Em geral, a seleção do valor para o ângulo de saída é feita com base na dimensão suficiente para que a costa do dente não esbarre na superfície maquinada e fique sujeita a elevadas forças de fricção. O ângulo de ataque e interno são selecionados tendo em conta o equilíbrio entre a facilidade de corte e a durabilidade da ferramenta. Já em relação à altura de corte (h_c), que é a quantidade de material maquinado e removido pela ferramenta, e para a situação frequente de maquinação representada na Figura 3.3, o valor de h_c é igual à espessura do Aglomerado de Partículas.

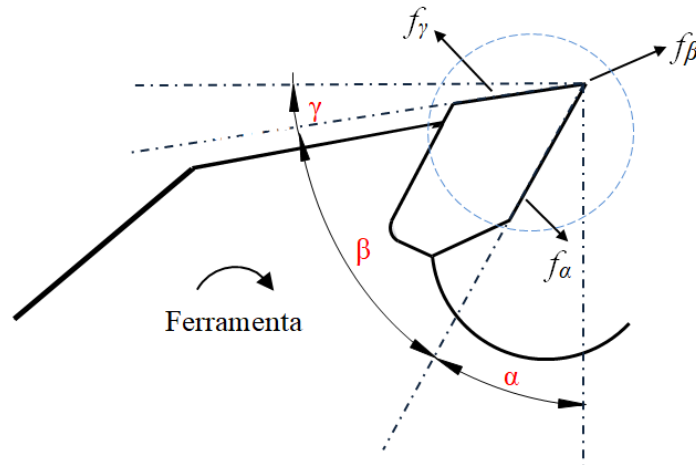


Figura 3.4 – Representação dos ângulos característicos dos dentes (Garrido N., 2006)

(γ - ângulo de saída da ferramenta - ângulo entre a superfície de saída e o plano perpendicular a superfície maquinada; α - ângulo de ataque - ângulo formado entre a superfície principal da ferramenta e a superfície maquinada; β - ângulo interno ou ângulo da ferramenta).

O valor da altura de corte (h_c) está diretamente relacionado com as forças implicadas no processo de corte, uma vez que a altura de corte define as condições de tensão e resistência na aparta. Em geral, maior altura de corte corresponde a maior resistência na sua remoção. Wong (2008), mostrou que a profundidade de corte e a resistência da aparta definem as características da formação da aparta dos aglomerados, numa tipologia de corte 90^0-0^0 .

Na Tabela 3.2 apresentam-se os valores característicos dos ângulos de ataque (α) de saída (γ) e de corte (β) em função das espécies de madeira e de derivados.

Tabela 3.2 - Valores dos ângulos de ataque (α) de saída (γ) e de corte (β) em função das espécies de madeira/derivados (Garrido N., 2006)

Espécies de madeira/derivados	α	β	γ
Madeiras Resinosas: pinho	+27°	+47°	+16°
Madeiras exóticas de dureza média: acajú, sipó, niangon	+24°	+52°	+14°
Madeiras exóticas abrasivas: meranti, makoré e painéis de partículas	+21°	+56°	+13°
Madeiras exóticas duras: izombé, doussié	+18°	+60°	+12°
Contraplacados	+15°	+63°	+12°
Painéis de partículas revestidos a estratificados e resinas sintéticas	+9°	+70°	+11°
Materiais laminados, materiais plásticos	+5°	+76°	+9°

Para além das características geométricas dos dentes anteriormente descritas, as serras de disco apresentam uma grande variedade de diâmetros, espessuras, número de dentes e formatos de dentes.

Os diâmetros das serras de disco estão compreendidos entre 200 e 600mm, o que permite cortar praticamente todas as espessuras correntes de madeiras maciças e derivados, entre 15 a 80 mm. A sua espessura (e_d) varia com o diâmetro na relação: $e_d = 0.2 \times \sqrt{D}$ (mm), e normalmente a diferença entre a espessura do dente e o corpo da lâmina é de 0,5mm para cada lado.

Em relação ao número de dentes, e no caso da serragem de Aglomerados de Partículas revestidos, é necessário utilizar serras que tenham um maior número de dentes possível para garantir uma boa qualidade de acabamento da aresta. Porém, e por razões técnicas, não se devem usar serras de disco com pastilhas de carboneto metálico com uma distância entre os dentes (passo) inferior a 12mm. Ensaio de serragem mostraram que um exagerado número de dentes pode ocasionar esforços suplementares que aumentam o consumo energético (Garrido, 2004). Por conseguinte, o número de dentes em relação à altura ou espessura a serrar deverá ser de dois independentemente da dureza da madeira ou derivados a cortar (Figura 3.5).

Quanto ao tipo de dentes, as serras de disco podem ser classificadas em serras de dentes simples (perfilados no disco) ou serras de dentes empastilhados (atualmente as mais usadas). Os dentes apresentam-se em vários modelos e os mais comuns são os fabricados com ponta de metal duro, normalmente de carboneto de tungsténio. A forma dos dentes é de particular importância, uma vez que existe uma relação direta entre a configuração, a natureza do material a cortar e a qualidade da aresta (Garrido N., 2006).

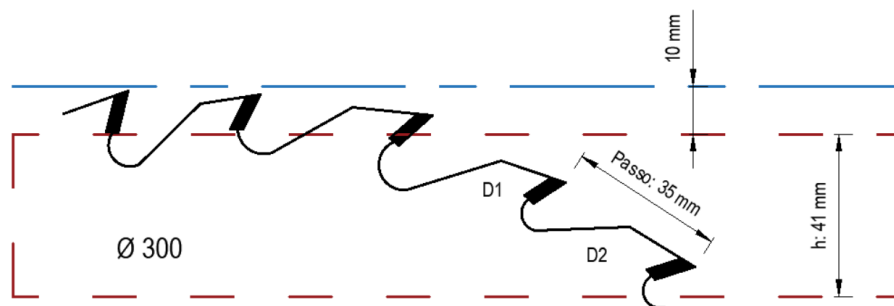


Figura 3.5 – Exemplo da posição dos dentes em relação à espessura do material (Garrido N., 2006)

3.2.2 Determinação da velocidade de corte e velocidade de avanço

Um das principais características de corte de uma serra circular é o seu vetor velocidade de corte (V_c). Este é tangencial ao círculo de corte e perpendicular ao raio da serra, conforme se encontra atrás ilustrado na Figura 3.3. A velocidade de corte é então definida como sendo a

velocidade instantânea da aresta cortante da ferramenta segundo a direção e o sentido de corte (Garrido, 2006). O vector V_c pode ser determinado a partir da seguinte fórmula:

$$V_c = \frac{\pi \times D \times R}{60} \quad (3.2)$$

onde:

V_c = velocidade de corte (m/s);

D = diâmetro da serra circular (m);

R = velocidade de rotação (rpm).

Daqui facilmente se verifica, que para manter valor de velocidade de corte constante, quando se aumenta o valor do diâmetro da ferramenta, a rotação da serra deverá diminuir na mesma proporção. Isto é muito importante para as serras circulares, pois deve-se manter a velocidade de corte apropriada de acordo com o processo, material e ferramenta selecionada. Por conseguinte, a V_c é normalmente escolhida em função do material da ferramenta, da operação a ser realizada, da condição do equipamento e do material da peça. Os fabricantes de ferramentas recomendam uma faixa de velocidades características para o corte de cada material. Na Tabela 3.3 apresentam-se valores para as velocidades de corte habitualmente usados em função do tipo de material a cortar.

Tabela 3.3 - Valores aproximados para as velocidades de corte recomendadas atendendo ao tipo de material a cortar (Garrido N., 2006)

Materiais a cortar	Velocidade (m/s)
Madeira natural	60 - 100
Contraplacados	50 - 90
Aglomerados de Partículas	40 - 80
Placas Revestidas a materiais sintéticos	30 - 70
Material sintético, papel duro	20 - 60
Matérias minerais	10 - 50

Outro parâmetro de maquinaria importante para o corte da madeira e derivados, é a velocidade de avanço (A). Esta é definida como sendo a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido de avanço (Nazir e Cool, 2018). A velocidade de avanço é dependente da velocidade de rotação (R), do número de dentes (Z) e do avanço por dente (f_z). Como as lâminas das serras circulares possuem mais de um dente, distingue-se aqui o avanço por dente (f_z), que representa o percurso de avanço de cada dente medido na direção do avanço da ferramenta (correspondente à geração de duas

superfícies consecutivas). A partir da velocidade de avanço determina-se f_z através da seguinte fórmula:

$$f_z = \frac{A \times 1000}{R \times Z} \quad (3.3)$$

onde:

f_z = avanço por dente expresso em (mm);

A = velocidade de avanço expressa em (m/min);

R = velocidade de rotação (rpm);

Z = número de dentes da serra.

Como vimos no capítulo anterior, quer a velocidade de corte, quer a velocidade de avanço e velocidade de avanço por dente, têm uma significativa influência na maquinação dos Aglomerados de Partículas. Estes parâmetros afetam particularmente a qualidade da aresta maquinada e a durabilidade da ferramenta (Saljé 1984; Saljé e Drückhammer 1984; Saljé *et al.*, 1985; Licher 1991; Szwajka e Trzepieciński 2017; Chladil *et al.*, 2019). O efeito de V_c e f_z nas forças corte é também considerado de extrema importância para o corte dos aglomerados, uma vez que podem contribuir para a otimização das condições de maquinação (Sinn *et al.*, 2005; Kowaluk *et al.*, 2006; Kowaluk 2007; Szwajka e Trzepieciński 2017). [ver estas referências bibliográficas no Capítulo II].

3.2.3 Análise das forças de corte na serra de disco

A maquinação é um processo baseado na tensão de rotura imposta à madeira ou derivados, por ação humana ou mecânica. A orientação e a direção das forças são definidas pelo tipo de ferramenta de corte e pela actuação do operador ou da máquina. A direção do movimento e a forma da ferramenta determinam o desenvolvimento de tensões impostas à madeira, e conseqüentemente a maneira como vai ocorrer a rotura ou “corte”. Dois factores principais influenciam a rotura: a) A superfície de corte (S), que deve ser suficientemente pequena para que a força aplicada (F) com a ferramenta possa provocar uma tensão (F/S) superior à resistência do material a cortar; b) As condições (tratando-se da madeira maciça) relativamente à humidade, temperatura, presença de defeitos, etc. (Garrido N., 2006).

A força de maquinação é definida como sendo ação da peça sobre a ferramenta (ou vice-versa), a qual é responsável pela deformação local do material, dando origem à aparta. Esta força, (como já referimos), pode ser decomposta em três forças: força de corte (F_C), força de avanço (F_A) e força de fricção na aresta do dente (F_L). A F_C actua ao longo do vector

velocidade de corte (V_C), enquanto a F_L actua perpendicularmente a este vector. Estas duas forças são opostas à força que é imposta ao avanço do material (F_A) contra a serra circular (Figura 3.6). Pela cinemática de corte pode-se assumir teoricamente que os dentes da serra movem-se a uma V_C constante ao longo da sua trajectória circular. O movimento de rotação da ferramenta de corte (R) em conjunto com uma estável e constante velocidade de avanço (A), conduzem a uma variação na espessura da apara ($h_{\min} - h_{\max}$).

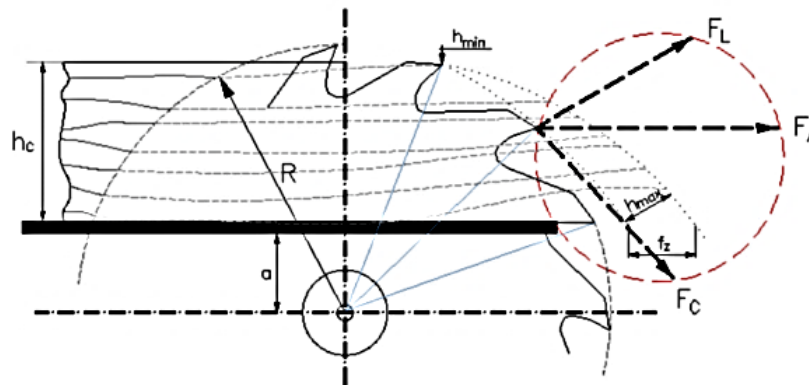


Figura 3.6 – Forças actuantes na serra circular (adaptado Hlásková *et al.*, 2019)
(F_C = força de corte (N); F_A = força de avanço (N); F_L = força de fricção (N))

A força de corte (F_C) pode ser determinada através das relações energéticas que ocorrem durante o processo de corte (Krilek *et al.*, 2014). Em termos práticos a força de corte que atua nos dentes da serra de disco pode ser obtida multiplicando a força específica de corte necessária para a desintegração do material (K_c), pela área da superfície transversal da apara ($b \times h$), tomando ainda em consideração a velocidade de corte (V_C) e a velocidade de avanço (A). A força de corte (F_C), expressa em *Newton*, pode ser escrita então, na seguinte forma:

$$F_C = \frac{K_c \times b \times h \times A}{60 \times V_c} \quad (3.4)$$

Para os Aglomerados de Partículas as forças geradas na interação da ferramenta durante o processo de maquinação são especialmente importantes, uma vez que quando estas excedem a rigidez das partículas e a respetiva encolagem no painel, uma fratura localizada dá origem ao corte (início da maquinação). As forças são geradas por interações provocadas pela ferramenta e estão inerentes ao movimento circular. O mecanismo de rotura é portanto, determinado pela resistência relativa das partículas de madeira e das resinas. O mecanismo de rotura no agregado é importante porque determina a qualidade da superfície maquinada. Quando a rotura se dá por quebra das ligações nas resinas, as partículas de madeira são arrastadas para fora do painel provocando zonas de vácuo e superfícies rugosas. Quando a rotura se dá pelas partículas, não há origem a zonas de vácuo e o resultado é uma superfície

relativamente lisa. É muito difícil prever ou estabelecer um modelo das forças ou tensões durante a maquinação dos aglomerados. A razão está na forte variabilidade da matéria-prima e nas múltiplas e distintas interações da ferramenta, que representam um verdadeiro desafio, quando comparado, por exemplo, ao processo de corte dos metais. Tratando-se de um material heterogêneo, e mesmo quando se confronta com outros compósitos, o Aglomerado de Partículas possui particularidades que se prendem com as propriedades do *mix* da sua composição, com a variação nos tamanhos das partículas, com as dificuldades no seu recobrimento na colagem, e com as suas zonas de vácuo típicas. A variabilidade destas propriedades são por isso um permanente desafio, porque podem induzir em comportamentos completamente inesperados na maquinação e originar problemas na qualidade da superfície, ou na qualidade da aresta (Wong, 2007).

A partir das forças de corte é possível calcular a potência de corte (P_C) por meio da expressão (Krilek *et al.*, 2014):

$$P_C = F_C \times V_C \quad (3.5)$$

onde:

P_C = potência de corte expressa em ($W=N \cdot m \cdot s^{-1}$);

F_C = força de corte expressa em (N);

V_C = velocidade de corte ($m \cdot s^{-1}$);

Outra forma de definir a potência de corte pode ser pelo binário do motor (M_K) de acordo com a equação:

$$P_C = \frac{2 \times M_K \times V_C}{D} \quad (3.6)$$

onde:

M_K = binário do motor expresso em (N.m);

D = diâmetro da ferramenta em (m);

A partir da potência de corte (P_C) pode-se facilmente calcular a energia específica de corte (Es).

A energia específica de corte (Es) é uma variável importante a ser avaliada uma vez que pode contribuir para que as máquinas sejam eficientes no processamento mecânico sem desperdícios energéticos. A rigorosa determinação da Es pode também evitar sobrecargas que

podem originar interrupções indesejáveis na produção. A energia específica (E_s) é calculada por meio da razão entre a potência de corte (P_c), em *Watt*, e a taxa de remoção de material em cm^3 . A taxa de remoção corresponde ao volume de material que é removido num determinado intervalo de tempo. É possível obter a energia específica de corte por meio da potência ativa adquirida com um analisador de corrente, uma vez que este permite fazer a leitura precisa da energia consumida durante o corte (Zhang *et al.*, 2021). A energia específica de corte (E_s), é então definida por:

$$E_s = \frac{P \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt}{V} \quad (3.7)$$

onde:

E_s = Energia específica de corte (J/cm^3)

P_c = Potência de corte (Watt)

V = Volume de material removido (cm^3)

t = Tempo (s)

As variáveis de processo, como velocidade de avanço (A), velocidade de corte (V_c), número de dentes da ferramenta (Z), tipo de máquina e velocidade de rotação (R), interferem na energia que é requerida ao realizar o corte. Verifica-se igualmente, que as características do material processado mecanicamente, como por exemplo a densidade e a resistência interna, são também importantes fontes de variação sobre a energia requerida, uma vez que alteram a resistência ao corte do material.

3.2.4 Tensões na serra de disco

Durante o movimento de rotação a serra de circular é sujeita a dois tipos de tensões: a tensão radial σ_r , e a tensão tangencial σ_t (Figura 3.7). A tensão radial (σ_r) é provocada pelas forças de inércia resultantes do rápido movimento de rotação, e que tem em conta a massa da serra circular. A tensão tangencial (σ_t) é devida ao comportamento mecânico provocado pela deformação radial e pelo coeficiente de Poisson. A solução geral para a tensão radial (σ_r) e para a tensão tangencial (σ_t), para qualquer posição/raio (r) do disco pode ser encontrada a partir das seguintes equações 3.8 e 3.9 (Paiva, 2016). As constantes A e B podem ser determinadas a partir das condições fronteira na aresta do disco:

$$\sigma_r = A - \frac{B}{r^2} - (3 + \nu) \frac{\rho \omega^2 r^2}{8} \quad (3.8)$$

$$\sigma_t = A + \frac{B}{r^2} - (1 + 3\nu) \frac{\rho \omega^2 r^2}{8} \quad (3.9)$$

A serra circular é frequentemente considerada como um *prato aneliforme*, com raio interno (R_i) e raio externo (R_e), assumindo as condições fronteira $\sigma_r=0$ @ R_i e $\sigma_r=0$ @ R_e (Paiva, 2016). Desta forma, a partir das equações anteriores, a tensão em qualquer posição do raio (r) pode ser apresentada pelas seguintes expressões:

$$\sigma_r = (3 + \nu) \frac{\rho \omega^2}{8} \left[R_i^2 + R_e^2 - \frac{R_i^2 R_e^2}{r^2} - r^2 \right] \quad (3.10)$$

$$\sigma_t = \frac{\rho \omega^2}{8} \left[(3 + \nu) \left(R_i^2 + R_e^2 - \frac{R_i^2 R_e^2}{r^2} \right) - (1 - 3\nu)r^2 \right] \quad (3.11)$$

Para aumentar a estabilidade lateral da serra de disco, a mesma passa por um processo designado por tensionamento (Figura 3.8).

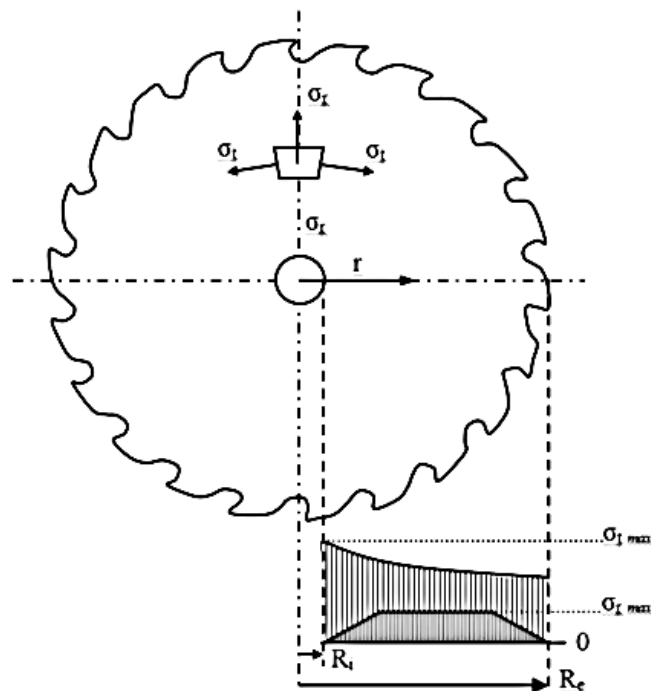


Figura 3.7 – Direção e amplitude das tensões radiais e tangenciais no disco (adaptado de Paiva, 2016)

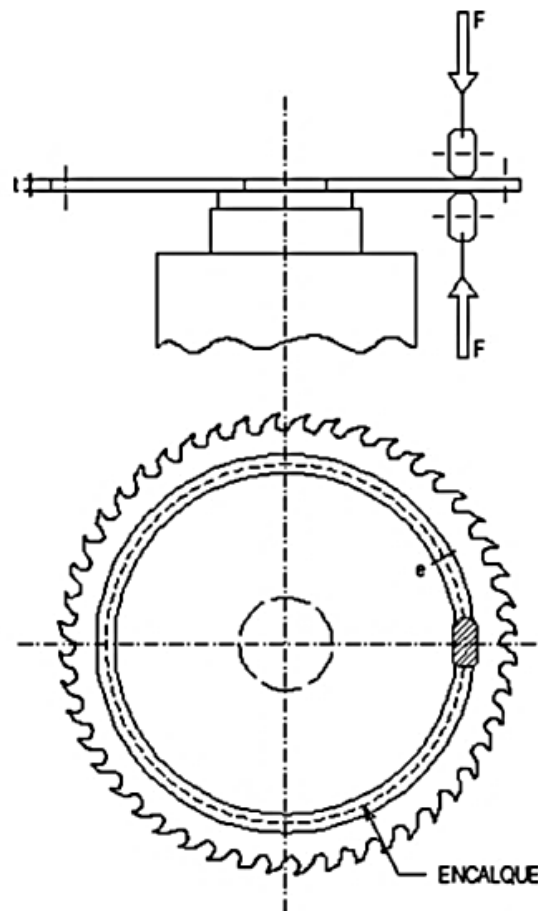


Figura 3.8 – Ilustração do sistema de tensionamento (adaptado de Paiva, 2016)

O processo de tensionamento consiste em aplicar uma deformação plástica na direção tangencial através da compressão de 2 rolos. Um ou os dois rolos são acionados, fazendo com que a serra gire lentamente e crie na sua superfície um encalque de raio constante pouco profundo em cada lado da serra. O material na região de contato sofre uma deformação plástica, dando origem a um anel de deformação que induz diferentes tensões nas direções radial e tangencial da serra, e nas regiões internas e externas ao anel. O estado de tensão gerado em cada região da serra é fundamental para garantir o bom comportamento dinâmico da serra. Este processo é extremamente importante, particularmente para o corte dos Aglomerados de Partículas, uma vez que um correto tensionamento promove maior estabilidade na serra de disco, e conseqüentemente forte influência na qualidade da aresta de corte.

3.3 Considerações finais

Os conceitos teóricos aplicados na maquinação da madeira maciça podem ser transpostos (com os necessários ajustamentos), para o processo de corte nos Aglomerados de Partículas, pelo menos no que diz respeito à geometria de corte com recurso a serras disco. Todavia, a adequação destas conceções teóricas aos aglomerados é muito complexa, particularmente por via da composição e orientação do material, da existência de zonas de vácuo, da pulverização das aparas e da formação descontínua da aparas durante o corte, que são tipicamente características únicas deste material. A interação com o material depende da fração de ferramenta que está em contato com o aglomerado, uma vez que quando o aglomerado é maquinado é dividido em dois produtos bem distintos: a aparas e o material acabado. As aparas são tipicamente comprimidas até à rotura e desagregam-se após a ferramenta passar através delas, e por outro lado, a superfície acabada é também comprimida, mas na passagem da ferramenta esta permanece coesa e lisa. Se analisarmos microscopicamente o corte dos aglomerados numa serra de disco, verificamos que inicialmente existe uma tensão linear elástica que rapidamente conduz à rotura da partícula ou ligação da resina. Esta situação provoca a abertura de fendas que originam diferentes modos de fratura. Por outro lado, a geometria angular da ferramenta, a profundidade de corte, a velocidade de corte e avanço, têm grande influência nas forças de corte e na qualidade da superfície maquinada. Concretizando, uma completa compreensão da maquinação dos Aglomerados de Partículas requer um exame detalhado do processo de corte, que inclua, quer as complexas características intrínsecas do material, quer os aspectos fenomenológicos das condições de maquinação.

3.4 Referências bibliográficas

Ãbele A., Tuherm Henn., (2014): “Relationship between mechanical and electric cutting power at longitudinal sawing”. *Research for Rural Development*. 2. 115-121.

Aguilera A., Martin P., (2001): “Machining qualification of solid wood of *Fagus silvática* L. and *Picea excelsa* L.: cutting forces, power requirements and surface roughness”. *Holz-als-Roh-und-Werkstoff*, vol. 59 no. 6, p. 483-488.

Atkins A.G., (2009): “The science and engineering of cutting. The mechanics and process of separating, scratching and puncturing biomaterials, metals and non-metals”. Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, Oxford

Axelsson B., Lundberg L., Gronlund J., (1993): “Studies of the main cutting force at and near a cutting edge”. *Holz als Roh - und Werkstoff* 51, 1, s. 43 – 48.

Boucher J., Meausoone PJ., Martin P., Auchet S., Perrin L., (2007): “Influence of helix angle and density variation on the cutting force in wood-based products machining”. *J Mater Process Technol* 189(1–3):211–218

Boatright S.W.J. & Garrett, G., (1983): ”The Effect of Microstructure and Stress State on the Fracture Behaviour of Wood”, *Journal of Materials*, Vol. 18, Iss. 7.

Bučar B., Bučar D. G., (2002): “The influence of the specific cutting force and cross-sectional geometry of a chip on the cutting force in the process of circular rip-sawing”. *Holz als Roh-und Werkstoff* 60:146-151.

Carvalho A., (1996): “Estrutura anatómica, propriedades e utilizações, Madeiras Portuguesas”, Volume I. Instituto Florestal.

Coelho C., Garrido N., Martins J., Carvalho L.H., Costa C., (2011): “Chapter 2 - Wood and Wood-based panels machining quality”, in “Wood Machining”, edited by J. Paulo Davim, pp. 27-82, ISTE-Wiley (ISBN: 978-1-84821-315-9).

Coelho C., Martins J., Meausoone P.J., Masson D., Carvalho L., Costa C., (2008): “Method for evaluating the influence of wood machining conditions on the objective characteristics and subjective perception of a finished surface”. *Wood Sci. and Technol.*, 42: 181-195.

Coelho C., Martins J., Carvalho L., Costa C., Masson D., Méausoone P., (2005a): “A Novel Method for Evaluating the Influence of Wood Machining Conditions on the Quality of a Finished Surface”. *Proceedings of the 17th International Wood Machining Seminar, Rosenheim, Germany.*

Coelho C., (2005b): “Influence de l’ Usinage du Bois sur les Caractéristiques Objectives et sur la Perception Subjective de l’ Aspect d’une Finition”. *Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.*

Costes J.P., Ko P.L., Ji T., Decès-Petit C., and Altintas Y. (2004): “Orthogonal cutting mechanics of maple: Modeling a solid wood-cutting process”. *J. Wood Sci.* 50(1), 28-34.

Cristovão L., Broman, O., Grönlund, A., Ekevad, M., and Siteo, R. (2011): “Main cutting force models for two species of tropical wood”. *Proceedings of the 20th International Wood Machining Seminar, June 7-10, Skellefteå, Sweden.*

Curti R., Marcon B., Denaud L., Collet R., (2018): “Effect of grain direction on cutting forces and chip geometry during green beech wood machining”. *BioResources* 13:5491–5503.

Eyma F., Méausoone P.J., and Martin, P., (2004): “Strains and cutting forces involved in the solid wood rotating cutting process”. *J. Mater. Process. Technol.* 148(2), 220-225.

Eyma F., Méausoone P.J., Martin P., (2001): “Influence of the transitional zone of wood species on cutting forces in the router cutting process (90-0)”, *Holz Roh-Werkst.* 59, 489-490.

Franz N.C., (1958): “An analysis of the wood-cutting process”. *University of Michigan.*

Garrido, N., (2006): “Tecnologia de corte e otimização na indústria da madeira”. *Curso de Engenharia de Madeiras, Sebenta de Equipamentos Industriais I e II, IPV/ESTV.*

Gibson L.J. & Ashby M.F., (1988): “Cellular Solids: Structure and Properties”. Pergamon Press, New York.

Gonçalves MTT., Rodrigues R., Takahashi JSI., (1997): “An experimental analysis of the influences of machining conditions on the parallel cutting force in orthogonal cutting for ten Brazilian wood species”. In: Proceedings of the 13th International Wood Machining Seminar 491-498.

Goli G., Curti R., Marcon B., Scippa A., Campatelli G., Furferi R., Denaud L., (2018): “Specific cutting forces of isotropic and orthotropic engineered wood products by round shape machining”. *Materials* 11:2575. <https://doi.org/10.3390/ma11122575>.

Goli G., Fioravanti M., Marchal R., Uzielli L., (2009a): “Up-milling and down-milling wood with different grain orientations - Theoretical background and general appearance of the chips”. *Eur J Wood Prod* 67:257–263. <https://doi.org/10.1007/s00107-009-0323-3>.

Goli G., Fioravanti M., Marchal R., Uzielli L., and Busoni, S., (2009b): “Up-milling and down-milling wood with different grain orientations – The cutting forces behavior”. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 68(4), 385-395. <https://doi.org/10.1007/s00107-009-0374-5>.

Hellström Lisbeth, Biller Sven-Olov, Edvardsson Sverker & Gradin Per, (2014): “A theoretical and experimental study of the circular sawing process”. *Holzforschung.* 68. 10.1515/hf-2013-0066.

Hlásková L, Kopecký Z, Solař A, Patočka Z., (2019): “Cutting test as a source of fracture toughness and shear yield strength for axial-perpendicular model of wood cutting”. *Wood Fiber Sci* 51(1):58–68. <https://doi.org/10.22382/wfs-2019-006>.

Inoue H., Mori M., (1979): “Effects of cutting speed on chip formation and cutting resistance in cutting of wood parallel to the grain”. *Mokuzai Gakkaishi* 25, 1, s. 22 - 29.

Kivimaa E., (1950): “Cutting force in woodworking”. Finland Institute for technical research, Helsinki, Finland, Doctoral thesis.

Krilek Jozef, Kováč Ján, Kučera Marián., (2014): “Wood Crosscutting Process Analysis for Circular Saws”. *BioResources*. 9. 10.15376/biores.9.1.1417-1429.

Kuljich S., Herna R.E., Llave A.M., Koubaa A., (2013): “Effects of cutting direction, Rake angle and depth of cut on cutting forces and surface quality during machining of balsam Fir”. *Wood Fiber Sci* 45(2):195–205.

Mandić M.; Porankiewicz B.; Danon G., (2015): “An Attempt at Modelling of Cutting Forces in Oak Peripheral Milling”. *BioResources* 10(3): 5489-5502.

Moradpour P., Doosthoseini, K., Scholz, F. and Tarmian, A., (2013): “Cutting forces in bandsaw processing of oak and beech wood as affected by wood moisture content and cutting directions. *European Journal of Wood and Wood Products*, DOI 10.1007/s00107-013-0734-z.

Moradpour P., Scholz F., Doosthoseini K., Tarmian A., (2016): “Measurement of Wood Cutting Forces during Bandsawing Using Piezoelectric Dynamometer”. *Drv. Ind.* 67, 79–84.

Marchal R., Mothe F., Denaud L.E., Thibaut B., Bleron L., (2009): “Cutting forces in wood machining—Basics and applications in industrial processes”. A review COST Action E35 2004–2008: Wood machining—micromechanics and fracture. *Holzforschung*, 63, 157–167.

Mckenzie W. M., (1960): “Fundamental aspects of wood cutting process”. *Forest Products Journal* 10, 9, s. 447 - 456.

McKenzie W.M., (1967): “The basic wood cutting process”, *Proc. of the 2nd IWMS*, 3–8.

Mori M., (1971): “An analysis of cutting work in peripheral milling of wood” III. Variation of cutting force in inside cutting of wood with router-bit. *Mokuzai Gakkaishi* 17, 10, s. 437 - 442.

Nasir V., Cool J., (2018): “A review on wood machining: characterization, optimization, and monitoring of the sawing process”. *Wood Mater. Sci. Eng.* doi: 10.1080/17480272.2018.1465465.

Ohta M., Kawasaki B., (1995): “The effect of cutting speed on the surface quality in wood cutting”. In Proceedings of the 12th International Wood Machining Seminar, pages 56 – 62.

Orłowski KA, Ochrymiuk T., (2017): “A newly-developed model for predicting cutting power during wood sawing with circular saw blades”. *Maderas Cienc Tecnol* 19(2):149–162. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2017005000013>.

Orłowski K, Ochrymiuk T, Atkins A., (2014): “An innovative approach to the forecasting of energetic effects while wood sawing”. *Drvna Ind* 65(4):273–281. <https://doi.org/10.5552/drind.2014.1341>.

Orłowski K., Ochrymiuk T., Atkins A., Chuchala D., (2013a): “Application of fracture mechanics for energetic effects predictions while wood sawing”. *Wood Sci Technol*, 47: 949–963 (DOI 10.1007/s00226-013-0551-x, Open access).

Orłowski K.A., Ochrymiuk T., (2013b): “Revisiting the determination of cutting power while sawing of wood with circular saw blades by means of fracture mechanics”. *Proc. of 21st Inter. Wood Mach. Seminar*, August 4–7, 2013, Tsukuba, Japan. Eds. IWMS21 Organizing Committee. The Japan Wood Research Society. pp. 46–55.

Paiva, António Pedro Dinis, (2016): “Desenvolvimento de ferramentas de projeto para atenuação do ruído de funcionamento em serras circulares”. Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Porankiewicz B., Goli G., (2014): “Cutting forces by Oak and Douglas Fir machining”. *Maderas Ciencia y Tecnología* 16(2):199–216.

Porankiewicz B., Bermudez JC., Tanaka C., (2007): “Cutting forces by peripheral cutting of low density wood species”. *Bio Resour* 2:671–681

Stewart H., (1969): “Effect of cutting direction with respect to grain angle on the quality of machined surface, tool force components, and cutting friction coefficient”. *Forest Products Journal* 19, 3, s. 43 - 46.

Stewart H., (1971): “Chip formation when orthogonally cutting wood against the grain”. *Wood Science* 3, 4, s. 193 - 203.

Stewart H., (1979): “Analysis of orthogonal woodcutting across the grain”. *Wood Science* 12, 1, s.

Sawada T, Ohta M., (1995): “Simulation of the wood cutting parallel or perpendicular to the grain by Extended Distinct Element Method”. In *Proceedings of the 12th International Wood Machining Seminar*, pages 49 – 55.

Wang J., Cao P., Guo X., Hong X., Jia G., Wang B., (2015): “Effect of Process Parameters on Cutting Forces and Surface Roughness during Peripheral Up Milling of Bamboo Scrimber”. *BioResources*, 10, 8414–8425.

Wood Handbook, (2010): “Wood as an engineering Material”. Forest Products Lab, United States Department of Agriculture Forest Service, Madison, pp. 5-29.

Woodson G.E., (1970): “Tool Forces and Chip Formation in Orthogonal Cutting of Loblolly Pine”. Southern Forest Experiment Station, Forest Service, US Department of Agriculture: Madison, WI, US; Volume 52.

Wong Darrell C., Schajer Gary S., (2007): “Particleboard Cutting Model”. 18th International, Wood Machining Seminar, Vancouver, Canada.

Zhang J., Sun P., Luo B., Li L., Liu H., (2021): “Surface creation and cutting characteristics during sugar maple wood scratching with spherical cone grit”. *European Journal of Wood and Wood Products* (2021) 79:679–689. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01642-6>

CAPÍTULO IV

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE MAQUINAÇÃO NA QUALIDADE DA ARESTA¹

Ensaio Preliminares

¹ O trabalho descrito neste capítulo esteve na origem da publicação e apresentação de artigos em congressos internacionais (Garrido *et al.*, 2007a,b; 2008)

Introdução

Na maioria das utilizações dos Aglomerados de Partículas, um dos fatores que mais contribui para a qualidade final é o perfil da aresta maquinada. A aresta é a parte mais visível deste produto e é crucial para as posteriores operações de revestimento. A qualidade final dos aglomerados depende não somente das matérias-primas e condições de fabrico, respetivas propriedades físico-mecânicas, mas também das condições de maquinação. A forma mais comum dos operadores monitorizarem as condições da máquina de corte é através da observação ou audição de alterações durante o processo produtivo. Este facto tem-se revelado um problema para a indústria, por via das diferentes sensibilidades sensoriais e perceptivas dos operadores, o que conduz muitas vezes à rejeição de peças e ao conseqüente aumento de custos. Tornou-se por isso imperativo desenvolver esquemas de monitorização eficazes, capazes de atempadamente alertar o operador e/ou possibilitar o ajuste automático dos parâmetros de maquinação por forma a serem garantidos os requisitos de qualidade.

A qualidade da aresta é considerada um dos mais importantes parâmetros para o controlo de qualidade em muitos subsectores da indústria da madeira. Refira-se a propósito, que a partir de uma avaliação cuidadosa da aresta maquinada, os fabricantes podem estimar a qualidade do produto final, o desgaste geral das ferramentas de corte, bem como imprecisões nos parâmetros de corte.

Todavia, no caso dos Aglomerados de Partículas a qualidade da aresta é muito difícil de caracterizar. Fatores endógenos, tais como a tipologia das matérias-primas, as condições de prensagem e os adesivos, podem induzir em alterações significativas nas suas propriedades. Além disso, durante o processo de maquinação, as condições de corte influenciam diretamente a qualidade da aresta. Por conseguinte, é da maior importância o estudo dos efeitos das variáveis do processo, tais como: velocidade de rotação, velocidade de corte, profundidade de corte, direção de corte e velocidade avanço, nas forças de corte e nos parâmetros do processo de maquinação, especialmente na qualidade da aresta.

Com vista a ultrapassar as limitações apresentadas em diversos estudos que visavam a caracterização do perfil da aresta, desenvolvemos neste trabalho um método inovador baseado num sistema de visão artificial para avaliar os parâmetros de qualidade. Por um lado, pretendíamos investigar o potencial de um sistema de visão artificial para caracterização do perfil da aresta maquinada. Por outro, estudar o uso de um sistema de monitorização e controlo de retroação para atingir/avaliar um determinado nível de qualidade. Neste propósito,

efetuámos os ensaios preliminares (P1) que serviram fundamentalmente para apurar o melhor método de iluminação e captação de imagem. Este sistema de visão artificial é composto por uma câmara e uma fonte de luz, e foi instalado num equipamento industrial equipado com uma serra de disco. Através da aplicação de métodos de filtração baseados nas Transformadas Rápidas de Fourier (FFT), foi tomado em conta não só a tolerância da geometria do perfil da aresta, mas também a influência da dimensão das partículas.

Na segunda parte deste capítulo, descrevemos os ensaios preliminares (P2), que tiveram como objetivo central estudar os efeitos de diferentes condições de maquinação na qualidade da aresta. Nestes ensaios três fatores foram considerados: o tipo de Aglomerado de Partículas (*PB*), o avanço por dente (*fz*) e a velocidade de rotação (*R*). A qualidade da aresta foi avaliada através do critério de qualidade *total waviness* (*Tw*). Para avaliarmos o nível de significância dos efeitos dos fatores nos parâmetros de resposta avanço efetivo por dente (*ffz*), energia específica de corte (*Es*) e qualidade da aresta (*Tw*), procedemos a uma análise de variância (ANOVA). Por último analisámos a relação entre o parâmetro de maquinação *Es* com o critério de qualidade *Tw* para cada tipo de aglomerado testado.

Este trabalho fez parte de um projecto de investigação mais abrangente, que teve por objetivo desenvolver novos compósitos de madeira a partir de variadas espécies e origens de resíduos de madeira e reciclados, com o propósito principal de melhorar a ecoeficiência e a qualidade do produto final (Carvalho *et al.*, 2006; Projeto IDEIA ADI/2007/V4.1/0059 OHPan 2006-2009).

4.1 Seleção do método para iluminação da aresta (P1)

Para avaliar a qualidade da aresta de corte, recorreu-se a um sistema de visão que foi adaptado a partir de um sistema existente desenvolvido no âmbito de um trabalho de doutoramento (Coelho, C., 2006) e do projecto POCTI/AGR/49218/2002, que tiveram por objetivo a medição da pseudo-rugosidade da superfície de madeira. O novo sistema utiliza os mesmos equipamentos, mas em modo dinâmico, o que exigiu a realização de alterações na configuração desses equipamentos, e nos programas de aquisição de dados e tratamento das imagens obtidas. Neste propósito analisámos a influência de algumas limitações impostas pela implementação do sistema, e procurámos seleccionar os parâmetros mais adequados para a avaliação da qualidade da aresta, tendo em conta aspetos como o método de cálculo e a seletividade. Antes de seleccionarmos as posições relativas dos dois elementos do sistema de

visão artificial a ser instalados na máquina (proximidade com a serra de disco e afastado da projecção do serrim), foi necessário verificar a influência de alguns parâmetros do *design* do novo sistema: o ângulo entre a superfície e a câmara; o tipo de fonte de luz (lazer ou luz emitida por uma lâmpada comum) e o seu ângulo com a superfície a analisar.

4.1.1 Materiais e métodos

Provetes e níveis de maquinação

Os provetes para os ensaios preliminares (P1) foram extraídos de uma placa de Aglomerado de Partículas comercial com superfície melamínica decorativa, *Tafilam*[®] ST, da empresa Tafibra (Sonae Indústria). Na Tabela 4.1 apresentam-se as principais propriedades físico-mecânicas deste Aglomerado de Partículas comercial para a gama de espessuras >13 a 20 mm (massa volúmica, resistência à flexão, MOE-módulo de elasticidade aparente e teor de formaldeído). Nestes ensaios usámos placas standard de 16 mm de espessura.

Tabela 4.1 - Propriedades físico-mecânicas do Aglomerado de Partículas laminado *Tafilam*[®] ST

Massa volúmica (kg/m ³)	Resistência à flexão (MPa)	Resistência Interna (MPa)	MOE (MPa)	Teor de HCOH (mg / 100 g placa seca anidra)
660	13	0,35	1800	8 ⁽²⁾

Os níveis de maquinação foram definidos tendo em conta a variação do parâmetro velocidade de avanço (A), e são apresentados na Tabela 4.2. O valor do avanço por dente (f_z) foi calculado a partir da equação 3.3, apresentada no Capítulo III.

Tabela 4.2 – Níveis de maquinação teóricos selecionados para os ensaios preliminares (P1)

Nível	Velocidade de Avanço (m/min)	Avanço por dente (mm)
I	1	0,00651
II	3	0,01953
III	5	0,03255

A maquinação dos provetes foi realizada numa serra multifunções Mida R5M, equipada com um disco de 300 mm (3,2 mm de espessura) composto de 48 dentes de carboneto de tungsténio, preparado para trabalhar a uma velocidade de rotação nominal de

⁽²⁾ Classe E1 de acordo com a norma EN 13986+A1

3200 rpm. Para cada nível foram processados 20 provetes, o que fez um total de 60 ensaios preparatórios, que considerámos uma amostra razoável para testar o método.

Medição da qualidade da aresta

Para seleccionar o melhor método para iluminação recorreu-se a um processo que consistiu em iluminar a aresta com duas fontes de luz (laser e lâmpada), e de seguida efetuar a respetiva captação da imagem (Figura 4.1).

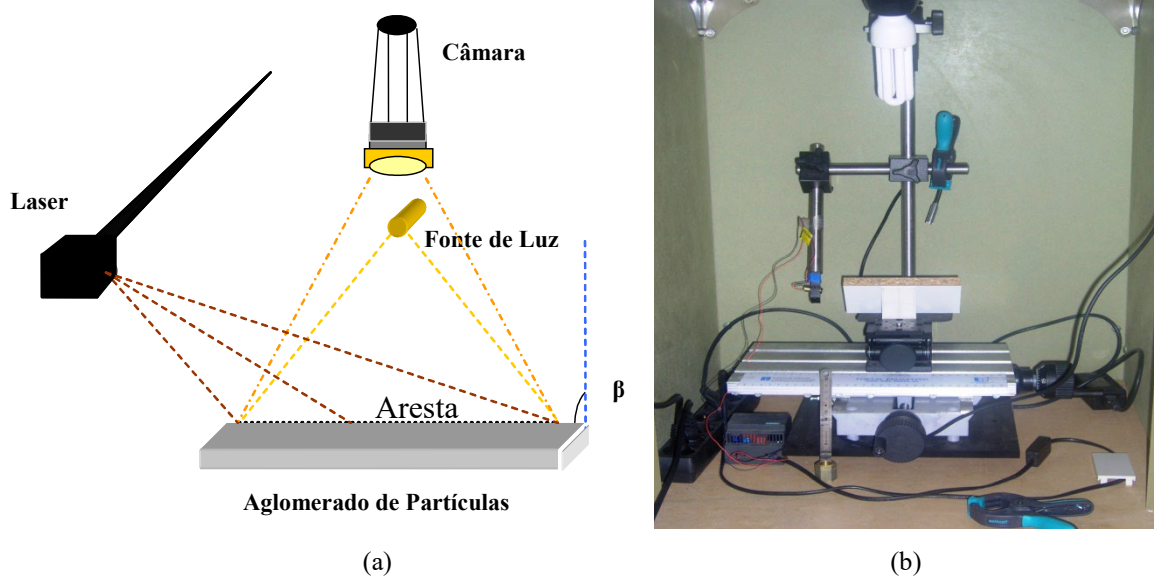


Figura 4.1 – Sistema de iluminação e captação da imagem da aresta de corte: (a) esquema; (b) foto (Garrido *et al.*, 2008)

O sistema é composto por uma CCD BW câmara de vídeo (modelo Sony XC-ST30), uma lente de modificação de zoom (VZM300), um micro laser (VLM 10° linha), uma lâmpada electrónica (Philips PL E-T 20W) e uma placa para aquisição de imagens monocromáticas (NI1407). Este sistema está ligado a um PC que corre a imagem e efetua o seu tratamento no software *IMAQ vision* para Labview[®] (Figura 4.2). O tratamento numérico (seleção da área com relevância) incluindo o cálculo de diversos parâmetros foi realizado recorrendo a um módulo desenvolvido em MatLab[®].

Com o objetivo de obter um número significativo de imagens para a avaliação da qualidade da aresta, cada provete foi fotografado 4 vezes. Foram usados dois ângulos de inclinação provete-câmara (36° e 45°) e quatro fontes-luz (L1-laser, L2-lâmpada vertical, L3-

lâmpada horizontal e L4-laser + lâmpada horizontal). No total foram efetuadas 48 fotos por condição.

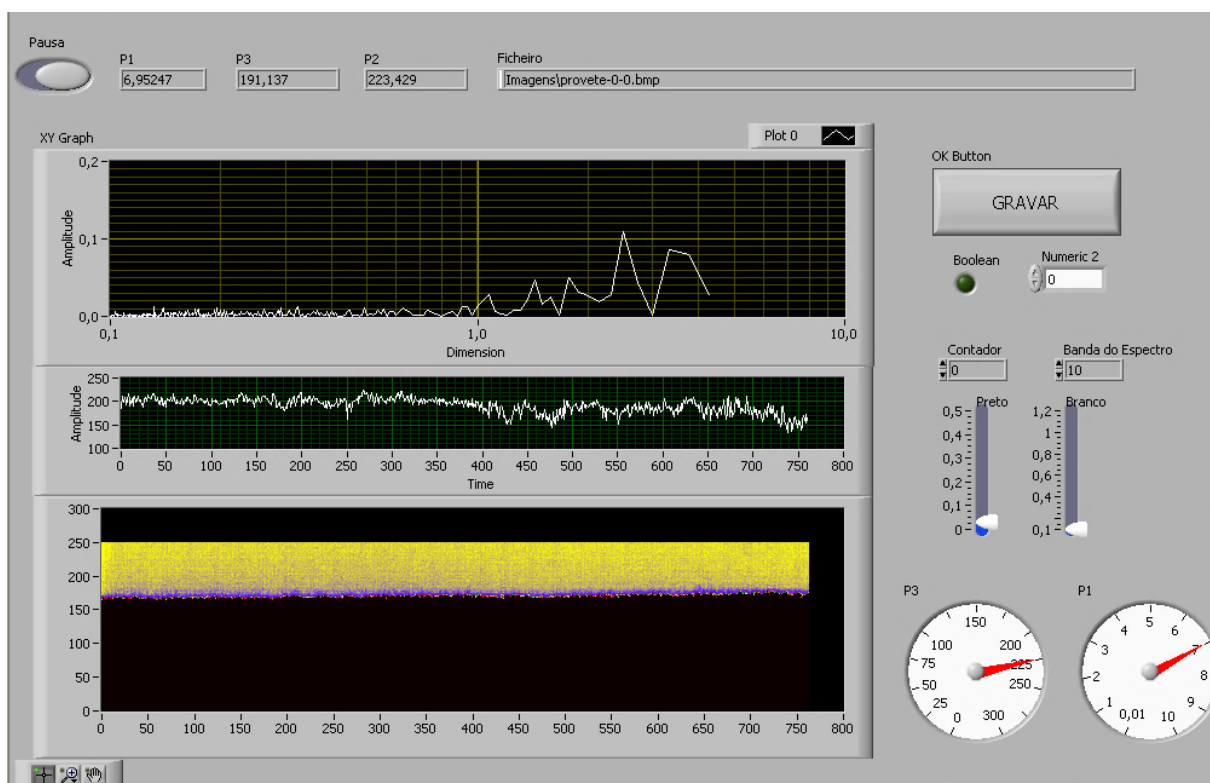


Figura 4.2 – Aplicação desenvolvida em Labview® para aquisição de imagem

Parâmetros de avaliação da qualidade da aresta

Para a análise de cada imagem foi seguido o procedimento abaixo descrito, com o objetivo de se avaliar quatro diferentes parâmetros de qualidade. Este procedimento está ilustrado na Figura 4.3 com um exemplo do uso do laser como fonte de luz (L1). Na Figura 4.4 apresenta-se um exemplo do perfil obtido a partir da fonte de luz L2 (lâmpada vertical).

- i) A partir de cada imagem (ver Figuras 4.3a e 4.4a) é extraída uma região que contém a aresta, (ver Figuras 4.3b e 4.4b);
- ii) Com base nestas imagens é obtido o perfil da aresta (ver Figuras 4.3c e 4.4c);
- iii) Parâmetro A – “Desvio da superfície” - é calculado a partir dos desvios do perfil em relação a um perfil linear virtual (ver Figuras 4.3d e 4.4d);

- iv) Ao perfil, é aplicada uma transformada rápida de Fourier (FFT-Fast Fourier Transform) para a determinação do seu espectro de potência (ver Figuras 4.3e e 4.4e);
- v) Parâmetro B – “Dimensão da partícula” - determinada a partir da frequência do valor máximo do espectro de potência (ver Figuras 4.3e e 4.4e);
- vi) Parâmetro C1 – “Regularidade da superfície” - integral do espectro de potência para tamanhos de partícula *inferior a 1 mm* (linha azul nas Figuras 4.3f e 4.4f);
- vii) Parâmetro C2 – “Regularidade da superfície” - integral do espectro de potência para tamanhos de partícula *inferior a 10 mm* (linha vermelha nas Figuras 4.3f e 4.4f).

Para avaliar a performance dos quatro parâmetros de resposta (A, B, C1 e C2), foi realizada uma análise de variância (ANOVA), que permitiu definir o nível de significância dos efeitos dos fatores em cada caso. Para esta análise usamos a software comercial de cálculo estatístico – JMP (SAS Institute Inc.).

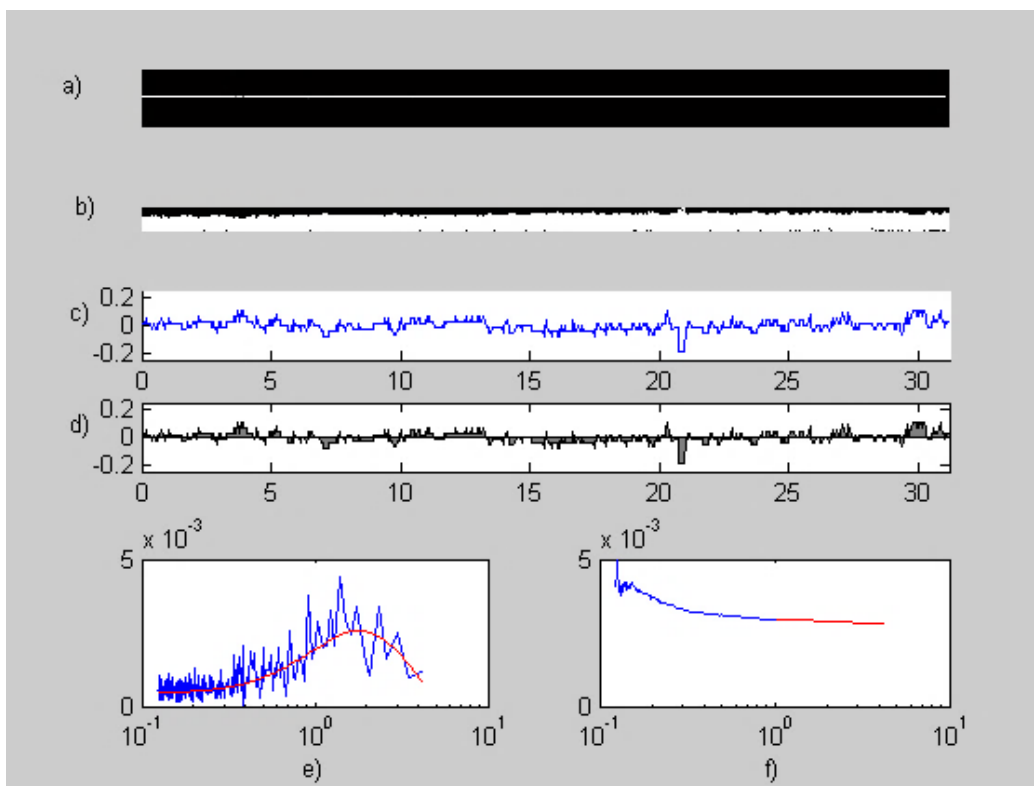


Figura 4.3 - Metodologia do processamento de imagem (luz tipo L1 – laser)

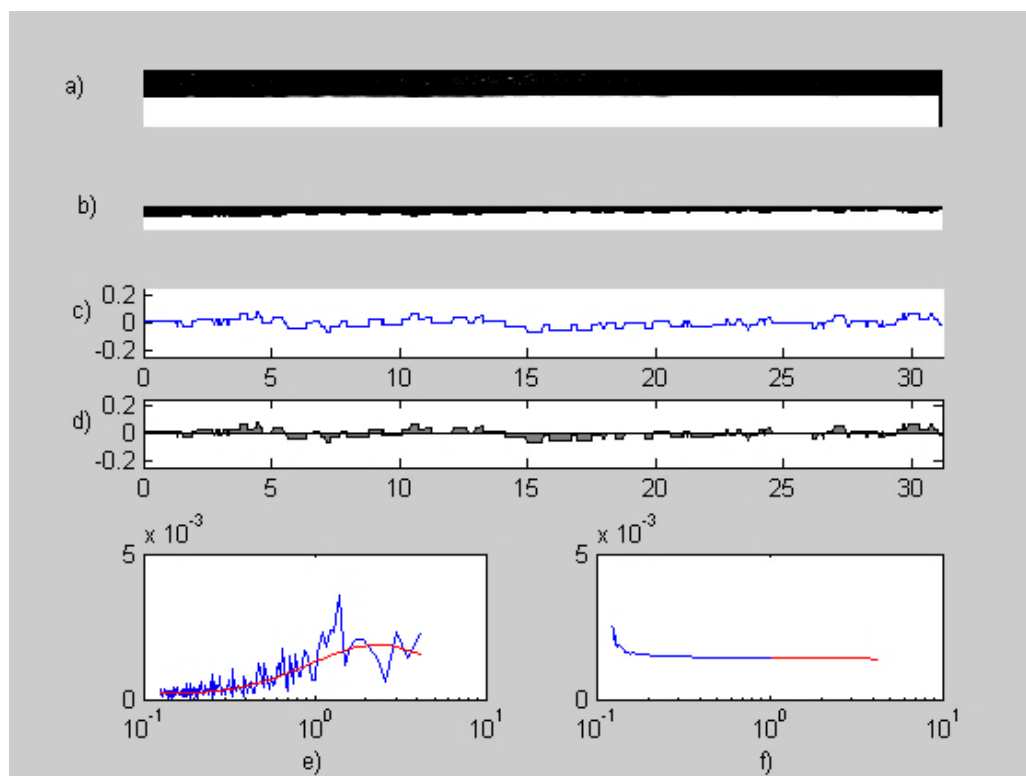


Figura 4.4 - Metodologia do processamento de imagem (luz tipo L2 – lâmpada vertical)

4.1.2 Apresentação e análise dos resultados

Os principais resultados que podemos inferir a partir deste estudo preliminar (P1), resultam de dois tipos de testes estatísticos que selecionamos com o objetivo de avaliar o desempenho dos quatro parâmetros de resposta apresentados (A, B, C1 e C2). No primeiro caso avaliámos a influência dos seguintes fatores na resposta aos quatro parâmetros analisados: ângulo entre o provete e a fonte de luz (36° e 45°), a velocidade de avanço (1, 3, 5 m/min) e o tipo de fonte de luz (L1, L2, L3 e L4). Os efeitos dos diferentes fatores em cada parâmetro de resposta são apresentados na Tabela 4.3, e na Figura 4.5 está ilustrada a influência dos respetivos fatores.

Tabela 4.3 – Análise ANOVA na resposta aos parâmetros A, B, C1 e C2

Fonte	Parâmetro A		Parâmetro B		Parâmetro C1		Parâmetro C2	
	<i>F Ratio</i>	<i>P-Value</i>	<i>F Ratio</i>	<i>P-Value</i>	<i>F Ratio</i>	<i>P-Value</i>	<i>F Ratio</i>	<i>P-Value</i>
Ângulo	3,5258	0,0615	11,2622	0,0009	1,7238	0,1903	29,7018	<0,0001
Avanço	244,810	<0,0001	49,9192	<0,001	62,5917	<0,0001	396,277	<0,0001
Fonte de luz	248,903	<0,0001	210,259	<0,001	271,301	<0,0001	3,0832	0,0278

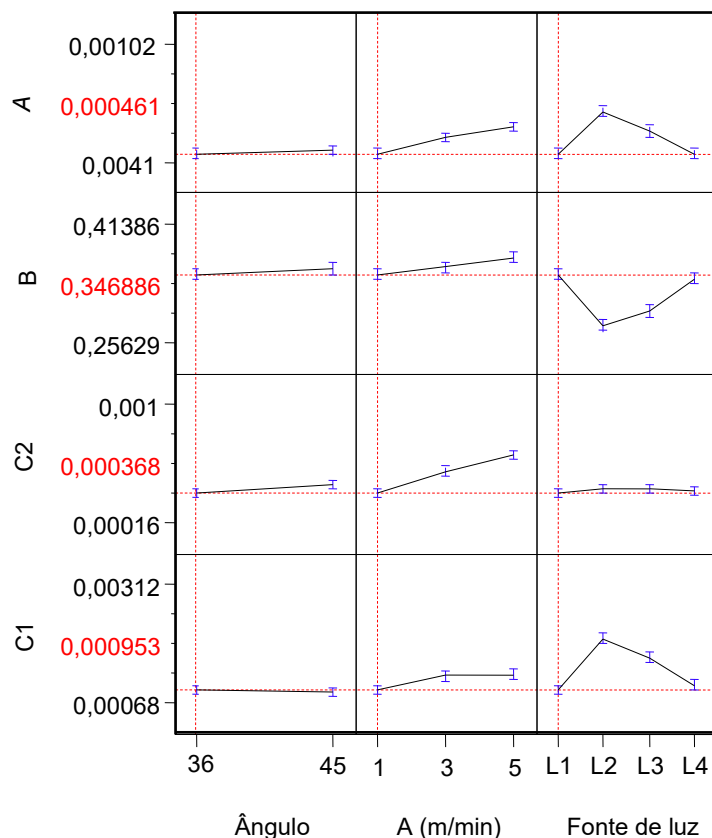


Figura 4.5 – Influência dos fatores nos parâmetros de resposta

Pela análise deste conjunto de dados estatísticos expressos na Tabela 4.3 e Figura 4.5., verificamos que a velocidade de avanço e a fonte de luz se revelaram os fatores mais significativos. Os quatro parâmetros são muito afetados pela velocidade de avanço, o que está em bom acordo com o que pretendíamos, ou seja, encontrar um parâmetro fortemente dependente da velocidade de avanço, embora sendo também muito dependente da fonte de luz.

No segundo conjunto de testes estatísticos consideramos as quatro fontes de luz separadamente, e analisaram-se dois fatores: o ângulo e a velocidade de avanço. Na Tabela 4.4 apresentamos os resultados ANOVA para o laser (fonte de luz tipo L1). Este tipo de fonte de luz é independente das condições ambientais e do seu posicionamento (tangencial à aresta), o que reduz as perturbações provocadas pela presença de partículas resultantes da serragem, fator extremamente importante para o caso da instalação do sistema em ambiente industrial.

Tabela 4.4 – Análise ANOVA para a resposta aos parâmetros A, B, C1 e C2 no caso da fonte de luz L1-laser

Fonte	Parâmetro A		Parâmetro B		Parâmetro C1		Parâmetro C2	
	<i>F Ratio</i>	<i>P-Value</i>	<i>F Ratio</i>	<i>P-Value</i>	<i>F Ratio</i>	<i>P-Value</i>	<i>F Ratio</i>	<i>P-Value</i>
Ângulo	0,0005	0,9814	4,4348	0,0389	15,9280	0,0002	14,1091	0,0004
Avanço	165,457	<0,0001	12,2137	0,0008	34,5944	<0,0001	140,236	<0,0001

Relativamente a esta segunda parte do estudo, a principal análise que podemos extrair dos resultados apresentados na Tabela 4.4, é que se usarmos o laser como fonte de luz, o sistema é fortemente dependente da velocidade de avanço e independente da relação câmara/ângulo do provete, o que nos permite ter liberdade quase total para escolher o posicionamento, quer da câmara, quer do laser na máquina de corte industrial.

4.2 Influência dos parâmetros de maquinação na qualidade da aresta (P2)

Com o objetivo de estudar a influência das condições de maquinação na qualidade do perfil da aresta, executámos esta série de ensaios, variando os fatores: velocidade de rotação (R), velocidade de avanço por dente (fz) e tipo de aglomerado (PB). Numa primeira fase investigamos as correlações entre a variável (fz) e o avanço efetivo por dente (ffz), para confirmarmos a capacidade dos sensores em detetar o contato do dente com o aglomerado. De seguida verificamos em que medida ffz influencia a energia específica de corte (Es), para testarmos a correlação entre o grau de dificuldade de corte associado ao tipo de aglomerado (PB). Para avaliarmos o nível de significância dos fatores (R , fz , PB), nos parâmetros de resposta (ffz , Es e Tw), procedemos a uma análise de variância (ANOVA). Por último analisámos a relação entre a energia específica Es com o critério de qualidade Tw para cada tipo de aglomerado testado.

4.2.1 Materiais e Métodos

Instrumentação da máquina de corte

Para a execução da operação de corte recorreremos à serra circular semi-automática multifunções MIDA R5M, ilustrada na Figura 4.6. Para a sua instrumentação avaliámos numa primeira fase o tipo de sistema de aquisição de dados que nos permitisse com fiabilidade a aquisição e medição dos parâmetros fundamentais de operação. Para o efeito equipou-se a máquina com um disco de corte de 300 mm de diâmetro, 3,2 mm de espessura e 48 elementos cortantes, preparado para admitir uma velocidade de rotação da ordem das 3200 rpm. O disco é movido através de um motor elétrico de 3 hp de potência nominal. O sistema principal de

monitorização foi inicialmente composto por 3 sensores de corrente e 3 de diferença de potencial destinados ao cálculo do trabalho elétrico, e por um sensor de posição para o cálculo da velocidade de rotação. Para a determinação das forças de corte, e tendo em atenção o valor das forças envolvidas (da ordem dos 100 N), foram adquiridas nesta fase inicial duas células de carga Omega modelos LC111-250 e LC511-200, tendo-se obtido resultados animadores nos ensaios preliminares realizados. Porém, a nossa opção numa fase seguinte passou por seleccionar e instalar sensores piezo-eléctricos, atendendo à sua maior fiabilidade para a medição das grandezas pretendidas. No decorrer dos ensaios a resistência eléctrica introduzida pelos fios de ligação foi desprezada, e não foi efetuada a compensação da temperatura, atendendo à curta duração de cada ensaio. Para a aquisição de dados utilizou-se uma placa de aquisição NI PCI 6251 (16 entradas analógicas, 24 I/O digitais, 2 saídas analógicas) com uma frequência de leitura 2.8 MS/s por responder tecnicamente às exigências de frequência de amostragem. Com a máquina instrumentada desta forma, foi possível obter as primeiras leituras de alguns parâmetros, como: a velocidade de avanço, a velocidade de rotação, o trabalho eléctrico e as forças de corte desenvolvidas.



Figura 4.6 – Máquina MIDA R5M instrumentada (Coelho *et al.*, 2011; Garrido *et al.*, 2008, 2007a, b)

Todavia, e na continuação do estudo da maquinação dos Aglomerados de Partículas e tendo em consideração os dados bastantes animadores que fomos obtendo, implementou-se uma metodologia de ensaio melhorada. Procedemos assim à re-instrumentação da serra circular da máquina semi-automática multifunções MIDA R5M, de forma a permitir leituras com mais frequência e melhor reprodutibilidade. Para o efeito, introduzimos um variador de frequência (para controlar a velocidade de rotação), um transdutor de corrente (para medir o consumo energético) e um par de sensores piezo-eléctricos Murata (para medir as vibrações na peça).

Provetes e níveis de maquinação

Os provetes utilizados para a realização destes ensaios preliminares (P2) foram extraídos de três tipos de Aglomerado de Partículas comerciais (Tafisa) marca *Tafipan*[®] de 16 mm de espessura: standard (ST), resistente à humidade (MR) e homogêneo (HG). Algumas das suas principais propriedades físico-mecânicas estão apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Propriedades físico-mecânicas dos Aglomerados de Partículas comerciais *Tafipan*[®]

TIPO	Massa volúmica (kg/m ³)	Resistência à flexão (MPa)	Resistência Interna (MPa)	MOE (MPa)	Teor de HCOH (mg / 100 g placa anidra)
ST	655	13	0,35	1950	8
MR	675	16	0,45	2050	8
HG	700	14	0,55	-----	8

Os níveis de maquinação foram definidos por três velocidades de avanço (1 m/min; 3 m/min; 5 m/min) e três frequências (30 Hz, 40 Hz e 50 Hz). A velocidade de avanço apresentada é puramente teórica e foi imposta no início de cada sessão de trabalho para evitar a subjetividade inerente ao variador de regulação. Os níveis de maquinação selecionados estão apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Níveis de maquinação para os ensaios preliminares com aglomerados comerciais

Velocidade de avanço (m/min)	Avanço por dente (mm)		
	30 Hz	40 Hz	50 Hz
1	0,0109	0,0081	0,0065
3	0,0326	0,0244	0,0195
5	0,0543	0,0407	0,0326

Para cada nível de maquinação apresentado na Tabela 4.6, foram realizados 9 ensaios por tipo de Aglomerado de Partículas, o que representou no total 81 ensaios. As condições de maquinação (velocidade de avanço, velocidade efetiva de avanço por dente e energia específica de corte) e os sinais dos sensores de vibração piezo-elétricos foram gravadas em ficheiro para posterior análise (Figura 4.7). Para aquisição e controlo dos sinais foi desenvolvida uma aplicação em LabView[®] 7.1, que inclui um módulo em Matlab[®] capaz de calcular a velocidade efetiva de avanço por dente através das FFT (Fast Fourier Transform) por aplicação de filtros aos sinais de vibração.

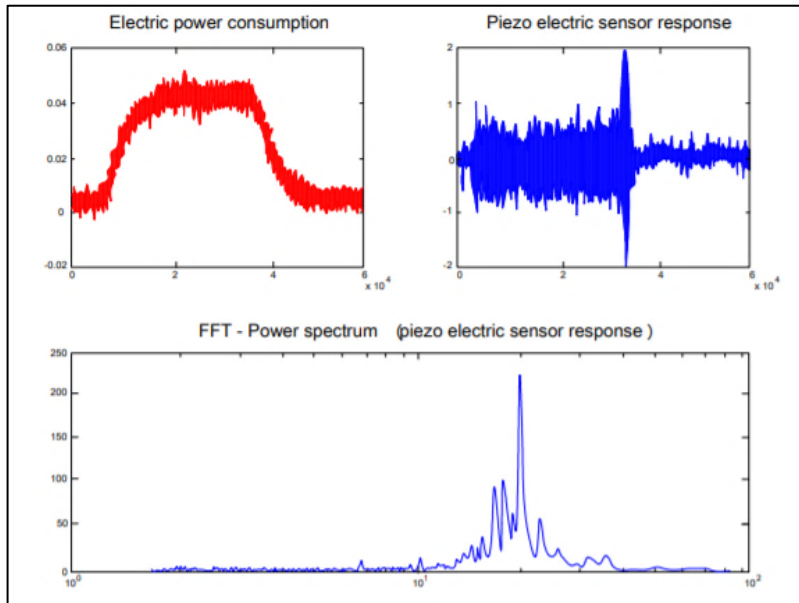


Figura 4.7 – Saída do sensor de vibração (piezo-elétrico) e sinal FFT

Avaliação da qualidade da aresta

Para a avaliação da qualidade da aresta recorreu-se ao sistema de visão artificial anteriormente descrito na secção 4.1. Para estes ensaios (P2) foi definido um ângulo ($\beta=15^\circ$) entre a câmara e o provete com um feixe de focalização laser como fonte de luz. Com o objetivo de se obter um número significativo de imagens para a avaliação da qualidade da aresta, cada provete foi fotografado 9 vezes em três posições (esquerda, centro e direita). Por cada imagem foi extraído um perfil virtual, e a partir deste foi obtido um critério de avaliação de qualidade designado por “Tw”, através da aplicação do método de filtragem baseado nas Fast Fourier Transforms (FFT). Este procedimento está ilustrado na Figura 4.8, no qual foi usado o laser com fonte de iluminação.

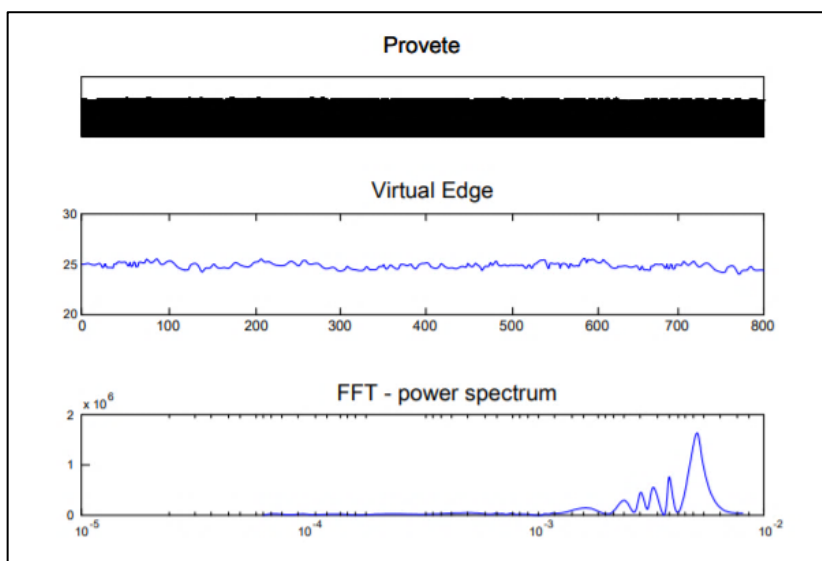


Figura 4.8 – Metodologia usada no processamento das imagens

4.2.2 Apresentação e Análise dos Resultados

Na Figura 4.9 apresenta-se a relação entre o avanço por dente estimado (fz) e o avanço por dente efetivo (ffz), calculado através da aplicação de FFT aos sinais obtidos pelos sensores piezoelétricos. Verifica-se que existe uma boa correlação entre as duas variáveis, que confirmam a capacidade deste tipo de sensores para detetar o avanço entre cada dente da serra e a respetiva interação com a superfície de Aglomerado de Partículas.

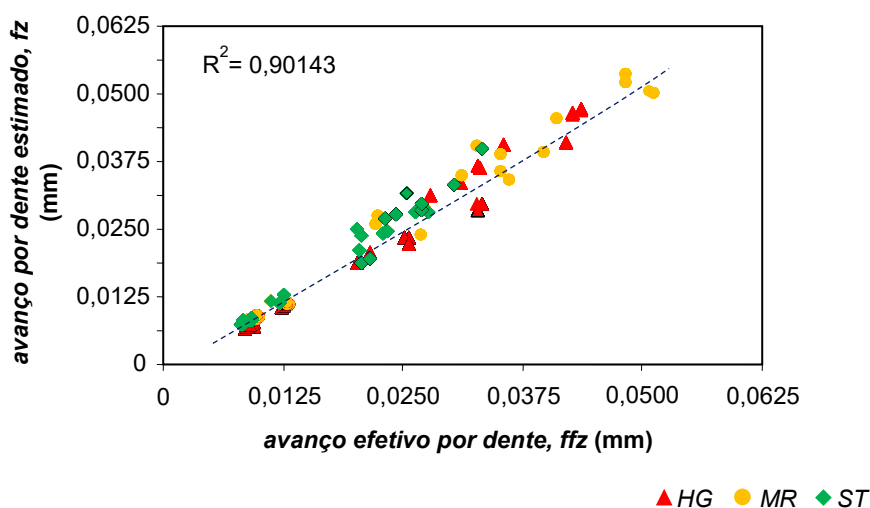


Figura 4.9 - Relação entre o avanço efetivo por dente (ffz) e o avanço por dente estimado (fz)

A Figura 4.10 mostra a influência do avanço efetivo por dente (ffz) na energia específica de corte (Es), calculada a partir dos sensores de corrente. Como se pode observar, ainda que na globalidade a correlação entre as curvas sejam similares para os três tipos de Aglomerado de Partículas, parece-nos que o aglomerado HG é o mais fácil de cortar, enquanto os outros dois tipos (ST e MR), apresentam um comportamento semelhante.

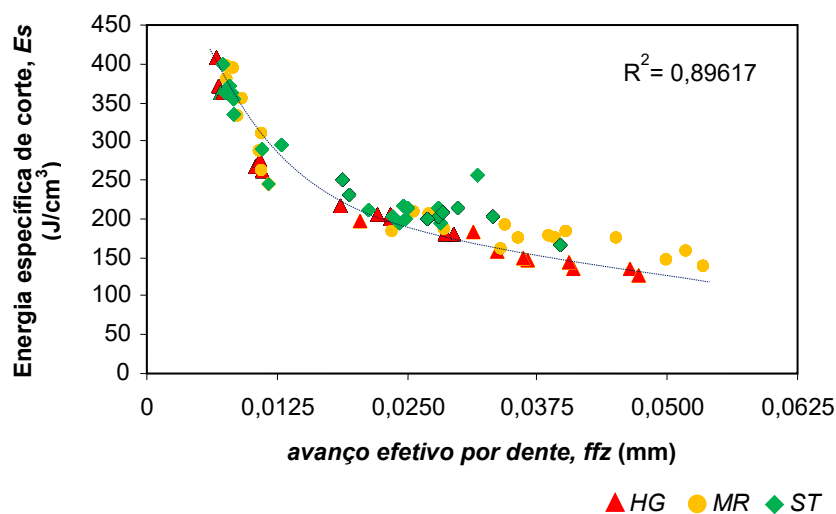


Figura 4.10 - Correlação entre a energia específica de corte (Es) e o avanço efetivo por dente (ffz)

A fim de se apreciar o desempenho dos parâmetros de resposta, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) para cada variável, permitindo-nos avaliar o nível de significância dos efeitos dos fatores. Para este propósito, foi usado o software estatístico comercial JMP. Os efeitos dos vários fatores em cada variável de resposta são apresentados na Tabela 4.7, e na Figura 4.11 são mostrados os respectivos perfis de previsão.

Tabela 4.7 - Nível de significância estatística dos efeitos dos diferentes fatores no critério de qualidade (*Tw*), na energia específica de corte (*Es*) e no avanço efetivo por dente (*ffz*) (+5%, ++1%, +++0.1%)

	<i>PB</i>	<i>fz</i> (mm)	<i>R</i> (Hz)
Total waviness (<i>Tw</i>)	+++	+++	+++
<i>Es</i> (J/cm³)	+++	+++	+++
<i>ffz</i> (mm)	+++	+++	+++

Conforme se pode apreciar na Tabela 4.7, os três fatores que foram considerados têm um efeito significativo no critério de qualidade (*Tw*), na energia específica de corte (*Es*) e no avanço efetivo por dente (*ffz*). Na Figura 4.11, pode ser observado que *Tw* aumenta com a velocidade de avanço por dente (*fz*) e com a velocidade de rotação (*R*). A energia específica de corte decresce com *fz* e aumenta com *R*, enquanto o *ffz*, mesmo sendo dependente de todos os três fatores, aumenta dramaticamente com *fz*, o que facilmente se compreende por via da sua correlação.

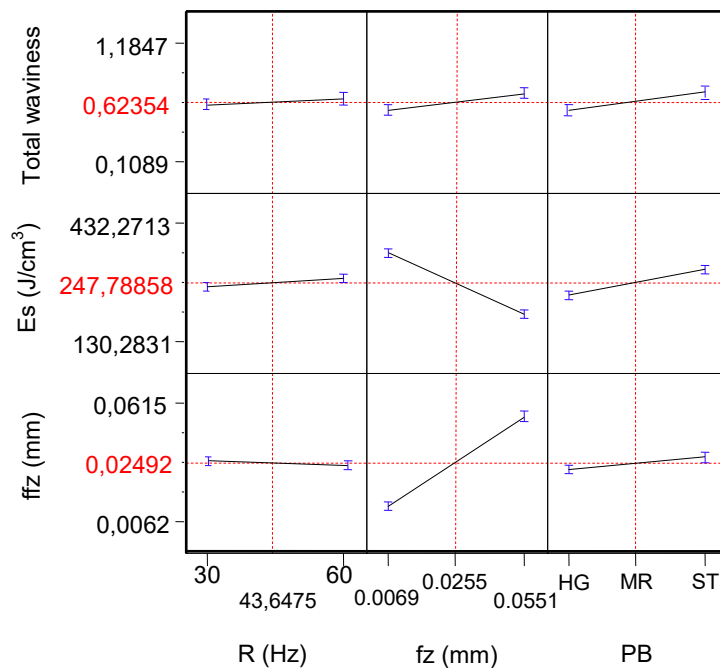


Figura 4.11 – Efeito dos níveis dos fatores no avanço efetivo por dente, energia de corte e *Total waviness*

Nas Figuras 4.12 e 4.13 estão representadas para cada tipo de Aglomerado de Partículas, as relações entre o avanço efetivo por dente (ffz) e a energia específica de corte (Es) com o parâmetro de qualidade Total waviness (T_w), calculado a partir do pseudo perfil definido pela aresta e obtido através do sistema de visão artificial anteriormente descrito.

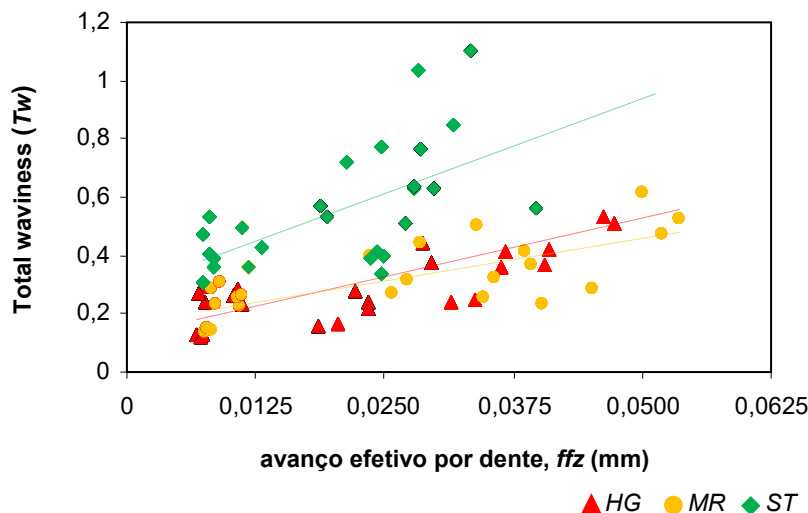


Figura 4.12 - Relação entre o Total waviness (T_w) e avanço efetivo por dente (ffz)

Observa-se na Figura 4.12, que existe uma tendência para o aumento do dano na qualidade da aresta com o aumento do avanço efetivo por dente, o que mostra bom acordo com os resultados obtidos por Saljé e Drückhammer, 1984 (ver Capítulo II).

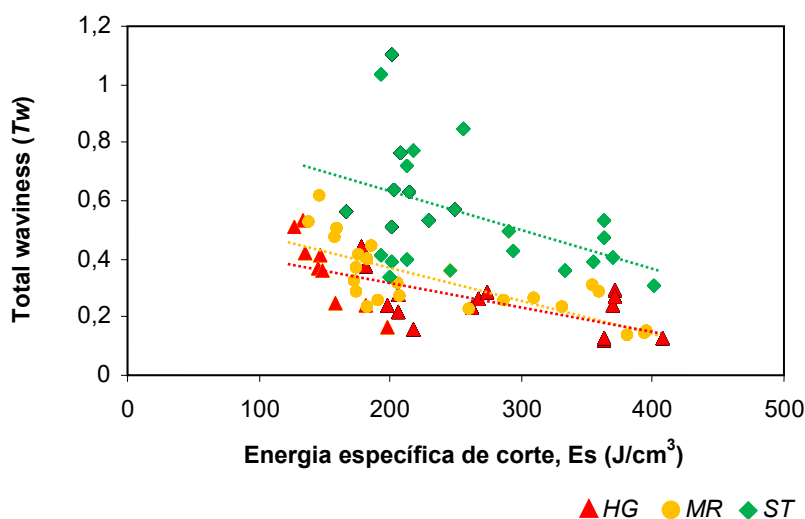


Figura 4.13 - Relação entre a Total waviness (T_w) e a energia específica de corte (Es)

Constata-se na Figura 4.13, que o dano na aresta tem tendência a diminuir com o aumento da energia específica de corte. Por precaução, não se pode daqui inferir uma conclusão direta e absoluta, uma vez que estes parâmetros de resposta são fortemente dependentes dos fatores de entrada. A relação entre estes dois parâmetros pode por isso resultar em múltiplas combinações, e conduzir a diferentes conclusões. Porém, verificamos

que a valores mais elevados da energia específica de corte (E_s) correspondem valores mais baixos do avanço efetivo por dente (ffz), que por esta razão conduzem a melhor qualidade da aresta. Estas conclusões podem ser apreciadas nos gráficos já apresentados anteriormente (Figuras 4.10, 4.11 e 4.12).

Para o anexo II remetemos alguns gráficos (Figuras A2.1 a A2.4) e respetiva tabela de médias (Tabela A2.1), onde podem ser apreciadas as relações entre alguns fatores de entrada (velocidade de avanço, avanço por dente, velocidade de corte) com os parâmetros de resposta (energia específica de corte, forças de corte). Estes podem ser interpretados como a confirmação dos resultados anteriormente apresentados, ou como eventual auxiliar para a sua interpretação. Por outro lado, atestam a coerência com os resultados publicados na literatura da especialidade (ver Capítulo II).

4.3 Conclusões

Ensaio Preliminares (P1)

Nesta série de ensaios descritos na primeira parte deste capítulo, foi avaliado o potencial de um sistema de visão artificial para a caracterização da aresta maquinaada. O nosso objetivo principal foi centrado no estudo a aplicabilidade da monitorização e do controlo do sistema de retroação, para que fosse garantido um adequado nível de qualidade e precisão. Verificou-se por isso, da adequação do método e da sua capacidade para ser instalado como ferramenta *online*, e concluiu-se que este mostrou condições para ser usado na avaliação da qualidade da aresta no processo de corte dos aglomerados.

Por conseguinte, e pela análise dos resultados experimentais, parece-nos que a aplicação de um sistema de visão artificial com recurso a um feixe laser como fonte de luz e quatro parâmetros resultantes de diferentes metodologias é um sistema bastante promissor para análise da aresta. Daqui concluímos que o sistema tem boas condições para uma eventual instalação *on-line*, pelo menos no que diz respeito aos Aglomerados de Partículas revestidos com papel melamínico.

Ensaio preliminares (P2)

Neste conjunto de ensaios preliminares, foi avaliada a influência das condições de maquinação na qualidade da aresta dos Aglomerados de Partículas. Três fatores foram

considerados: o tipo de aglomerado (standard, resistente à humidade e homogéneo), a velocidade de avanço por dente (fz) e a velocidade de rotação (R). Foram apresentados os efeitos destes fatores sobre o critério de qualidade da aresta (T_w), nas condições dependentes da maquinação e na resposta aos sensores piezoelétricos. Do conjunto de resultados apresentados, podemos retirar as seguintes conclusões principais:

- a) todos os fatores considerados são altamente significativos;
- b) os sensores piezoelétricos utilizados são capazes de detetar o contacto entre cada dente da lâmina da serra com a superfície do Aglomerado de Partículas;
- c) mesmo que os níveis de maquinação selecionados correspondam a uma elevada qualidade da aresta, o sistema tem capacidade para detetar pequenas diferenças de qualidade;
- d) apesar da pouca diferença existente nos três tipos de Aglomerado de Partículas, ou seja, todos eles têm três camadas e são produzidos da mesma mistura de madeira, só o tipo HG tem uma densidade mais elevada na camada externa e o MR tem um tipo de adesivo diferente dos outros dois, o sistema de visão artificial utilizado para a avaliação da qualidade da aresta aparenta ser bastante sensível para aquelas diferenças nos três tipos de aglomerados;
- e) o baixo custo e a elevada sensibilidade dos dois sistemas combinados (sensores piezoelétricos e câmara CCD) tornaram possível o seu uso para monitorização e controlo *online* de máquinas de corte industriais.

4.4 Referências bibliográficas

Carvalho L.H., Ranita J., Garrido N., Martins J., Costa C., (2006): “OHPan-Production of environmentally compatible particleboard from different species of wood and waste wood: preliminary results”. Proceedings of the Conference Wood Resources and Panel Properties COST E49/E44, AIDIMA, p. 321, Valencia, Spain, 12-14 June 2006.

Coelho C., Garrido N., Martins J., Carvalho L.H., Costa C., (2011): “Wood and Wood-based panels machining quality”, in Wood machining - Chapter 2, edited by J. Paulo Davim, pp. 27-82, ISTE-Wiley (ISBN: 978-1-84821-315-9).

Coelho, Cristina Maria do Amaral Pereira de Lima, (2006): “Influence de l'Usinage du Bois sur les Caractéristiques Objectives et sur la Perception Subjective de l'Aspect d'une Finition”. Sciences du Bois / Ciências de Engenharia (Doutoramento), Université Henri-Poincaré Nancy 1, França / Universidade do Porto Faculdade de Engenharia, Portugal

Garrido N., Martins J., Carvalho L.H., Mendes J.G., Costa C., (2008): "A novel method for evaluating the influence of wood machining conditions on the quality of particleboard edges" Pre-proceedings of the international conference on "Integrated Approach to Wood Structure, Behavior and Applications" Joint meeting ESWM (European Society of Wood Mechanics) and COST E35, ed. Marco Fioravanti (DISTAF) and Nicola Macchioni (IVALSA), pp. 312-317, Florence, Italy, ISBN/ISSN 978-88-901660-2-0.

Garrido N., Martins J., Carvalho L.H., Mendes J.G., Costa C., (2007a): “Influence of the sawing conditions on particleboard edge quality”. Proceedings of the 3rd International Symposium in Wood machining Seminar-COST E35, pp. 233-237, Lausanne, Suíça, 21-23 May 2007. ed. P. Navi and A. Guidoum, pp. 233-237, Lausanne-Switzerland, ISBN 978-2-88074-725-1. (ISBN 978-2-88074-725-1) (accepted for short oral contribution supported by poster)

Garrido N., Martins J., Carvalho L.H., Mendes J.G., Costa C., (2007b): “Influence of sawing conditions on the quality of particleboard edges”, 18th International Wood Machining Seminar, pp.247-255, Vancouver, Canada, 7-9 May 2007. (oral presentation)

Projeto OHPan, (2006-2009): “OHPAN - Produção de aglomerados de partículas ambientalmente compatíveis a partir de madeira de diversas espécies e resíduos de madeira”. Escola Superior de Tecnologia de Viseu; Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; Sonae Arauco Portugal, S.A., Código do projeto: 13-05-04-FDR-00025, (2006-03-01 a 2008-06-30).

Projeto POCTI/AGR, (2003-2006): “Influence of wood machining on the objective characteristics and subjective appearance of a finished surface”. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Código do projeto: POCTI/AGR/49218/2002, (2003-03-01 a 2006-08-31).

CAPÍTULO V

EFEITO DO *MIX* DE MADEIRA NA MAQUINAÇÃO¹

Influência na maquinação e qualidade da aresta de corte

¹ Este capítulo esteve na origem de um artigo científico apresentado num congresso internacional em Istambul na Turquia (Garrido *et al.*, 2009).

Introdução

O tipo e características dos materiais lenhosos incorporados no processo de fabrico dos derivados de madeira, afetam fortemente as suas propriedades, o seu desempenho estrutural, e representam uma parcela importante no custo final do produto. Reitere-se, que a variabilidade da madeira é uma das características que mais contribui para a dificuldade na sua caracterização e maquinação, aliada ao facto da sua qualidade poder variar fortemente dependendo não só da origem/região, mas também devido ao uso de diferentes espécies, ou ainda da tipologia dos resíduos usados (Van Riet, 2006; Thoemen, 2006; Iždinský *et al.*, 2021).

A escassez de matérias-primas tem forçado as empresas do setor a recorrerem ao uso de diferentes tipos de matérias e diferentes fontes de abastecimento. Esta situação conduz ao aumento das flutuações de abastecimento das matérias, que não só afetam a qualidade final do produto, como exige um controlo mais rigoroso do processo produtivo para que sejam atingidas as especificações destes produtos (MoUCost E49, 2005, citado em Garrido *et al.*, 2009). Perante estes novos desafios, a indústria tem procurado através de avanços científicos nos processos e nos produtos, alcançar patamares de qualidade superior sob o ponto de vista tecnológico, económico e ambiental.

Os Aglomerados de Partículas apresentam-se como o derivado de madeira com maior potencial para a incorporação de diferentes *mix* de madeira, nomeadamente: de diferentes espécies/origens, de resíduos de serrações, remanescentes do corte das indústrias de mobiliário, e mais recentemente os reciclados.

Existem diversos estudos realizados à escala laboratorial, que investigaram os efeitos das variáveis de prensagem ou composição dos painéis na qualidade final do produto, avaliado através de ensaios físico-mecânicos (Pinto *et al.*, 2008; Yel 2015; Yel *et al.*, 2020). Todavia, e ainda que a operação de prensagem seja a que mais influência tem nas propriedades dos aglomerados (Capítulo I, subsecção 1.3.3), as operações subsequentes (como a maquinação), podem ser determinantes para o seu uso. Saliente-se novamente, que o efeito dos parâmetros operatórios do processo de fabrico dos PB na maquinação, não foram ainda intensamente estudados. Porém, um dos aspetos que mais pode contribuir para a qualidade final do produto, pode estar no entendimento da influência das diferentes propriedades/características dos PB (como por exemplo o efeito do *mix* de madeira), na

facilidade/dificuldade da sua maquinação, normalmente impressa no perfil da aresta de corte (Kowaluk *et al.*, 2004, citado em Garrido *et al.*, 2009).

Neste capítulo investigamos a influência do *mix* de madeira na maquinação e qualidade da aresta maquinada. Foram estudados diversos fatores associados ao fabrico dos painéis (*mix* de madeira, resina, condições operatórias do ciclo de prensagem), à maquinação (velocidade de avanço) e ao sistema de visão artificial (fonte de luz e posicionamento da imagem). Uma análise estatística ANOVA foi realizada para avaliar os níveis de significância dos efeitos dos diferentes fatores (condições de fabrico e maquinação) nos parâmetros de resposta: qualidade da aresta (total *waviness*) e condições operatórias (energia específica de corte).

5.1 Materiais e métodos

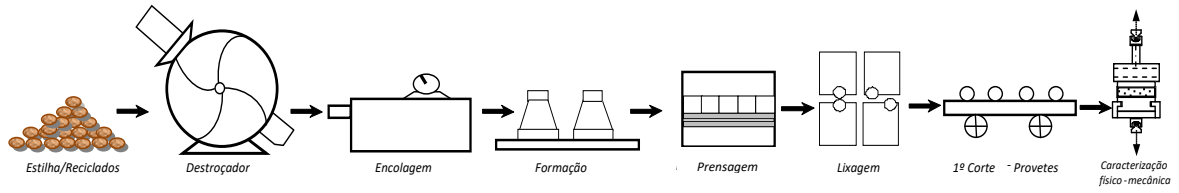
Dado o elevado número de parâmetros que podem influenciar na qualidade final da aresta maquinada, selecionamos para este trabalho o conjunto de fatores que considerámos mais significativo. Foram fabricados Aglomerados de Partículas com três camadas usando diferentes *mix* de matérias-primas. Uma vez que o tipo de madeira ou material lenhoso a maquinar é dos fatores que mais influenciam a maquinação, o *Aglomerado de Partículas fabricado com um elevado teor de reciclados*, foi usado neste trabalho por se tratar de um material ambientalmente compatível e de crescente interesse para a indústria.

A serra de disco foi o equipamento selecionado pelo facto de ser tradicionalmente usado na indústria de fabrico dos Aglomerados de Partículas, e é também o mais usado na indústria de mobiliário para o seccionamento dos painéis. A velocidade de rotação (R), de corte (Vc) e de avanço (fz), foram parâmetros estudados durante o processo de maquinação. As condições de maquinação e os sinais dos sensores de vibração piezo-elétricos foram gravadas em ficheiro para posterior tratamento e análise. O procedimento para a instrumentação da máquina de corte foi já descrito na subsecção 4.2.1, e ilustrado na Figura 4.7. do Capítulo IV.

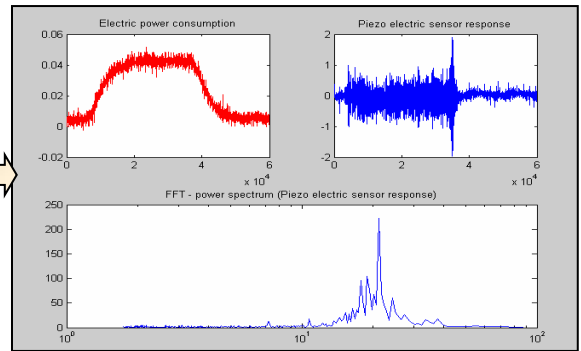
Para a avaliação da qualidade da aresta recorreremos ao sistema de visão artificial, igualmente apresentado no supra mencionado capítulo na sua secção 4.1. Foram então investigados os efeitos de diversos fatores na qualidade da aresta, e uma ferramenta de análise estatística foi usada para o planeamento de experiências e análise de dados.

Na Figura 5.1, apresenta-se esquematicamente a sequência das operações da parte experimental usada neste estudo.

I. Fabrico e Caracterização dos Aglomerados de Partículas (OHPan, 2006-2009)

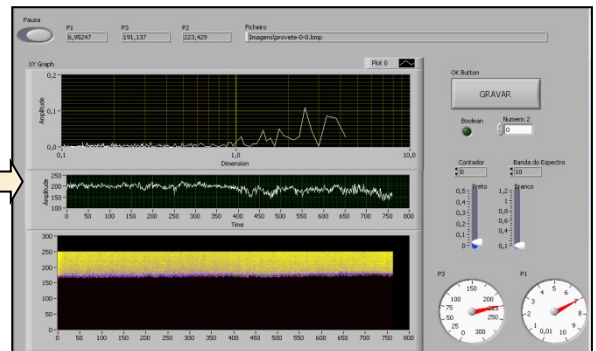
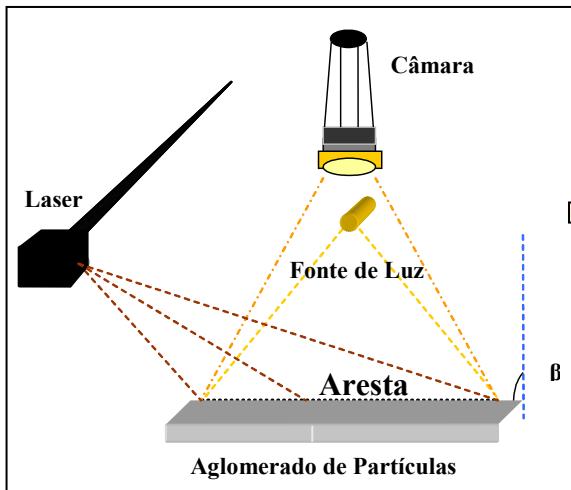


II. Maquinação com Serra de Disco



Saída do sensor (piezo-eléctrico) e sinal FFT

III. Sistema de Visão Artificial



Aplicação em Labview® para aquisição de imagem e processamento

IV. Metodologia do Processamento de Imagem

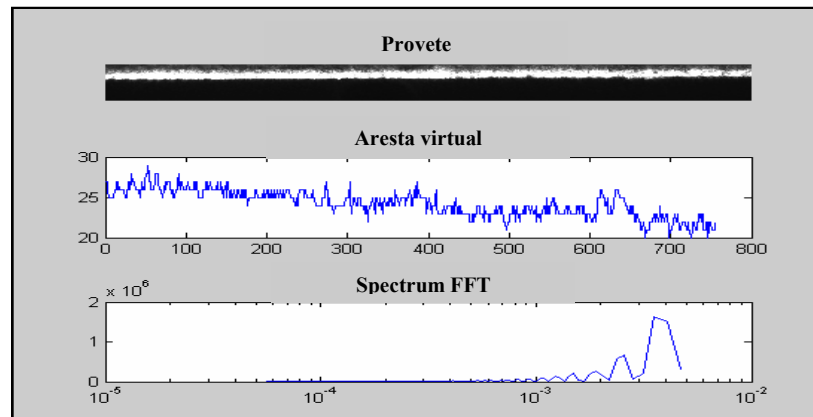


Figura 5.1 - Sequência das operações do protocolo experimental

5.1.1 Produção dos Aglomerados de Partículas

Os Aglomerados de Partículas usados para estes ensaios foram fabricados e caracterizados (propriedades físico-mecânicas e químicas) pela equipa do projecto OHPan (Agência de Inovação, SA. - Projecto IDEIA), respectivamente no LEPABE - Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia da FEUP, e no LTIMM – Laboratório de Tecnologia das Indústrias da Madeira e Mobiliário do Departamento de Engenharia de Madeiras da ESTGV. As matérias-primas foram fornecidas na sua totalidade pela fábrica de aglomerados de madeira da Sonae Indústria de Oliveira da Hospital.

Identificação e classificação da matéria-prima

Da composição das placas de Aglomerado de Partículas respeitantes às diferentes séries de experiências, fazem parte 4 tipos principais de matérias - primas: *pinho*, *serrim de pinho*, *eucalipto* e *madeira reciclada*. Os resíduos de eucalipto eram fundamentalmente compostos por partículas de casca. A madeira reciclada não foi classificada, porém, na sua composição entraram produtos rejeitados das indústrias de mobiliário e serração, paletes e resíduos gerados durante a transformação de derivados de madeira (placas rejeitadas, aparas de corte). A composição do *mix* apenas foi modificada na camada interna, e nas camadas externas foi continuamente mantida idêntica composição nos diversos ensaios, e a operação da distribuição de tamanhos foi ajustada de acordo com a caracterização da matéria-prima fornecida pela fábrica. Para se limitar o efeito da distribuição de tamanhos (e evitar *grumos*), toda a matéria-prima que compõe os diversos “mix” de madeira (partícula de CE, partícula de CI, partícula de pinho, de eucalipto, serrim de pinho e reciclados) é previamente acondicionada na câmara climática durante 24 horas (70 °C e 20% de humidade relativa). A determinação do teor de água das partículas foi realizada com base na norma NP EN 322, tendo-se obtido valores de 3,5% de teor de água para as partículas da camada de superfície e de 4% para as partículas da camada interna. De seguida, procedeu-se ao seu destroçamento (malha 10 mm) e armazenamento. Antes da operação de encolagem procedeu-se à peneiração da CI, por forma a obter-se a mesma distribuição de tamanhos correspondentes aos da fábrica de Oliveira do Hospital (a maioria dos *finos*, partículas < 0.500 mm foram rejeitados). Na composição dos diversos *mix* alterou-se a quantidade de reciclados, mas manteve-se a mesma proporção dos outros componentes. Na Tabela 5.1 apresenta-se a composição dos diversos *mix* da camada interna usada para esta série de experiências.

Tabela 5.1 - Composição dos diferentes *mix* de madeira da CI

	MixS	Mix40	Mix50	Mix60	Mix80	Mix100
	Massa (%)	Massa (%)	Massa (%)	Massa (%)	Massa (%)	Massa (%)
Pinho	25.00	21.40	18.00	14.29	7.13	-
Eucalipto	15.00	12.90	11.00	8.57	4.30	-
Serrim	30.00	25.70	21.00	17.14	8.57	-
Madeira reciclada	30.00	40.00	50.00	60.00	80.00	100.00

Resina e condições de encolagem

Para o fabrico de Aglomerado de Partículas visando a classe E1 de emissão de formaldeído (EN 13986), foi utilizada uma resina comercial *R368* (ver propriedades no Anexo III, Tabela A3.1) fornecida pela Euroresinas (Sonae Indústria). Foram testados três níveis de factor X de resina UF: 6.56, 6.9 e 7.25%, calculado em massa de sólidos de resina por massa de madeira anidra (ver também Anexo III, Tabela A3.2). A resina foi mais catalisada na camada central (3.19% de extrato seco/massa de resina) do que nas camadas externas (1.11% de extrato seco/massa de resina). O nível de parafina foi de 0.16% de sólidos na camada interna e 0.14% nas camadas externas (base extrato seco/massa de madeira anidra). Na Tabela 5.2 apresenta-se uma formulação típica da cola.

Tabela 5.2 - Formulação da cola para a série de experiências (OHPan, 2009)

	Densidade (kg/m³)	Concentração %	Componente Líquida	Extrato Seco/ Massa Anidra (kg/100 kg mad. seca)	Extrato seco/ Massa Resina (kg/kg sólidos resina)
Camada Externa (CE)					
Resina	1.27	64.00	100.00	6.30	100.00
Água	1.00	0.00	73.00	0.00	0.00
Endurecedor	1.17	30.00	2.37	0.07	1.11
Parafina	0.94	61.00	2.33	0.14	2.22
Camada Interna (CI)					
Resina	1.27	64.00	100.00	6.90	100.00
Água	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Endurecedor	1.17	30.00	6.80	0.22	3.19
Parafina	0.94	61.00	2.43	0.16	2.32

Para cada *mix* de madeira foram realizadas duas operações de encolagem, uma para a camada externa, e outra para a camada interna.

Condições de prensagem e ensaios físico-mecânicos

Após a encolagem, os colchões foram formados manualmente em recipientes de alumínio com as dimensões 200x220x80 mm. A prensagem dos Aglomerados de Partículas foi realizada numa prensa laboratorial controlada por computador e equipada com termopares,

sensor de posição (LVDT), célula de carga (força) e transdutores de pressão (Figura 5.2). Este equipamento permite a medição em tempo real da temperatura e da pressão do gás no interior do colchão, e a manipulação da sua espessura (medindo-se a resposta em tensão). O ciclo de prensagem (duração das etapas, velocidade de fecho da prensa em cada etapa, temperatura dos pratos) foi programado de forma a simular a prensagem contínua do Aglomerado de Partículas (Ranita, *et al.*, 2005; Carvalho *et al.*, 2006). (O resumo das condições operatórias de prensagem das diversas séries de experiências está apresentado no Anexo III, Tabela A3.3).

A espessura alvo de acordo com o pretendido foi de 17 mm, e a massa volúmica média final alcançada foi de (630 ± 20) kg/m³. A todos os painéis, depois de prensados, foi-lhes retirado a forma de alumínio, de modo a possibilitar a dissipação do vapor de água. Todos os painéis foram pesados antes e imediatamente a seguir à prensagem. Desta forma, consegue-se ter uma perceção e controlo mais eficientes da prensagem, porque se verifica que a massa perdida no processo é semelhante, para as mesmas temperaturas dos pratos. Os painéis foram então cortados, e acondicionados durante 3 dias numa câmara climática regulada para condições normais de temperatura e humidade (20 °C e 65% HR).

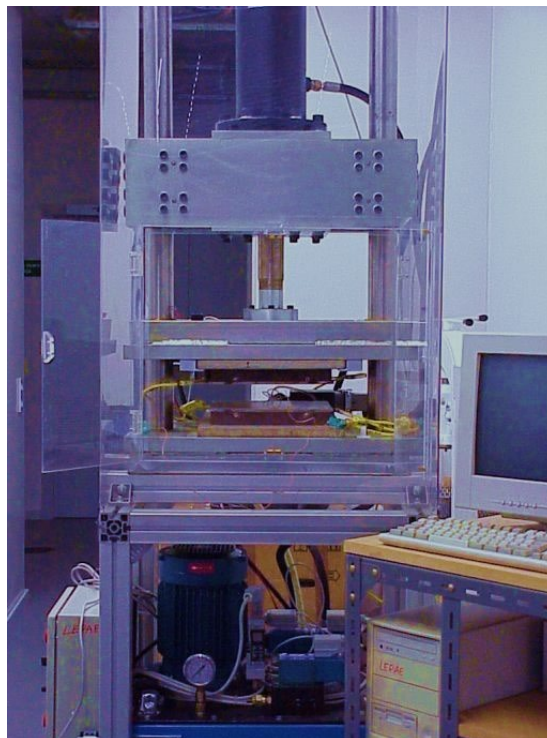


Figura 5.2 - Prensa laboratorial de pratos quentes controlada por computador (Ranita, *et al.*, 2005; Carvalho *et al.*, 2006; OHPan, 2006-2009)

Para avaliar o desempenho das placas de Aglomerado de Partículas produzidas, foram determinadas as propriedades físico-mecânicas de acordo com o procedimento experimental

descrito nas normas europeias para placas de derivados de madeira. Para este efeito determinou-se: a massa volúmica (MV) (NP EN 323), o teor de água (TA) (NP EN 322), o inchamento em espessura (IE) após 24 hr (NP EN 317), a resistência à flexão (RF) e módulo de elasticidade (MOE) (NP EN 310), e a resistência à tração perpendicular ao plano, vulgo resistência interna (RI) (NP EN 319). A descrição destes ensaios e respetivas expressões de cálculo estão vertidas no Capítulo I, na Secção 1.4. Na série de experiências do presente capítulo, a única propriedade analisada foi a resistência interna (RI), tendo sido primeiramente relacionada com as condições operatórias de prensagem, e subsequentemente usada na caracterização da qualidade da aresta maquinaada.

Na Tabela 5.3 resumem-se as principais propriedades físico-mecânicas dos Aglomerados de Partículas usados especificamente para o estudo da maquinação e caracterização da qualidade aresta.

Tabela 5.3 - Propriedades físico-mecânicas dos provetes usados nos ensaios de maquinação (OHPan, 2009)

Nº	Ref. Painel	MV (kg/m ³)	IE (%)	RI (MPa)	HCOH (mg / 100 g placa seca anidra)	Observações
124	421-422	601	24,20	0,30	5,80	50% reciclados na CI
	424-425	608	25,85	0,33	3,90	
172	655-656	624	24,50	0,27	3,30	reciclados na CI
	658-659	635	19,80	0,51	3,90	
125	427-428	566	27,95	0,12	4,00	100% reciclados na CI
	430-431	611	26,95	0,19	4,20	
130	454-455	661	23,45	0,37	5,50	40% reciclados na CI
	456-457	659	23,80	0,51	4,70	
168	634-635	630	24,30	0,33	2,40	reciclados na CI
	637-638	619	23,45	0,32	3,40	
140	507-508	629	27,70	0,27	2,80	80% reciclados na CI
	509-510	638	28,70	0,31	1,60	
160	595-596	640	24,65	0,31	2,40	60% reciclados na CI
179	690-691	631	23,60	0,31	3,10	30% reciclados na CI
	693-694	630	25,70	0,39	3,50	
181	703-704	637	28,60	0,30	2,70	- S -
	706-707	623	26,60	0,28	4,20	

5.1.2 Condições e níveis de maquinação

O corte dos provetes foi realizado com recurso ao uso de uma serra de disco de 300 mm de diâmetro, 48 elementos cortantes e 3.2 mm de espessura, à semelhança da usada nos ensaios preliminares P2. Uma vez que a condição da ferramenta é um aspeto que influencia diretamente o estado da superfície maquinada, por via sobretudo do desgaste que esta vai sofrendo com o tempo, procurámos minimizar os seus efeitos na superfície maquinada através da verificação/manutenção permanente do estado dos elementos cortantes. (O esquema de corte dos provetes usado para os diversos ensaios está ilustrado no Anexo III, Figura A3.1).

Os níveis de maquinação estabelecidos para estes ensaios consistiram em duas velocidades de avanço (9 m/min e 17 m/min), e duas frequências diferentes (30 Hz e 50 Hz). Na Tabela 5.4 apresentam-se os níveis de maquinação seleccionados para a série de ensaios.

Tabela 5.4 – Níveis de maquinação estudados

Velocidade de avanço (m/min)	Avanço por dente (mm)	
	30 Hz	50 Hz
9	0.097	0.059
17	0.184	0.111

Como o objetivo de efetuar a manipulação e a medição *online* das diversas condições operatórias, seguiu-se o protocolo de instrumentação que já foi descrito no ponto 4.2.1 do Capítulo IV. Com a máquina assim instrumentada, foi possível obter e gravar informação relativa às condições de maquinação (velocidade de avanço, avanço por dente e energia específica de corte) e os sinais de vibração obtidos através dos sensores piezoelétricos. Para aquisição e controlo dos sinais usou-se a aplicação desenvolvida em LabView[®], e aperfeiçoou-se o módulo em Matlab[®] que permitiu calcular a velocidade efetiva de avanço por dente (f_z) através das Transformadas Rápidas de Fourier por aplicação de filtros dos sinais de vibração.

5.1.3 Caracterização objetiva da aresta de corte

Para a caracterização da qualidade da aresta resultante da maquinação, foi usado o equipamento de visão artificial descrito na secção 4.1 do capítulo anterior. Como aí referimos, a máquina foi ligada a um computador, que recorrendo ao *software* LabView[®], possibilitou a aquisição e processamento das imagens. O tratamento numérico das imagens foi efetuado numa aplicação externa desenvolvida em Matlab[®]. A metodologia usada no tratamento das

imagens está ilustrada na Figura 4.8, e descrita no parágrafo que a antecede, denominado de *Avaliação da qualidade da aresta*.

5.1.4 Sumário do *design* das experiências

Na Tabela 5.5 resumem-se os fatores e níveis das experiências efetuadas. Devido ao elevado número de parâmetros/níveis envolvidos, foi utilizado o método Taguchi para planeamento destas experiências (através do *software* estatístico comercial JMP), tendo-se obtido uma matriz L18.

Tabela 5.5 – Resumo dos fatores e níveis estudados

Fatores	Níveis					
	1	2	3	4	5	6
<i>mix</i> de madeira na CI	MixS	Mix40	Mix50	Mix60	Mix80	Mix100
Temperatura dos pratos (°C)	195	220	245			
Tempo de prensagem (ou tempo do ciclo de prensagem) (s)	90	120				
Fator Fx (g de sólidos de resina/100 g madeira seca)	6.56	6.9	7.25			

Para avaliar o nível de significância dos efeitos dos diferentes fatores foi realizada uma análise de variância (ANOVA). Por cada experiência foram consideradas três réplicas. Foram produzidos 54 painéis, dos quais 36 foram maquinados, o que resultou em 72 provetes destinados à avaliação da qualidade da aresta. Por cada provete foram colhidas 6 imagens que originou num total de 432 imagens processadas. Para o tratamento numérico foi usado o procedimento descrito em 4.2.1.

5.2 Resultados e discussão

A Figura 5.3 mostra a variação da resistência interna (*RI*) com o *mix* de madeira para as três temperaturas dos pratos testadas. Observa-se que a *RI* diminui com o aumento da percentagem de madeira reciclada adicionada. Os melhores resultados são obtidos para a temperatura dos pratos de 220 °C. Nesta Figura, representam-se a tracejado as linhas que indicam as especificações para uma placa industrial do tipo P2 (0,35 MPa) e tipo P1 (0,24 MPa) para uma gama de espessuras (> 13 a 20 mm).

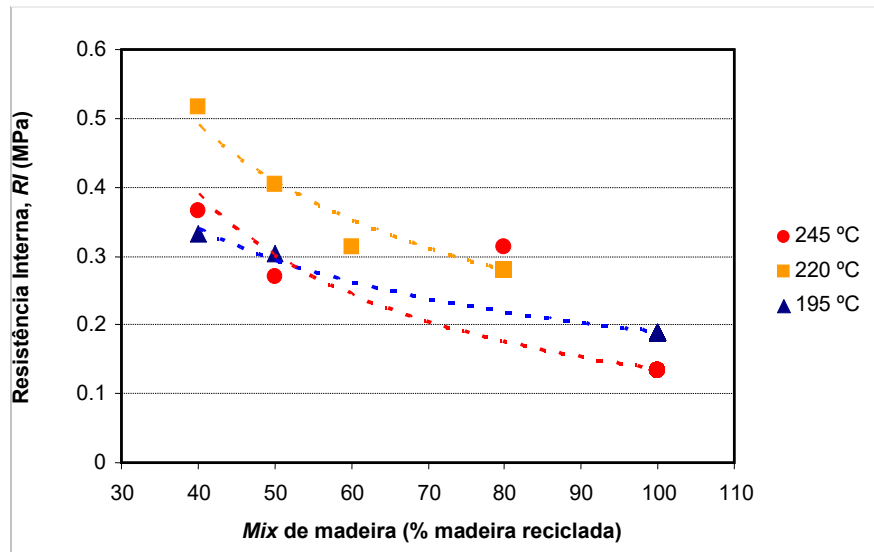


Figura 5.3 - Resistência interna em função do *mix* de madeira para as três temperaturas dos pratos

A Tabela 5.6 mostra os resultados ANOVA para a qualidade da aresta avaliada pelo critério *total waviness* (T_w). Verifica-se que todos os fatores relacionados com a produção dos aglomerados são muito significativos. Todavia, os resultados da análise ANOVA não mostram qualquer diferença significativa para os fatores respeitantes à maquinação (avanço por dente), bem assim, como para os critérios usados para o sistema de visão artificial (fonte de luz e posição da imagem). Estes resultados confirmam que a qualidade da aresta não é influenciada pelo método de obtenção das imagens.

Tabela 5.6 – Nível de significância dos efeitos dos diferentes fatores no critério de qualidade total waviness (T_w)
(NS-não significativo, *5%, **1%, ***0.1%)

Fatores	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	F ratio	p-value	Nível de significância
<i>mix</i> de madeira	5	11.3388575	100.966613	2.6741e-67	***
Resina	2	2.75368634	61.300352	9.0734e-24	***
Tempo de prensagem (s)	1	5.56570431	247.798472	3.0185e-43	***
Temperatura dos pratos (°C)	2	0.54937778	12.2298067	0.00000715	***
Avanço por dente (mm)	1	0.00445028	0.19813721	0.6564848	NS
Fonte de luz / posição	5	0.0069006	0.06144622	0.9974835	NS

Na Tabela 5.7 apresenta-se o nível de significância dos efeitos dos diferentes fatores na energia específica de corte (E_s).

Tabela 5.7 – Nível de significância dos efeitos dos diferentes fatores na energia específica de corte (E_s)
(NS-não significativo, *5%, **1%, ***0.1%)

Fatores	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	F ratio	p-value	Nível de significância
<i>mix</i> de madeira	5	29080.42	16.1664967	1.9081e-14	***
Resina	2	111.109892	0.15442157	0.85696501	NS
Tempo de prensagem (s)	1	24.285394	0.06750414	0.79514823	NS
Temperatura dos pratos (°C)	2	901.265077	1.2525867	0.28695429	NS
Avanço por dente (mm)	1	5308.90354	14.7567283	0.00014352	***
Fonte de luz / posição	5	1.88815234	0.00104967	0.99999989	NS

Pela análise da Tabela 5.7 verifica-se que o *mix* de madeira tem um importante nível de significância no parâmetro de maquinação E_s . Constata-se que aumentando a percentagem de madeira reciclada a energia específica de corte (E_s) diminui. Uma possível explicação poderá estar no facto da madeira reciclada estar envelhecida e ter sido reprocessada, ou seja, sujeita a um tratamento térmico (secagem) e mecânico (destroçamento), o que torna as partículas mais frágeis. As outras condições de operação, tempo de prensagem e temperatura dos pratos não apresentam nível de significância. Como era de esperar E_s é significativamente afetada pelo avanço por dente (fz). Neste caso particular, um aumento do avanço por dente (fz) conduziu a um aumento da energia específica de corte (E_s), o que contraria os resultados do capítulo anterior, bem assim como os resultados obtidos em trabalhos de investigação que se encontram publicados na literatura da especialidade. Este facto pode ter sido devido à grande variedade de material usado para a composição das placas (proveniente de diferentes fontes), que eventualmente contribuíram para atuar de forma distinta nas forças de corte, promovendo relações não diretas com as velocidades de corte (V_c), e com o avanço por dente (fz), que consequentemente se refletiram na energia específica de corte (E_s).

Na Figura 5.4 podemos observar o efeito dos níveis dos fatores no critério de qualidade *total waviness* (Tw). No caso do *mix* de madeira o Tw diminui com a percentagem de madeira reciclada no *mix* por volta dos 50%, e aumenta significativamente para o *mix* 80% e 100%. A presença de partículas quebradiças na madeira reciclada conduz com relativa facilidade a uma fraca qualidade da aresta. Estes resultados estão em bom acordo com os

obtidos em alguns trabalhos científicos que investigaram a influência da madeira reciclada nas propriedades físico-mecânicas, particularmente o inchamento em espessura (Pinto *et al.*, 2008). Em relação à resina, a qualidade mais baixa da aresta ocorre para o factor Fx de 6,9%. Relativamente às condições de prensagem verifica-se que o *total waviness* é elevado para os 120 s de tempo de ciclo de prensagem, o que pode ser explicado devido ao aumento da rigidez do painel. A esta mesma conclusão já haviam chegado Pinto *et al.*, 2008, que mostraram que a resistência interna aumenta ligeiramente com o tempo de prensagem provocando um aumento da rigidez do painel. No caso da temperatura dos pratos, a qualidade da aresta deteriora-se para elevadas temperaturas, todavia, para o nível 245 °C observa-se uma ligeira melhoria comparativamente a 220 °C. Esta situação pode ser explicada pela resistência interna, uma vez que o valor máximo de RI verifica-se no nível 220 °C. Kowaluk *et al.* (2004) verificaram que a energia de formação das aparas para uma temperatura dos pratos de 220 °C é ligeiramente mais baixa do que a 180 °C, devido ao material se encontrar mais frágil.

Na Figura 5.5 apresenta-se a variação do critério *Tw* em função da *RI*, obtida para diversos provetes ensaiados. Constata-se que a relação entre estas duas propriedades não é claramente evidente. Porém, parecem existir duas características diferentes que podem explicar os resultados. Visivelmente, a melhor qualidade da aresta é obtida para valores de *RI* por volta de 0,3 MPa (com exceção do Mix80, intencionalmente segregado do gráfico da Figura 5.5). Abaixo deste valor as placas não possuem consistência suficiente, o que significa que poderão ocorrer desagregações de partículas durante o corte.

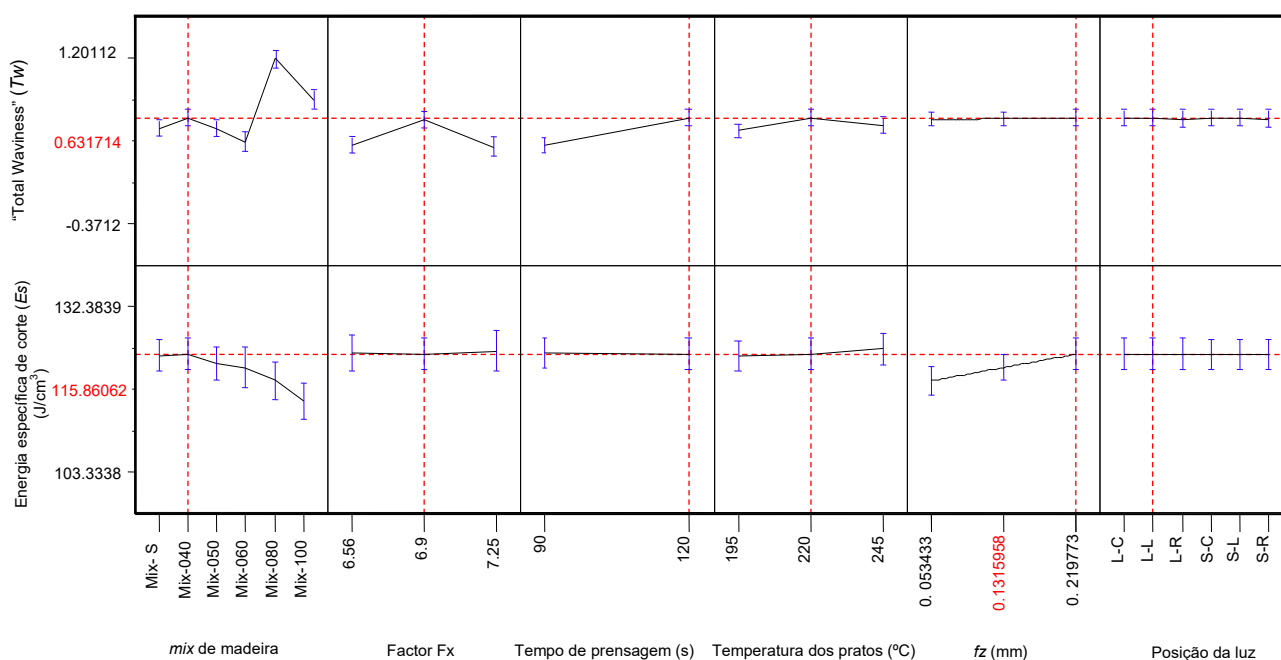


Figura 5.4 - Efeito dos níveis dos fatores no *total waviness* (*Tw*) e na energia específica de corte (*Es*)

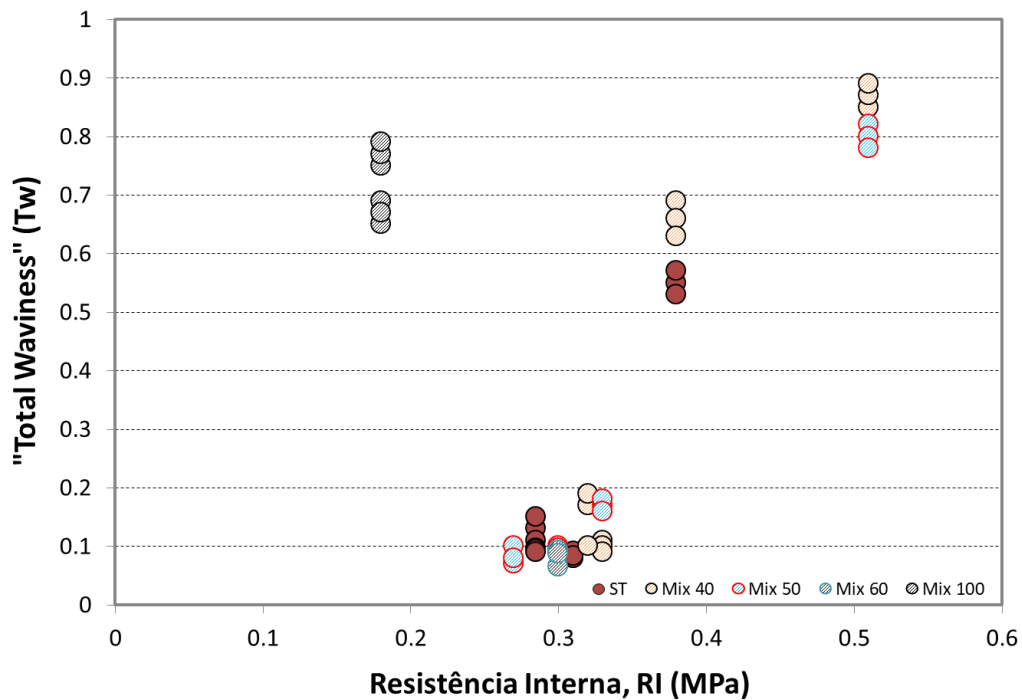


Figura 5.5 – Resultados experimentais do “Total waviness” (T_w) em função da resistência interna (RI) e do *mix* de madeira

Observa-se ainda na Figura 5.5, que acima de 0,3 MPa, as placas possuem maior rigidez, no entanto, as características geométricas das ferramentas, e particularmente a força do impacto do dente no PB, provocaram significativo dano na aresta (perfil maquinado). Julgamos por isso, que as ferramentas de corte devam ser redesenhadas (ângulo de ataque e interno) com o objetivo de reduzir a desagregação das partículas, e conseqüentemente contribuir para melhorar a qualidade da aresta.

5.3 Conclusões

A influência do *mix* de madeira (percentagem de madeira reciclada) e alguns parâmetros de produção dos Aglomerados de Partículas na qualidade da aresta de corte foi apresentada e analisada ao longo deste capítulo. Os seguintes fatores foram considerados na produção dos aglomerados: o *mix* de madeira, a resina, o tempo de prensagem e a temperatura dos pratos da prensa. Os efeitos destes fatores no critério de qualidade (*total waviness*) e nas variáveis dependentes das condições de maquinação (energia específica de corte) foram aqui alvo de particular investigação. A influência dos parâmetros arrolados ao sistema de visão artificial (fonte de luz e posição da imagem), foram também objecto de estudo. Da análise dos resultados apresentados neste capítulo, extraímos as seguintes conclusões:

- Para o critério de qualidade “total waviness”, o *mix* de madeira e os parâmetros de produção (resina, tempo e temperatura de prensa) são fortemente significativos. Uma elevada percentagem de madeira reciclada conduz a uma fraca qualidade da aresta, devido ao facto das frágeis partículas da madeira reciclada se desagregarem com relativa facilidade. Os resultados não são afetados pelo método de captação das imagem, o que permite concluir que este sistema pode ser aplicado de forma directa numa máquina de corte industrial.

- Para a energia específica de corte (E_s), o *mix* de madeira é muito significativo, no entanto, as condições de produção dos aglomerados não se revelam significativas. O efeito do avanço por dente (f_z) é igualmente muito importante para este parâmetro de resposta, facto que deve ser tomado em consideração no fabrico das ferramentas de corte com o objetivo principal de melhorar o seu desempenho no seu processo de maquinação.

- A resistência interna (RI) tem forte influência na qualidade da aresta, por esta razão jugamos que (também aqui) as ferramentas de corte devam ser redesenhadas com o objetivo de reduzir a desagregação das partículas, e consequentemente contribuir para melhorar a qualidade da aresta.

5.4 Referências bibliográficas

Carvalho L.H., Ranita J., Garrido N., Martins J., Costa C., (2006): “OHPan-Production of environmentally compatible particleboard from different species of wood and waste wood: preliminary results”. Proceedings of the Conference Wood Resources and Panel Properties COST E49/E44, AIDIMA, p. 321, Valencia, Spain, 12-14 June 2006.

Kowaluk G., Dziurka D., Beer P., Sinn G., Teschegg S., (2004): “Influence of particleboard production parameters on work of fracture and work of chips formation during cutting”. Electronic J. of Polish Agricultural Universities, 7 (1) (available Online: <http://www.ejpau.media.pl/volume7/issue1/wood/art-01.html>)

Garrido N., Martins J., Carvalho L.H., Mendes J.G., Costa C., (2009): “Effect of recycled wood on particleboard machining”, Workshop Proceedings of COST E49 “Adding Value through Physical Functionality”, Edited by Prof. Dr. M.Hakkı ALMA and Prof. Dr. Hulya KALAYCIOGLU, pp. 86-99, Istanbul, Turquia, 28-29 Abril 2009. (oral presentation)

Iždinský, J.; Reinprecht, L.; Vidholdová, Z., (2021):”Particleboards from Recycled Pallets”. Forests 2021, 12, 1597. <https://doi.org/10.3390/f12111597>

Memorandum of Understanding of COST E49, (2005): “Processes and Performance of Wood-based panels”.

Pinto B., Pereira J., Martins J. and Carvalho L.H.C., (2008): “Effect of recycled wood on the performance of particleboard”. IPPS (International Panel Products Symposium) 2008, Espoo, Finland: 299-308

Projeto OHPan, (2006-2009): “Produção de aglomerados de partículas ambientalmente compatíveis a partir de madeira de diversas espécies e resíduos de madeira”. Escola Superior de Tecnologia de Viseu; Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; Sonae Arauco Portugal, S.A., Código do projeto: 13-05-04-FDR-00025, (2006-03-01 a 2008-06-30).

Ranita J., Martins J., Garrido N., Carvalho L., Costa C., (2005): “Influência do ciclo de prensagem na qualidade do aglomerado de partículas de Madeira fabricado com um teor elevado em partículas recicladas”. Actas do 5º Congresso Florestal Nacional, (CD-ROM) T4-20, 10 pages, I.S.P.V., Viseu.

Thoemen, H. (2006): “The Effects of the Wood Raw Material on Panel Properties: A Fundamental Approach”. Wood resources and panel properties: conference proceedings: Cost Action E44-E49, Valencia, Spain, 12-13 June 2006. Valencia: AIDIMA, Furniture, wood and packaging technology institute, 2006

Van Riet C., (2006): “Competition for wood resources-impact on wood-based panels”, in Proceedings of the COST E44-E49 Conference on Wood Resources and Panel Properties”, AIDIMA, Valencia: 1-8.

Yel, H., (2015): “Effects of some manufacturing factors on the properties of cement bonded 359 particleboards”. PhD. Dissertation. Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey.

Yel H., Cavdarb A., Torunc S., (2020): “Effect of press temperature on some properties of cement bonded particleboard”. Maderas: Ciencia y Tecnología 22(1): 2020. DOI: 10.4067/S0718-221X2020005000118

CAPÍTULO VI

IMPACTO DE CAPTADORES DE FORMALDEÍDO NA MAQUINAÇÃO¹

Influência na qualidade da aresta de corte

¹ Este capítulo esteve na base da elaboração e apresentação de um artigo num congresso internacional em Nantes-França (Garrido *et al.*, 2009).

Introdução

A preocupação com as emissões de formaldeído dos painéis derivados de madeira, colados com resinas à base de formaldeído, em conjunto com os regulamentos e exigências impostas pelas autoridades, forçaram os fabricantes destes produtos a atingir níveis mais baixos de emissões de formaldeído, idêntico ao nível de emissões da madeira natural. De acordo com Agência Internacional de Investigação para o cancro, o formaldeído é considerado como "carcinogéneo para os seres humanos", o que tem motivado forte preocupação nos trabalhadores e nas associações de consumidores, autoridades reguladoras e na própria indústria (Athanassiadou *et al.*, 2007, citado em Garrido *et al.*, 2009). Por esta razão, persiste a necessidade de continuar a encontrar novas soluções para produzir painéis com baixas emissões de formaldeído, sem perda de produtividade e qualidade, e sem aumentar consideravelmente os custos de produção. Em termos de normalização foi conseguido algum avanço pela introdução da norma “EN 16516:2017 - Construction products: Assessment of release of dangerous substances - Determination of emissions into indoor air”, que introduziu um novo método de referência para determinação (usando uma câmara) das emissões de formaldeído de produtos de derivados de madeira para fabrico de mobiliário e outros materiais de construção. Esta norma restringe os limites da emissão de formaldeído da classe europeia E1, determinada pelo método da câmara (EN 717-1:2004), de 0,1 ppm para 0,05 ppm. Porém, verifica-se que não existe ainda uma norma europeia consensual para a medição e controlo de formaldeído e outros compostos voláteis em espaços interiores, principalmente para baixas concentrações de formaldeído. Este facto constitui um dos principais riscos para a indústria dos painéis de madeira (Hemmilä *et al.*, 2019; citado em Martins, 2020).

Durante a produção dos aglomerados, a emissão do formaldeído acontece principalmente nos processos de secagem e na prensagem a quente, onde se evapora e liberta em conjunto com o vapor de água. O formaldeído livre que está presente nas resinas de ureia-formaldeído (UF) e a degradação destas por hidrólise (reversibilidade das ligações de aminometileno) são responsáveis pela emissão de formaldeído dos painéis derivados de madeira (Carvalho *et al.*, 2012). A fim de diminuir a presença do formaldeído nas resinas aminoplásticas, a razão molar F/U (formaldeído/ureia) destas resinas tem vindo a diminuir drasticamente nas últimas décadas. Contudo, esta abordagem tem consequências na reatividade e grau de cura da resina, uma vez que o formaldeído é necessário para induzir a cura da resina. Um processo alternativo consiste em combinar resinas de baixas emissões com

captadores. Estes produtos químicos podem ser adicionados numa forma sólida misturada com partículas de madeira antes da mistura da resina, ou numa solução aplicada diretamente às partículas de madeira antes de secarem ou serem misturadas com a resina. Várias patentes já foram registadas sobre esta questão, mas a maioria das soluções, mesmo contribuindo para a diminuição de libertação do formaldeído, comprometem o desempenho físico-mecânico dos painéis. As emissões de formaldeído dos produtos finais dependem principalmente da composição da resina, do *mix* madeira e dos parâmetros do processo de produção. No entanto, a idade dos painéis, a sua estrutura e acondicionamento/armazenamento, têm igualmente forte influência nas emissões (Dunky *et al.*, 2001).

Os captadores de formaldeído mais comuns são: ureia sólida ou em solução (Park *et al.*, 2008), sais de amónio, sais amónio e sais de metais alcalinos contendo aniões enxofre, e compostos com funcionalidade –NH (Myers, 1986). Alguns deles estão também presentes em captadores comerciais como é o caso do metabissulfito de sódio e de amónio. Carvalho *et al.*, (2012), referem como exemplos de captadores de formaldeído usados na indústria: a ureia em solução aquosa ou em pó, os sulfitos (metabissulfito de sódio, bissulfito de amónio e metabissulfito de sódio encapsulado), as resinas captadoras de formaldeído (como resinas UF com razão molar F/U bem menor que 1,0) e as parafinas funcionalizadas. Referem ainda como alternativa, a utilização de resinas de base natural livres de formaldeído. Outros exemplos são as ligações de formaldeído-parafinas (Sundin *et al.*, 1997), variedades metamórficas de tufos vulcânicos (Kim, 2009) e mesmo captadores de base biológica como amido, lenhina, tanino, casca de arroz e carvão vegetal (Eom *et al.*, 2006).

Saliente-se na literatura o trabalho de Costa *et al.*, (2013a), onde foram investigadas diferentes aplicações do metabissulfito de sódio como captador de formaldeído. O captador foi misturado com resinas de ureia-formaldeído com diferentes razões molares de formaldeído para ureia, e adicionados separadamente na produção de painéis de partículas. Foram encontradas várias diferenças entre o teor de formaldeído e as propriedades físico-mecânicas das placas. Estes autores referem ainda que o tipo de resina à base de formaldeído e a forma de adição de captadores são os principais fatores que afetam a eficiência de remoção de formaldeído. Em trabalho posterior Costa *et al.*, (2013b), verificaram a influência da adição de três captadores de formaldeído em painéis em que o agente adesivo foi uma resina UF com razão molar formaldeído/ureia 0,94: metabissulfito de sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) sólido em pó, bissulfito de amónio (NH_4HSO_3) em solução aquosa e ureia ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) sólida em grãos na camada interna e em solução aquosa na camada externa. Foi investigado o impacto de cada

um dos captadores e respetivo rácio de incorporação na resistência à tração e inchamento em espessura das placas produzidas. Concluíram que os aglomerados com metabissulfito de sódio e com ureia não apresentaram redução significativa nas propriedades físico-mecânicas medidas, até rácios de incorporação (massa de sólidos de captador por massa de sólidos resina) de 15%. Porém, constataram que quando utilizam bissulfito de amónio as propriedades físico-mecânicas diminuem. Em Costa *et al.*, (2014) encontramos um estudo onde foi investigado o desempenho de captadores para reduzir as emissões de COVs em painéis de aglomerados fabricados com pinho (*Pinus pinaster Ait.*), choupo (*Populus spp.*), e resina UF misturada com melamina. O metabissulfito de sódio mostrou ter um desempenho excelente na redução das emissões de aldeídos que representam quase 50% das emissões totais dos Aglomerados de Partículas fabricados com pinho. Contudo, no caso dos aglomerados fabricados com choupo a redução dos COVs totais não foi significativa.

Durante a maquinação de produtos derivados de madeira, vários mecanismos de desgaste podem simultaneamente contribuir para o desgaste geral da ferramenta de corte. Entre estes mecanismos de desgaste estão a fratura ou esmilhamento, abrasão, erosão, microfratura, corrosão química e electroquímica, e oxidação (Sheikh-Ahmad e Baily, 1999). As características abrasivas dos captadores de formaldeído podem afetar a maquinabilidade dos painéis derivados de madeira. É sabido que substâncias como o amido quando adicionadas como cargas à resina na produção de contraplacados aumentam o desgaste das ferramentas. Todavia, e na medida do nosso horizonte de conhecimento, não existe na literatura publicada nenhum trabalho que tenha investigado a influência dos captadores de formaldeído na maquinação dos Aglomerados de Partículas.

Neste capítulo, apresentamos a série de experiências onde analisámos o impacto dos captadores de formaldeído na maquinação e na qualidade da aresta de corte. Num trabalho preparatório foram ensaiados vários captadores de formaldeído com o objetivo de analisar a sua influência nas propriedades físico-mecânicas e na emissão de formaldeído. A partir deste trabalho alguns captadores foram selecionados: ureia sólida com diferentes granulometrias, ureia em solução, metabissulfito de sódio e amido. O efeito destes aditivos foi estudado tendo em conta os factores de maquinação (avanço por dente, velocidade de rotação) nos parâmetros de resposta (energia específica de corte, forças de corte e qualidade relativa da aresta). A qualidade da aresta foi medida através do sistema de visão artificial anteriormente apresentado.

6.1 Produção dos aglomerados

6.1.1 Composição do *mix* de madeiras

Os painéis usados nesta série de ensaios foram fabricados a partir de madeira fornecida pela empresa produtora de Aglomerados de Partículas, Sonae Indústria P.C.D.M (atual Sonae Arauco), unidade de Oliveira do Hospital.

Foram utilizadas misturas *standards* para as camadas externas e central. No caso da camada central, a composição da mistura de madeira incluía: 25 % de pinheiro bravo (*Pinus Pinaster*), 15 % de eucalipto (*Eucalyptus Globulus*), 30 % de serrim de pinho e 30 % de madeira reciclada. As partículas da camada interna foram acondicionados numa câmara climática a 70 °C e 20 % de humidade relativa, até atingirem 4 % de teor de água. O teor de água das partículas das camadas externas foi de 3,5 %. As condições de acondicionamento das partículas seguiram o mesmo protocolo do capítulo anterior. Depois desta operação, as partículas foram novamente refinadas utilizando um moinho de lâminas rotativas com uma malha quadrada de 10 mm, a fim de se obter em todas as experiências uma distribuição granulométrica e armazenamento semelhantes.

6.1.2 Adição dos captadores e condições de colagem

Para a produção dos Aglomerados de Partículas (classe E1), foi usada uma resina UF comercial (fornecida pela Euroresinas, que atualmente pertence à Sonae Arauco). As partículas de madeira foram então misturadas com a resina e a parafina num misturador de laboratório. O fator de resina foi de 6,3 % de resina sólida nas camadas externas, e 6,9 % na camada interna, com base no peso das partículas de madeira secas em estufa. A resina foi mais catalisada na camada central (3 % de sólidos com base no extracto seco/ massa de resina), do que nas camadas externas (1 % de sólidos com base no extracto seco/ massa de resina). O nível de parafina foi de 0,15 % de sólidos (com base no extracto seco/ massa anidra da madeira).

Como referimos na introdução, a partir dos resultados de um trabalho preliminar onde vários captadores de formaldeído foram testados, foi possível escolher os captadores que conduziram a um melhor desempenho dos painéis, baixo nível de formaldeído e com resistência interna aceitável. Assim, os captadores aprovados foram: ureia sólida e ureia em solução (fornecidos pela Euroresinas), metabisulfito de sódio (Panreac) e uma UF pré condensada com amido (fornecida pela Euroresinas) e amido de milho ceroso (fornecido pela

Roquette). No caso da ureia, foram estudadas duas frações diferentes de tamanhos de partículas, uma delas designada por "grosseira", fornecida por um produtor industrial de resinas UF, e a outra classificada como "fina", obtida da ureia "grosseira" após a crivagem através do peneiro de 0,25 mm. Todos os captadores na forma sólida ou líquida foram adicionados às partículas de madeira antes da adição de resina. A mesma formulação de resina foi utilizada para todos os captadores testados. Para cada mistura de madeira e fator de resina, duas operações de mistura foram executadas, uma para as camadas externas e uma para a camada interna.

6.1.3 Condições de prensagem

Os Aglomerados de Partículas de três camadas foram formados manualmente numa forma metálica com 220x220x80 mm. As percentagens totais da massa dos painéis foram: 20% para a camada superior da face, 62 % para a camada central e 18 % para a camada inferior da face. As placas foram então prensadas à escala laboratorial numa prensa de pratos quentes, controlada por computador. O ciclo de prensagem (duração do estágio, tempo de fecho da prensa, temperatura dos pratos) foi programado por forma a simular uma típica operação de prensagem em contínuo de Aglomerado de Partículas. Os valores dos parâmetros do processo estão resumidos na Tabela 6.1 (ver também Anexo III, Tabela A3.3).

Tabela 6.1 - Parâmetros de processo usados na preparação dos Aglomerado de Partículas (camadas CE-faces; camada CI-camada interna)

Parâmetros	Valores
Tamanho dos provetes produzidos (mm)	220x220x16
Massa volúmica média (alvo) a atingir (kg/m^3)	630 ± 20
Teor de água das partículas (%)	CE= 3,5; CI= 4
Teor de resina, % (massa de sólidos de resina/massa anidra das partículas)	CE= 6.3; CI= 6.9
Teor de endurecedor, % (massa de sólidos /massa de sólidos da resina)	CE= 1; CI= 3
Teor de parafina, % (massa de sólidos/massa anidra das partículas)	0.15
Teor dos captadores, % (massa de sólidos composto ativo/massa anidra das partículas)	Diferentes conteúdos (CE, CI)

6.1.4 Ensaio físico mecânicos

Os ensaios físico-mecânicos foram realizados segundo as normas em vigor para os Aglomerados de Partículas, que foram já apresentados e descritos na Secção 1.4 do Capítulo I, bem como as suas expressões de cálculo.

Na Tabela 6.2 apresentam-se as propriedades físico-mecânicas e a quantificação do teor de formaldeído (determinado pelo método do perforador, NP EN ISO 12460-5) dos provetes ensaiados. Estes resultados foram determinados pela equipa do projecto OHPan à semelhança do que aconteceu no estudo do capítulo anterior.

Tabela 6.2 – Propriedades físico-mecânicas e químicas dos painéis seleccionados para a maquinação (OHPan, 2006-2009)

Nº	Ref. Painel	MV (kg/m ³)	IE (%)	RI (MPa)	Teor de HCOH (mg / 100 g placa seca anidra)	Observações
221	844-848	615	22,17	0,30	3,15	Controlo
222	849-853	611	23,10	0,34	3,00	Metabissulfito (0,5/0)
223	854-858	621	23,83	0,42	3,70	Ureia sólida (0/0,5)
224	859-863	625	23,73	0,37	2,50	Ureia em solução (0,5/0,5)
227	870-874	630	26,23	0,32	1,45	Amido (0,8/0,4)

6.1.5 Níveis de maquinação e caracterização objetiva da qualidade da aresta

Os níveis de maquinação seleccionados para esta série de ensaios foram os mesmos que serviram para analisar a influência do *mix* de madeira na maquinação, apresentados no capítulo anterior, e que se repetem aqui por comodidade na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Níveis de maquinação para os ensaios

Velocidade de avanço (m/min)	Avanço por dente (mm)	
	30 Hz	50 Hz
9	0.097	0.059
17	0.184	0.111

A operação de corte foi realizada na máquina multi-funções semi-automática de 5 eixos. Um destes eixos foi equipado com uma lâmina de aço de 300 mm de diâmetro (3,2 mm de espessura) composto por 48 elementos de corte empastilhados, preparado para trabalhar a

uma velocidade máxima de rotação de 3200 rpm (ver esquema de corte, Anexo III, Figura A3.2a). Duas velocidades de avanço (A) e dois níveis de velocidade de rotação (R) foram fixados a fim de se atingir os diferentes níveis de maquinação, conforme se exibiu na tabela anterior.

A máquina de corte foi instrumentada com sensores piezoelétricos, e os dados fornecidos por estes sensores foram recolhidos recorrendo a um sistema de aquisição de dados de alta velocidade, o que possibilitou medir com precisão as forças de corte. Para a avaliação da qualidade da aresta, foi usado o sistema de visão artificial, que permitiu após tratamento numérico, determinar qualidade relativa do perfil da aresta através do critério de ondulação *Total waviness* (Tw). A partir destes sistemas de recolha de dados e dos métodos de tratamento numérico, foi verificada a influência dos vários captadores de formaldeído, nas condições de maquinação (energia específica de corte e forças de corte), e na qualidade do perfil da aresta de corte dos aglomerados.

6.2 Resultados e discussão

Na Figura 6.1, apresenta-se a evolução do teor em formaldeído em função da resistência interna para os captadores estudados. Da análise da Figura 6.1, verifica-se que somente os provetes em que se utilizou ureia (sólida e em solução) como captador, apresentam em média uma resistência interna (RI) acima da especificação, ou seja, de 0,35 MPa para placas tipo P2 (EN 312). No entanto, todos os ensaios apresentam valores muito próximos desse. É de salientar, que apesar da correção dos fatores de perdas, era previsível que os resultados de RI fossem inferiores aos da indústria para o mesmo Fx utilizado. Quanto à emissão de formaldeído podemos constatar que os únicos captadores que apresentam valores de acordo com o requisito E0 (valor do perforador aprox. 2,5 mg/100 g placa seca anidra), são o amido e a ureia em solução. Os resultados de RI da ureia sólida vêm contra os obtidos na indústria, nos quais a RI diminui com a incorporação deste aditivo. Isso poderá dever-se (entre outros fatores) à granulometria das partículas de ureia (utilizaram-se tamanhos de partículas $< 0,18$ mm) e ao Fx de ureia sólida (mais baixo que o usado industrialmente). De forma a tentar perceber-se por que motivo a ureia sólida apresenta valores bastante superiores de RI em relação aos do controlo, foi fabricado um painel onde foi incorporada bastante ureia sólida no interior. Por princípio a ureia deverá fundir, formando um filme rígido que envolvendo as partículas poderá ajudar na sua agregação. Este facto deveria ter sido

eventualmente explorado, no sentido de se averiguar qual a influência da incorporação de ureia sólida como aditivo na resistência à tração interna.

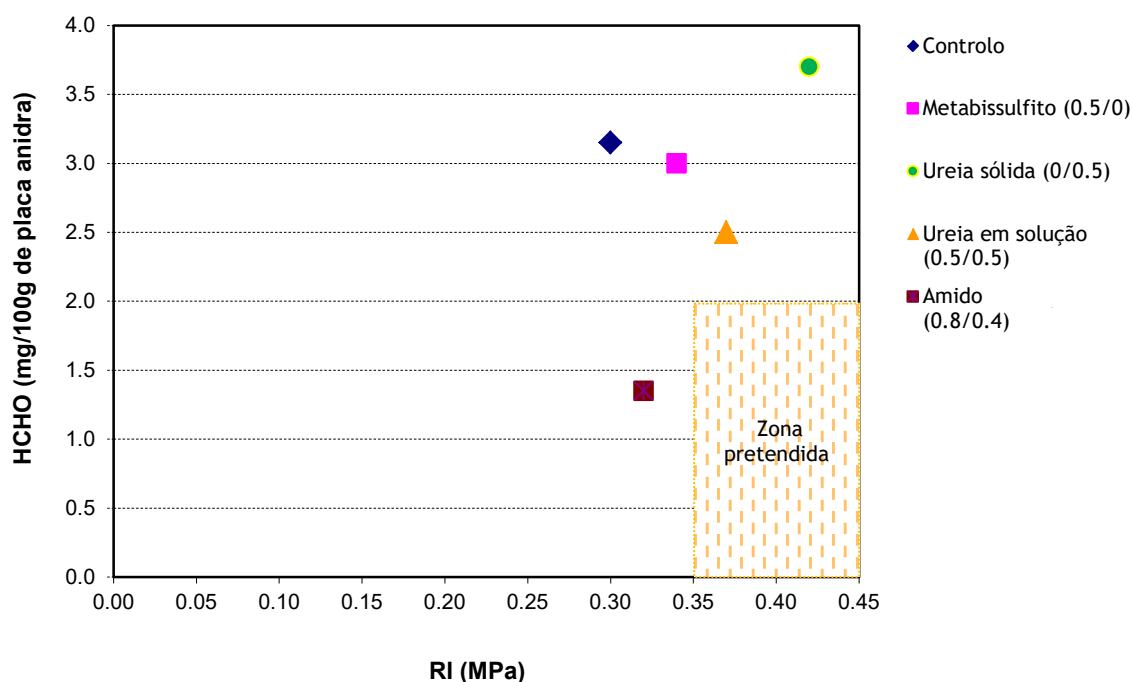


Figura 6.1 - Resultados obtidos de RI e teor de formaldeído para os diversos captadores

Relativamente à influência dos fatores na maquinação e na qualidade da aresta, ilustra-se na Figura 6.2 a relação entre a energia específica de corte (E_s) em função do avanço efetivo por dente (ffz). É possível observar que a incorporação dos captadores tem muito menor influência na energia específica de corte (E_s) durante a operação de corte, do que as condições de maquinação, em particular o avanço efetivo por dente (ffz). A fraca ligação entre os captadores e a resina/madeira pode conduzir a uma maior desagregação das partículas provocando diferentes níveis de atrito no contato íntimo entre o elemento cortante e o Aglomerado de Partículas. Ainda que neste trabalho não seja possível observar este efeito, verifica-se pela Figura 6.2 que a energia específica de corte (E_s) é menor quando se usa ureia sólida, o que pode ser justificado por uma eventual redução do atrito. Embora as condições de maquinação sejam um importante fator de influência na energia específica de corte (E_s), esta depende também das características do material, particularmente da massa volúmica e das propriedades mecânicas. A massa volúmica foi controlada durante a formação e a prensagem dos aglomerados, situação que conduziu ao fabrico de painéis com valores muito semelhantes para esta propriedade (Tabela 6.2). Já as propriedades mecânicas, e nomeadamente a resistência interna (RI), são fortemente afetadas pelos captadores de formaldeído (Figura 6.3).

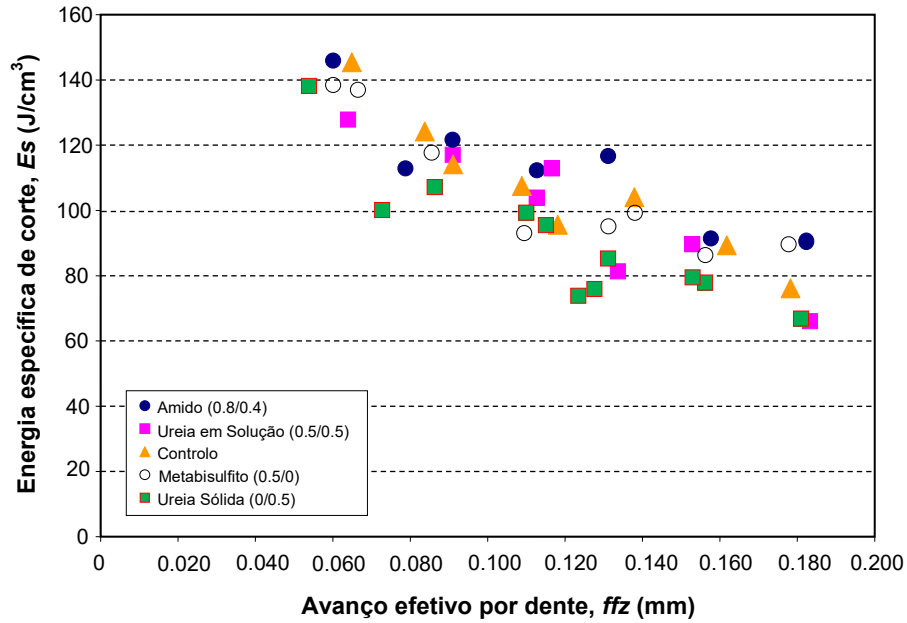


Figura 6.2 – Energia específica de corte (E_s) em função do avanço efetivo por dente (ffz) para diferentes captadores de formaldeído

Na Figura 6.3, está ilustrada a relação entre a energia específica de corte (E_s) e a resistência interna. Pode-se observar que os valores da energia específica de corte (E_s) são diferentes para os captadores para a mesma resistência interna, o que significa que a incorporação de captadores de formaldeído tem efetivamente maior influência na energia específica de corte (E_s) do que a resistência interna (RI).

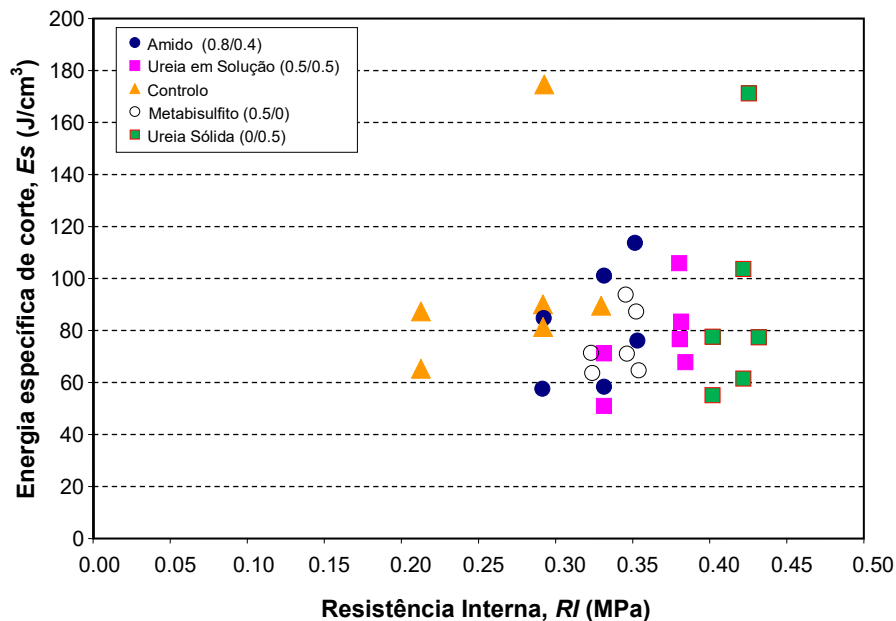


Figure 6.3 - Relação entre a energia específica de corte (E_s) e a resistência interna (RI) para os diferentes captadores

A comparação entre os diferentes captadores apresentados na Figura 6.4, permite concluir que as diferentes estratégias usadas para fazer diminuir o teor de formaldeído tem grande influência não só na energia específica de corte (Es), mas especialmente na qualidade da aresta maquinada. Todos os captadores testados provocaram uma redução significativa na qualidade *relativa* da aresta. O captador com melhor desempenho parece ser a ureia sólida, uma vez que apresenta um decréscimo na energia específica de corte, sendo que, com uma pequena redução na qualidade da aresta. Uma das razões para explicar esta situação, poderá estar no facto da ureia sólida ter sido usada apenas na camada interna. O captador com pior desempenho é o amido da Roquette. Estas conclusões podem ser confirmadas através da Figura 6.5, onde é exibida a influência das forças de corte (F_c) na qualidade *relativa* da aresta maquinada.

Como a ureia apresentou os melhores resultados entre os captadores de formaldeído testados, resolvemos investigar a influência da granulometria das suas partículas na qualidade *relativa* da aresta e na energia específica de corte. A Figura 6.6 mostra a influência da ureia fina e grossa na qualidade *relativa* da aresta e na energia específica de corte. A granulometria das partículas de ureia exerce uma forte influência na qualidade da aresta, embora a utilização de partículas com um tamanho reduzido ($< 0,25$ mm) pareça não afetar a maquinação. Ainda assim, comparáramos este efeito com a resina de controlo, tal como pode ser apreciado na Figura 6.7, que mostra a influência dos valores do avanço efetivo por dente (ffz) na energia específica de corte (Es), para estas três resinas (médias). Os resultados indicam que os valores da Es foram sempre superiores para os dois tipos de ureia. Por conseguinte, a granulometria da ureia deve ser cuidadosamente selecionada com vista à otimização da operação de corte.

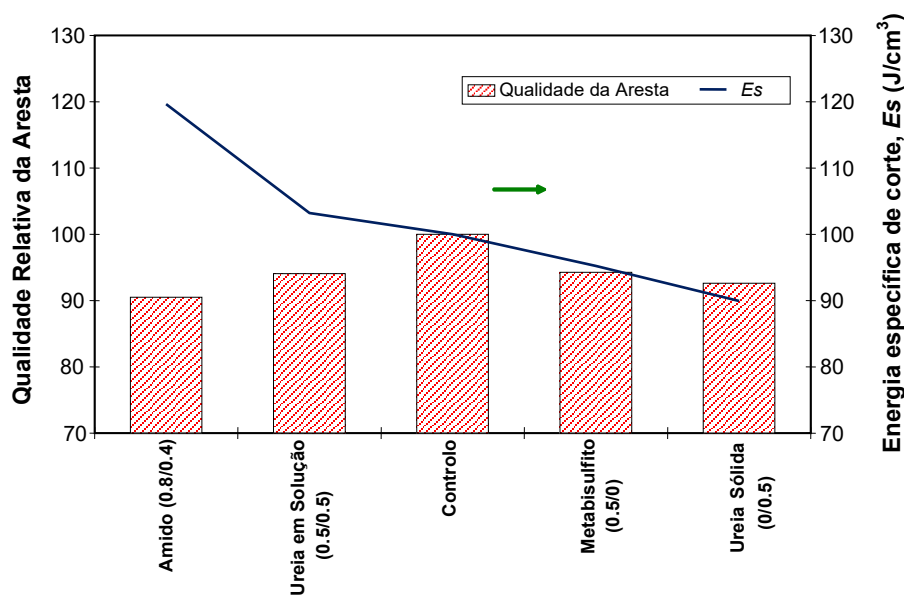


Figura 6.4 – Qualidade relativa da aresta e energia específica de corte (Es) para os diferentes captadores de formaldeído

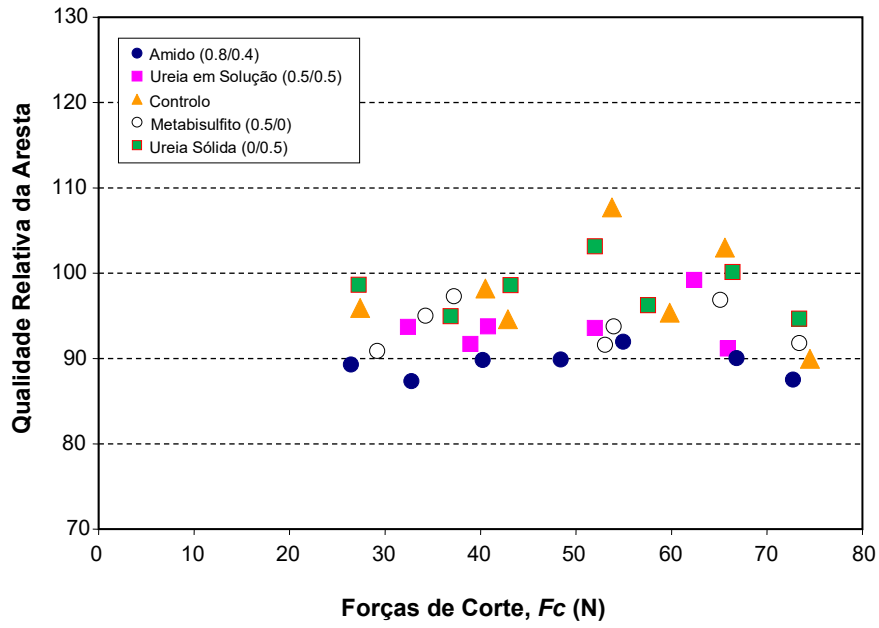


Figura 6.5 – Qualidade relativa da aresta em função das forças de corte (F_c), para os diferentes captadores de formaldeído

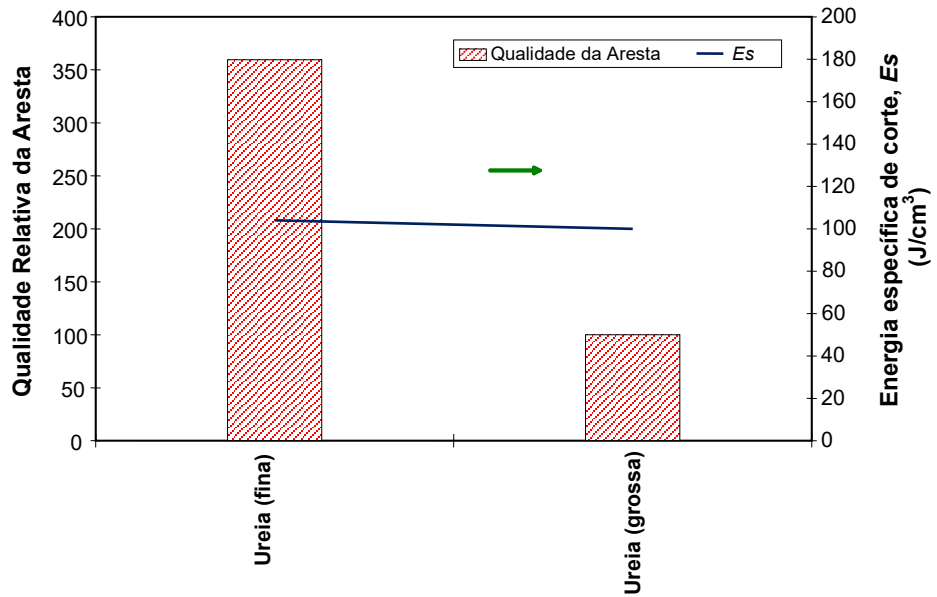


Figura 6.6 – Qualidade relativa da aresta em função da energia específica de corte, para ureia com dois tamanhos de partículas, finas e grossas

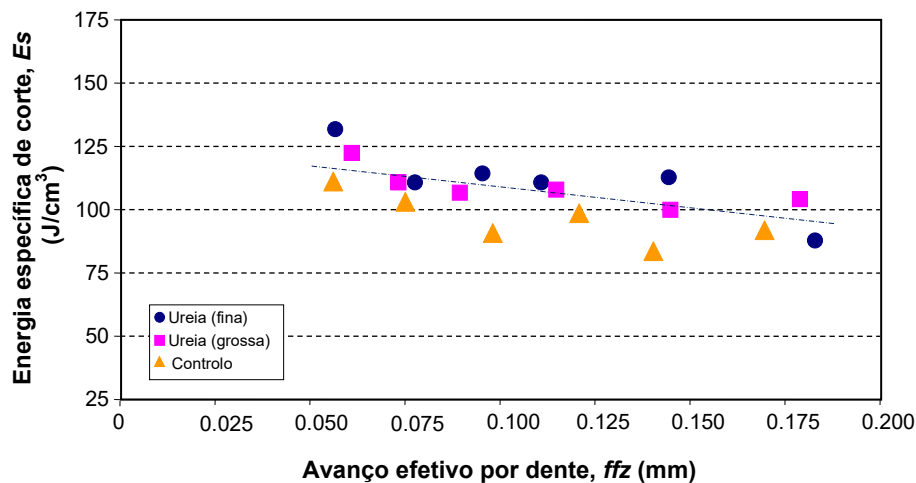


Figura 6.7 – Energia específica de corte (E_s) em função do avanço efetivo por dente (ffz), para ureia com dois tamanhos de partículas, finas e grossas

6.3. Conclusões

Os captadores conduzem a uma diminuição do teor em formaldeído, embora provoquem uma redução nas propriedades físico-mecânicas, em particular na resistência interna.

Verificou-se que a incorporação de captadores tem muito menos influência na energia específica de corte durante a operação de corte do que as condições de maquinação, em particular no avanço efetivo por dente. Por outro lado, as diferentes estratégias usadas para fazer diminuir o teor de formaldeído tem grande influência, não só na energia específica de corte, mas especialmente na qualidade da aresta maquinada.

Todos os captadores testados provocaram uma redução significativa na qualidade *relativa* da aresta. O captador com melhor desempenho parece ser a ureia sólida, uma vez que apresenta um decréscimo na energia específica de corte, embora com uma pequena redução na qualidade da aresta. O captador com pior desempenho foi o amido.

A granulometria das partículas de ureia exerce uma forte influência na qualidade da aresta, embora não afete a energia específica de corte. A ureia fina apresenta melhor desempenho comparativamente à ureia grossa, relativamente ao perfil de qualidade da aresta maquinada.

6.4 Referências bibliográficas

Athanassiadou E., Tsiantzi S., Markessini C., (2007): “Towards composites with formaldehyde emission at natural wood levels”. Proc. COST Action E49 Conference Measurement and Control of VOC Emissions from Wood-Based Panels, Braunschweig, Germany, 28-29 November 2007

Carvalho, L., Magalhães, F., & João, F., (2012): “Formaldehyde Emissions from Wood-Based Panels - Testing Methods and Industrial Perspectives”. In Formaldehyde: Chemistry, Applications and Role in Polymerization: Nova Science Publishers, Inc., Hauppauge, NY

Costa, N., Pereira, J., Ferra, J., Cruz, P., Martins, J., Magalhães, F., Mendes, A., Carvalho, L., (2013a): “Sodium Metabisulphite as a Scavenger of Air Pollutants for Wood-Based Building Materials”. International Wood Products Journal, 4 (4), 242-247

Costa, N., Pereira, J., Ferra, J., Cruz, P., Martins, J., Magalhães, F., Mendes, A., Carvalho, L., (2013b): “Scavengers for achieving zero formaldehyde emission of wood-based panels”. Wood Sci Technol., 47 (6), 1261-1272.

Costa N., Ohlmeyer, M., Ferra, J., Magalhães, F.D., Mendes, A. and Carvalho, L., (2014): “The influence of scavengers on VOC emissions in particleboards made from pine and poplar”. Eur. J. Wood Prod., 72,117–121.

Dunky M., Grunwald D., Haelvoet W., (2001): “Emissions. In: COST Action E13 (Wood Adhesion and Glued Products) WG2 State of the art Report”. eds. Carl-Johan Johansson, Tony Pizzi, Marc Van Leemput, pp. 145-160

Eom Y-G., Kim J-S., Kim S., Kim J-A., Kim H-J., (2006): “Reduction of formaldehyde emission from particleboards by bio-scavengers”. Mokchae Konghak 34(5): 29-41

EN 16516:2017: “Construction products: Assessment of release of dangerous substances - Determination of emissions into indoor air”. DIN - Deutsche Institut für Normung e.V.

EN 717-1:2004: “Wood-based panels - Determination of formaldehyde release - Part 1: Formaldehyde emission by the chamber method (pp. 1–31)”. CEN - European Committee for Standardization.

Garrido, N., Pereira, J., Martins, J., Carvalho, L.H., Mendes, J.G., Costa, C., (2009): “Effect of formaldehyde scavengers on the machining of particleboard”, Proceedings of the International Panel Products Symposium 2009, edited by M. Spear, pp.179-189, Nantes, France, 16-18 September, 2009. (ISBN 978-1-84220-118-3) (oral presentation)

Hemmilä, V., Meyer, B., Larsen, A., Schwab, H., & Adamopoulos, S., (2019): “Influencing factors, repeatability and correlation of chamber methods in measuring formaldehyde emissions from fiber and particleboards”. International Journal of Adhesion and Adhesives, 95(May), 102420. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.102420>

Martins, Daniela Araújo Leal (2020): “A importância das emissões de formaldeído e compostos orgânicos voláteis de placas de derivados de madeira na qualidade do ar interior.” Dissertação de Mestrado em Engenharia de Segurança e Higiene Ocupacionais. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Park B-D., Kang Ec., Park J-Y., (2008): “Thermal Curing Behaviour of Modified UreaFormaldehyde Resin Adhesives with Two Formaldehyde Scavengers and Their Influence on Adhesion Performance”. J. Appl. Polym. Sci. 110: 1573-1580

Kim S., (2009): “The reduction of indoor air pollutant from wood-based composite by adding pozzolan for building material”. Construction and Building Materials, 23: 2319-2323

Myers G., (1986): “Effects of post-manufacture board treatments on formaldehyde emission: a literature review”. (1960-1984): For. Prod. J. 36(6)

NP EN ISO 12460-5: 2017: “Placas de derivados de madeira; Determinação do teor de formaldeído; Parte 5: Método de extração (dito método do perforador)”. Instituto Português da Qualidade, Comissão Técnica CT-14.

Sheikh-Ahmad Jy., Bailey Ja., (1999): “High-Temperature Wear Of Cemented Tungsten Carbide Tools While Machining Particleboard And Fibreboard”. J. Wood Sci. 45: 445-455

Sundin B., Mansson B., Endrody E., (1997): “Particleboard with different contents of releasable formaldehyde. A comparison on the board properties, including results from different formaldehyde tests”. In: Proceedings of the 21st particleboard symposium. Pullman: Washington State University, pp.139–186.

CAPÍTULO VII

INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE ESPÉCIES ALTERNATIVAS¹

Influência na maquinação e na qualidade da aresta

¹ O trabalho descrito neste capítulo esteve na origem dos artigos: Garrido *et al.*, 2010 e Garrido *et al.*, 2011.

Introdução

Por toda a Europa, face à escassez de matéria-prima, as indústrias de derivados de madeira têm vindo a implementar estratégias de utilização sustentável dos recursos florestais através da incorporação no processo de fabrico de espécies alternativas, resíduos de madeira e madeiras recicladas. Todavia, e tal como vimos nos capítulos anteriores, esta situação afeta não só as propriedades físico-mecânicas dos painéis mas também a sua maquinaria.

Importa aqui salientar, que são escassos os estudos que investigaram a influência de diferentes espécies na maquinaria dos Aglomerados de Partículas (Garrido *et al.*, 2010, 2011). Já em relação à madeira maciça, existem alguns trabalhos onde analisaram o efeito de diferentes espécies na furação, serragem, molduramento e aplainamento. Estes relacionaram particularmente a influência das espécies com a qualidade da superfície maquinada nas mencionadas geometrias de corte (Aguilera e Zamora, 2009; Farrokhpayam, 2010; Thoma *et al.*, 2017; Laina *et al.*, 2017; Pinkowski *et al.*, 2018; Kotlarewski *et al.*, 2019).

Constata-se frequentemente, que alguns fabricantes de mobiliário que utilizam como principal matéria-prima os derivados de madeiras, confrontam-se com custos indesejáveis devido a constantes reclamações de clientes por via da fraca qualidade das arestas das peças fabricadas. Por outro lado, estes custos são igualmente significativos quando se pretendem prevenir as imperfeições na aresta. Esta situação implica um investimento em máquinas industriais mais dispendiosas e em ferramentas e materiais especiais. Refira-se novamente, que o afiamento frequente das ferramentas provoca a diminuição da postura de corte e consequentemente a perda de capacidade de produção. Por outro lado, o uso industrial das ferramentas por períodos mais prolongados, associado a uma marcha mais veloz do processo de maquinaria, conduz a uma maior probabilidade de aparecimento de irregularidades na aresta de corte. Em resultado destes desequilíbrios, é obtido como seria de esperar, uma visivelmente baixa qualidade da aresta maquinada. Verifica-se que em termos práticos existe alguma incompatibilidade entre a exigência na qualidade de corte e a produtividade. Para se conseguir um elevado perfil de qualidade da aresta, esta deve apresentar-se isenta de qualquer irregularidade ou imperfeição após a maquinaria por fresagem ou serragem, requisito que pode implicar perdas de produtividade (Hoffmeister, 2005).

O objetivo do trabalho deste capítulo centrou-se no estudo da influência da utilização de madeira reciclada e de duas espécies alternativas, *Eucalyptus globulus* e *Populus alba*, na maquinaria e na qualidade da aresta de Aglomerados de Partículas. Os estudos de

maquinação efetuados consistiram na realização de vários ensaios comparativos entre Aglomerados de Partículas de fabrico laboratorial com diferentes *mix* de madeira, diferentes resinas e distintas condições de prensagem. Com o objetivo de se medir e manipular as diferentes condições de operação, foi usada a máquina de corte descrita nos ensaios dos capítulos anteriores. Estes ensaios permitiram comparar os efeitos destas condições de maquinação na qualidade da aresta dos Aglomerados de Partículas. Para a caracterização da aresta foi usado o sistema de visão artificial (Garrido *et al.*, 2006, 2007a,b, 2009, 2010, 2011).

A título das anteriores experiências, a análise numérica foi efetuada usando uma aplicação desenvolvida em Matlab[®], a partir da qual foi reusado o critério de qualidade “total waviness”. Refira-se uma vez mais, que este critério é o indicador de qualidade correspondente a cada aresta e define a possibilidade ou inviabilidade de utilização dos aglomerados para fins industriais. Foi também aqui efetuada uma análise ANOVA, com o objetivo de se avaliar o nível de significância dos efeitos dos diferentes fatores na qualidade da aresta maquinada.

7.1. Produção dos Aglomerados de Partículas

7.1.1. Composição do mix de madeira

Os Aglomerados de Partículas (3 camadas) foram fabricados a partir de diferentes *mix* de madeira com eucalipto, *Eucalyptus globulus* (principalmente casca) e madeira de choupo, *Populus alba*. Para as camadas externas (CE) foi usado um *mix standard* fornecido pela unidade industrial de Oliveira do Hospital da Sonae Indústria. Para a camada interna (CI) dois tipos de *mix* foram preparados: Mix1: *E. globulus* (0, 10, 20, 30 %) + *mix standard* (25% *Pinus pinaster* + 15% *E. globulus* + 30% serrim + 30% madeira reciclada); Mix2: *P. alba* (0, 10, 20, 30 %) + madeira reciclada (45%) + *Pinus pinaster*.

7.1.2. Encolagem

Para o fabrico do Aglomerado de Partículas (classe E1) foi usada uma resina ureia-formaldeído fornecida pela Euroresinas, e foram testados dois níveis de incorporação (fator Fx) de resina: 6.9% para a CE e 7.5% para a CI (calculados em massa sólidos de resina por massa de madeira anidra). A quantidade de parafina adicionada foi de 0.15 % calculado em massa sólidos de parafina por massa de madeira anidra. As partículas de madeira foram

misturadas com a resina e parafina numa encoladora laboratorial. Para cada camada foi realizada uma encolagem separada.

7.1.3 Processo de prensagem

Os Aglomerados de Partículas foram formados manualmente em formas de alumínio com as dimensões 220x220x80 mm. No processo de prensagem foi utilizada a prensa laboratorial controlada por computador e equipada com termopares, sensor de posição, célula de carga (força) e transdutor de pressão, previamente ilustrada na Figura 5.2 do Capítulo V. Refira-se novamente, que o ciclo de prensagem (duração das etapas, velocidade de fecho da prensa em cada etapa, temperatura dos pratos) foi programado de forma a simular a prensagem contínua do Aglomerado de Partículas (ver Anexo III, Tabela A3.3 – Resumo das condições operatórias de prensagem). A espessura pretendida era de 16 mm e a média da massa volúmica foi de (600 ± 20) kg/m³ para os provetes de eucalipto e de (570 ± 20) kg/m³ para os provetes de choupo. Após a prensagem, os provetes foram acondicionados durante 3 dias em condições de temperatura e humidade controladas (20 °C, 65%).

Nas Tabelas 7.1 e 7.2, apresentam-se respetivamente, as matrizes das experiências realizadas com a casca de eucalipto e incorporação de choupo.

Tabela 7.1 – Matriz das experiências com casca de eucalipto

Experiência	Tempo de Prensagem (s)	Velocidade de Prensagem (m/s)	Temperatura dos pratos (°C)	Fator Fx	Mix da CI (% casca de eucalipto)
1	90	0.356	220	6.9	0
2	90	0.356	220	6.9	30
3	90	0.356	220	7.5	10
4	90	0.356	220	7.5	20
5	90	0.356	220	6.9	10
6	120	0.356	220	6.9	20
7	120	0.356	220	7.5	0
8	120	0.356	220	7.5	30

Tabela 7.2 – Matriz das experiências com incorporação e choupo

Experiência	Tempo de Prensagem (s)	Velocidade de Prensagem (m/s)	Temperatura dos pratos (°C)	Fator Fx	Mix da CI (% de choupo)
1	150	0.356	220	6.9	0
2	150	0.356	220	6.9	10
3	150	0.356	220	7.5	20
4	150	0.356	220	7.5	30

Após o acondicionamento, os provetes foram testados segundo as normas europeias para determinação de diversas propriedades físico-mecânicas. Para este trabalho usamos os dados da resistência interna (RI determinada de acordo com a norma NP EN 319) para relacionar com os parâmetros da maquinação.

Na Tabela 7.3 apresentam-se os valores médios calculados para a RI, para os diferentes *mix* de casca de eucalipto e da madeira de choupo.

Tabela 7.3 – Valores médios da Resistência Interna para o *mix* casca de eucalipto e madeira de choupo

Propriedade	<i>mix</i> de casca de Eucalipto			
	Eucalipto 0%	Eucalipto 10%	Eucalipto 20%	Eucalipto 30%
RI (MPa)	0,42	0,34	0,35	0,32
Propriedade	<i>mix</i> de madeira de Choupo			
	Choupo 0%	Choupo 10%	Choupo 20%	Choupo 30%
RI (MPa)	0,40	0,45	0,50	0,46

7.1.4 Condições de maquinação e avaliação da qualidade da aresta

A operação de corte foi realizada na serra multifunções R5M da Mida. Os níveis de maquinação seleccionados para os ensaios consistiram em duas velocidades de avanço: 9 m/min e 17 m/min, e duas frequências: 30 Hz e 50 Hz. A instrumentação da máquina, o sistema para a avaliação da qualidade da aresta, e o sistema para a aquisição e controlo dos sinais, foi já descrito nos capítulos anteriores.

7.2 Resultados e discussão

Foi realizada uma análise da variância (ANOVA) com o propósito de avaliar o nível de significância dos efeitos dos diferentes fatores (*mix* de madeira e condições operatórias), nas condições de maquinação (energia específica de corte e qualidade da aresta).

Nas Tabelas seguintes (7.4, 7.5 e 7.6) apresentam-se os resultados ANOVA para o *mix* de *Eucalyptus globulus*.

Na Figura 7.1 ilustram-se os efeitos dos diferentes fatores (tempo de prensagem, fator F_x , *mix* de madeira e avanço por dente) na resistência interna, energia específica de corte e qualidade da aresta maquinada.

Tabela 7.4 – Nível de significância ANOVA dos diferentes fatores na resistência interna
 (NS - não significativo, *5%, **1%, ***0.1%)

Fatores	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Razão F	Valor de Prova	Nível de significância
Tempo de prensagem (s)	1	0.1166582	154.5532	<0.0001	***
Fator Fx	1	0.0601262	79.6574	<0.0001	***
<i>mix</i> de Eucalipto (%)	3	0.1390204	61.3932	<0.0001	***
Avanço por dente, <i>fz</i> (mm)	1	0.0006360	0.8426	0.3606	NS
MV (kg/m ³)	1	1.1872207	1572.875	<0.0001	***

Tabela 7.5 – Nível de significância ANOVA dos diferentes fatores na qualidade da aresta
 (NS - não significativo, *5%, **1%, ***0.1%)

Fatores	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Razão F	Valor de Prova	Nível de significância
Tempo de prensagem (s)	1	0.0079239	0.3022	0.5836	NS
Fator Fx	1	0.1327058	5.0610	.02640	*
<i>mix</i> de Eucalipto (%)	3	0.2679818	3.4067	0.0201	*
Avanço por dente, <i>fz</i> (mm)	1	0.0007739	0.0295	0.8639	NS
MV (kg/m ³)	1	5.1497718	196.3980	<0.0001	***

Tabela 7.6 – Nível de significância ANOVA dos diferentes fatores na energia específica de corte
 (NS - não significativo, *5%, **1%, ***0.1%)

Fatores	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Razão F	Valor de Prova	Nível de significância
Tempo de prensagem (s)	1	0.0582182	1.1044	0.2955	NS
Fator Fx	1	0.1409440	2.6737	0.1048	NS
<i>mix</i> de Eucalipto (%)	3	0.1478567	0.9349	0.4263	NS
Avanço por dente, <i>fz</i> (mm)	1	0.0989907	1.8779	0.1733	NS
MV (kg/m ³)	1	4.6403731	88.0281	<0.0001	***

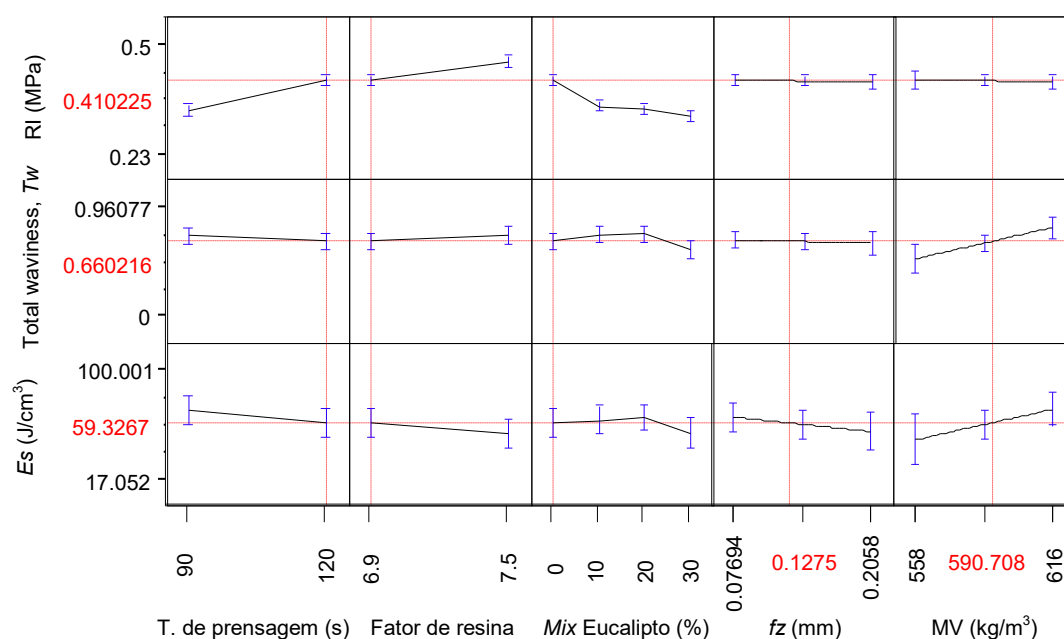


Figura 7.1- Efeito dos níveis dos fatores na Resistência Interna (RI), no *total waviness* (Tw) e na energia específica de corte (Es), para o *mix* de *Eucalyptus globulus*

Tal como era esperado, para a resistência interna (RI), o tempo de prensagem, o fator Fx, o *mix* e a massa volúmica são muito significativos. Para a qualidade da aresta, o fator Fx, o *mix* e a massa volúmica são significativos, e para a energia específica de corte apenas a massa volúmica é significativa. Como previsto a resistência interna aumenta com o tempo de prensagem e com o fator Fx de resina. O aumento da incorporação de eucalipto conduz a uma diminuição da resistência interna. Verifica-se que a qualidade da aresta diminui ligeiramente até aos 20% de incorporação de eucalipto, mas aumenta para os 30%. A energia específica de corte segue a mesma tendência, o que poderá ser explicado pela diferença de geometria das partículas que numa primeira fase introduz perturbações na estrutura, mas numa segunda fase conduz a uma estrutura mais resistente. Como esperado, observa-se o aumento da energia específica de corte com a MV.

As Tabelas 7.7 e 7.8 mostram os resultados ANOVA para o *mix* da madeira de choupo. Por análise destas tabelas, verifica-se que o avanço por dente é muito significativo, e que o *mix* não é significativo quer para a qualidade da aresta, quer para a energia específica de corte.

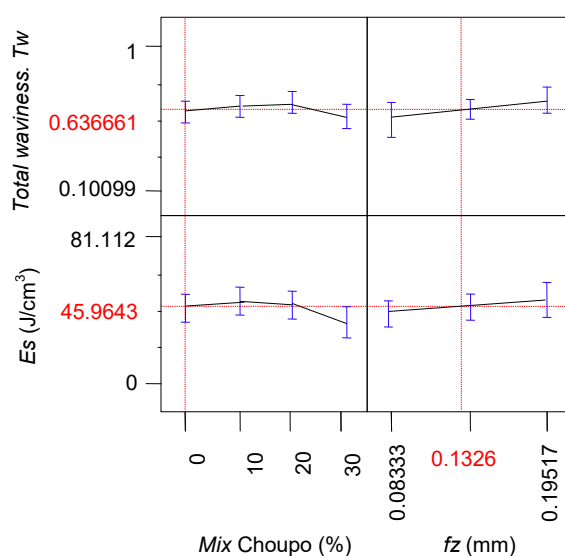
Tabela 7.7 – Nível de significância ANOVA dos diferentes fatores na qualidade da aresta
 (NS - não significativo, *5%, **1%, ***0.1%)

Fatores	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Razão F	Valor de Prova	Nível de significância
<i>mix</i> de choupo (%)	3	0.122487	0.7730	0.5120	NS
Avanço por dente, <i>fz</i> (mm)	1	37.621223	712.2451	<0.0001	***

Tabela 7.8 – Nível de significância ANOVA dos diferentes fatores na energia específica de corte
 (NS - não significativo, *5%, **1%, ***0.1%)

Fatores	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Razão F	Valor de Prova	Nível de significância
<i>mix</i> de choupo (%)	3	0.197764	1.5556	0.2055	NS
Avanço por dente, <i>fz</i> (mm)	1	18.309712	432.0617	<0.0001	***

Na Figura 7.2, pode-se observar o efeito do *mix* de choupo na energia específica de corte e no critério de qualidade *Total Waviness*. Observa-se uma diminuição da qualidade da aresta e um aumento da energia específica de corte com a velocidade de avanço por dente. Embora o fator *mix* não seja significativo como no caso do eucalipto, observa-se a mesma tendência da variação da qualidade da aresta e da energia específica de corte com a incorporação de choupo.


Figura 7.2 - Efeito do nível dos fatores na qualidade da aresta e na energia específica de corte para o *mix* de madeira de *Populus alba*

7.3 Conclusão

O uso de diferentes *mix* de madeira tem uma influência importante, quer na qualidade da aresta maquinada dos Aglomerados de Partículas, quer na energia específica de corte (e consequentemente no desgaste da ferramenta). A introdução destas espécies de madeira (*Populus alba* e *Eucalyptus globulus*), que têm baixa massa volúmica e menor rigidez que o pinho, melhora a maquinação dos Aglomerados de Partículas, no entanto, reduz a sua resistência interna.

7.4 Referências bibliográficas

Aguilera, A.; Zamora, R., (2009): “Surface roughness in sapwood and heartwood of Blackwood (*Acacia melanoxylon* R. Br.) machined in 90-0 direction”. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 2009, 67, 297–301.

Farrokhpayam SR., Ratnasingam J., Bakar ES., Tang SH., (2010): “Characterizing surface defects of solid wood of dark red meranti (*Shorea* sp.), melunak (*Pentace* sp.) and rubberwood (*Hevea brasiliensis*) in planing process”. *J Appl Sci* 10: 915–918.

Garrido N., Martins J., Carvalho L., Mendes J., Costa C., (2006): “A novel method for evaluating the influence of wood machining conditions on the quality particleboard edges”. *Proceedings of the International Conference on integrated approach to wood structure, behaviour and applications*” COST E35, Florence, Italy.

Garrido N., Martins J., Carvalho L., Mendes J., Costa C., (2007a): “Influence of sawing conditions on the quality of particleboard edges”. *Proceedings of the 18th International Wood Machining Seminar*, Vancouver, Canada.

Garrido N., Martins J., Carvalho L., Mendes J., Costa C., (2007b): “Influence of the sawing conditions on particleboard edge quality”. *Proceedings of the Third International Symposium on Wood Machining*, Lausanne, Switzerland.

Garrido N., Pereira J., Martins J., Carvalho L., Mendes J., Costa C., (2009): “Effect of formaldehyde scavengers on the machining of particleboard”, *International Panel Products Symposium 2009*, Nantes, France, 16-18 de Setembro.

Garrido N., Martins J., Pereira J., Carvalho L., Mendes J., Costa, C., (2010): “Effect of recycled wood and alternative species on particleboard machining”, *Proceedings of the 1st International Conference on Processing Technologies for the Forest and Bio-based Products Industries*. Salzburg/Kuchl, Austria, 07-08 Outubro.

Garrido N., Martins J., Carvalho L.H., Mendes J.G., Costa C., (2011): “Influência da incorporação de resíduos e espécies alternativas na qualidade de maquinação dos Aglomerados de Partículas”, CIMAD 11 – 1º Congresso Ibero-Latino Americano da Madeira na Construção, Livro de Resumos, edited by J. H. Negrão and A. G. Dias, pp. 95-96, 7-9 June, Coimbra, Portugal (ISBN 978-989-96461-2-4).

Hoffmeister H., Grübler T., Looß T., (2005): "Image Processing as a Tool for Process-Integrated Quality Assessment", Proceedings of the 17th International Wood Machining Seminar, Rosenheim, Germany.

Kotlarewski N., Derikvand M., Lee M., Whiteroad I., (2019): “Machinability Study of Australia’s Dominate Plantation Timber Resources”. in: *Forests* (2019), 10:9, Article 805.

Laina, R.; Sanz-Lobera, A.; Villasante, A., ; López-Espí, P.; Martínez-Rojas, J.A.; Alpuente, J.; Sánchez-Montero, R.; Vignote, S. (2017): “Effect of the anatomical structure, wood properties and machining conditions on surface roughness of wood”. *Maderas. Cienc. Y Technol.* 2017, 19, 203–212.

NP EN 319: 2002, “Aglomerado de Partículas e aglomerado de fibras – Determinação da resistência à tracção perpendicular às faces da placa”. Instituto Português da Qualidade, Comissão Técnica CT-14.

Pinkowski, G., Szymański, W., Krauss, A., and Stefanowski, S. (2018). “Effect of sharpness angle and feeding speed on the surface roughness during milling of various wood species,” *BioResources* 13(3), 6952-6962. DOI: 10.15376/biores.13.3.6952- 6962.

Thoma, H.; Peri, L.; Lato, E., (2015): “Evaluation of wood surface roughness depending on species characteristics”. *Maderas. Cienc. y Technol.* 2015, 17, 285–292.

CAPÍTULO VIII

MODELO DE PREVISÃO DA QUALIDADE DA ARESTA DE CORTE

Aglomerados de Partículas ST, MR, HG

Introdução

A modelação e otimização das variáveis que influenciam a qualidade da aresta de corte dos Aglomerados de Partículas mostram-se cada vez mais imprescindíveis. Estas podem contribuir diretamente para o aumento da qualidade do perfil da aresta maquinada, e assim como para a minimização dos custos da produção. Inclusivamente, estudar em detalhe a identificação e otimização destas variáveis pode facilitar a análise da produtividade, e desta forma auxiliar no planeamento do processo produtivo.

Neste contexto, ferramentas de modelação estatísticas e matemáticas, como a Metodologia de Superfície de Resposta (RSM), apresentam-se como técnicas apropriadas para as situações onde é necessário conhecer a influência das variáveis (qualitativas e quantitativas) no desempenho da qualidade de um produto ou características de um processo, ou seja, na resposta aos fatores envolvidos no modelo.

Neste capítulo, recorreremos inicialmente ao modelo de *design* experimental de Box-Behnken para o planeamento de experiências, dada vantagem na redução do número de ensaios para estudar o número programado de fatores. Posteriormente, e no sentido de se utilizar a metodologia de superfície de resposta como uma forma de otimização, gerou-se o modelo matemático-estatístico a partir dos dados experimentais, obtidos através do ajuste de funções polinomiais. Procedeu-se então ao diagnóstico do modelo para avaliar a estimativa do erro e verificar as interações, bem como à verificação da necessidade de realizar um deslocamento em direção à região ótima. Por fim, obtiveram-se os valores ótimos para cada variável resposta.

Para a verificação da adequação do modelo e da confiabilidade dos resultados, recorreu-se à análise de variância (ANOVA). Por esta via foi-nos possível comparar a variação devida aos fatores com as interferências causadas pelos erros aleatórios característicos das respostas geradas. Deste modo, a RSM foi utilizada para otimizar as variáveis de resposta *total waviness* (T_w), energia específica de corte (E_s) e avanço efetivo por dente (ffz), quando influenciadas pelos fatores velocidade de avanço (A) e frequência (f), aqui considerados para a maquinação de aglomerados ST, MR e HG.

8.1 Procedimento experimental

8.1.1 Provetes e níveis de maquinação

Para este trabalho de modelação usámos provetes que foram extraídos de 3 diferentes tipos de aglomerados comerciais: standard (*ST*), resistente à humidade (*MR*) e homogéneo (*HG*). Todos os aglomerados continham um teor de reciclados na composição da sua camada interna (*CI*) de pelo menos 30%.

Da composição destes painéis, fazem parte 4 tipos de matérias-primas principais: madeira de pinho, serradura de pinho, partículas de casca de eucalipto e madeira reciclada (fundamentalmente resíduos originados pela indústria de mobiliário). A madeira reciclada é a que representa maior peso nos *mix* dos 3 tipos de aglomerados, ou seja, se olharmos à percentagem da massa por cada tipo de reciclado que entra na composição, esta é sempre maior.

Os níveis de maquinação definidos foram três para a velocidade teórica de avanço (*A*) (9 m/min, 13 m/min e 17 m/min), e três frequências (30 Hz, 40 Hz e 50 Hz). Na Tabela 8.1 apresentam-se os níveis de maquinação usados no modelo de previsão.

Tabela 8.1 – Fatores e níveis estudados

Fatores	Níveis		
	Baixo (1)	Médio (2)	Alto (3)
Velocidade de avanço (m/min)	9	13	17
Frequência (Hz)	30 Hz	40 Hz	50 Hz

8.1.2 *Design* das experiências

No início dos trabalhos de investigação experimental, seleccionamos o modelo de *design* de Box-Behnken, com vista ao estabelecimento do número apropriado de experiências. (Ferreira *et al.*, 2007; Montgomery, 2008). Este modelo de *metodologia de superfície de resposta* pode ser graficamente representado de duas formas: a primeira consiste num cubo que contém um ponto central e pontos localizados no meio de cada aresta, e a segunda é representada esquematicamente por três interceções 2^2 fatorial com um ponto central comum (Figura 8.1 a, b). No modelo de Box-Behnken aqui presente, foram planeados, como referimos, dois fatores: velocidade de avanço *A* (m/min) e frequência *f* (Hz), e para cada um destes foram usados os três níveis já apresentados na Tabela 8.1.

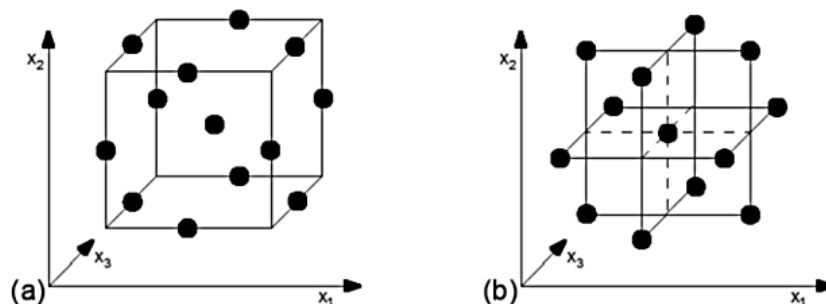


Figura 8.1 – Modelo de Box-Behnken para o planejamento de experiências (Box e Behnken, 1960)

A combinação produzida entre os fatores deu origem à realização de 17 experiências, tendo em conta os parâmetros de resposta: avanço efetivo por dente, ffz (mm), energia específica de corte, Es (J/cm^3) e o critério de qualidade *Total waviness* (Tw). Na Tabela 8.2, apresentam-se os valores dos parâmetros de resposta para os fatores examinados relativos aos três tipos de aglomerados testados.

Tabela 8.2 – Tabela de resposta aos fatores para os aglomerados (ST), (MR) e (HG)

Ordem	Fator 1	Fator 2	Resp. 1	Resp. 2	Resp. 3	Resp.1	Resp. 2	Resp. 3	Resp. 1	Resp. 2	Resp. 3
	A:	B:	(ST)	(ST)	(ST)	(MR)	(MR)	(MR)	(HG)	(HG)	(HG)
	V. Avanço	Frequência	ffz	Es	Tw	ffz	Es	Tw	ffz	Es	Tw
	m/min	Hz	mm	J/cm^3	--	mm	J/cm^3	--	mm	J/cm^3	--
1	13	40	0.123909	210	0.72170	0.137685	185	0.40951	0.109755	215	0.19051
2	13	40	0.121748	205	0.56170	0.118692	215	0.28141	0.121855	195	0.25741
3	13	40	0.115198	210	0.48940	0.129929	210	0.32128	0.137911	205	0.28111
4	17	50	0.108291	205	0.40560	0.144544	220	0.37452	0.107262	205	0.23943
5	13	50	0.092192	265	0.48630	0.092363	250	0.4618	0.080015	260	0.22008
6	17	30	0.183858	165	0.57320	0.207887	175	0.38712	0.213637	135	0.34712
7	13	40	0.113466	230	0.53670	0.113999	230	0.24513	0.135981	205	0.21431
8	13	30	0.158367	200	0.52680	0.167721	190	0.44819	0.168336	175	0.24091
9	13	30	0.142091	195	0.42110	0.154381	205	0.32071	0.136006	195	0.21897
10	9	30	0.054400	365	0.31020	0.065233	355	0.21986	0.073525	265	0.26076
11	9	40	0.053576	400	0.47340	0.054021	330	0.23534	0.057179	365	0.18043
12	9	40	0.058575	365	0.40140	0.059963	395	0.18296	0.050639	360	0.11796
13	13	50	0.077184	295	0.43430	0.099676	235	0.36118	0.087293	265	0.24009
14	9	50	0.049649	360	0.37980	0.050558	380	0.14597	0.050378	405	0.13795
15	17	40	0.153139	205	1.14710	0.158411	195	0.3628	0.136131	180	0.26822
16	17	40	0.146865	255	0.84760	0.155309	165	0.5011	0.144446	180	0.23801
17	13	40	0.110439	250	0.57630	0.114383	220	0.30785	0.128891	205	0.27877

Para averiguar a adequação e capacidade preditiva do modelo nos três parâmetros de resposta (Frequência, Energia e Critério de Qualidade) relativamente aos três tipos de aglomerados (ST, MR e HG), recorreremos à estimativa do coeficiente de determinação (R^2).

Todavia, não se pode afirmar que o modelo possui um bom ajuste apenas por essa verificação, uma vez que, com a adição de variáveis ao modelo o seu valor irá sempre variar, independentemente se essa variável é ou não significativa. Assim, procede-se desde logo à análise do R^2 ajustado, e caso este apresente grande diferença em relação ao R^2 , isto revelará uma forte probabilidade de *termos* não significativos terem sido adicionados ao modelo (Bas e Boyaci, 2007).

Nas Tabelas 8.3, 8.4 e 8.5, podem ser apreciados os resultados da análise do coeficiente de determinação (R^2), onde se assinala o modelo estatístico sugerido para as diferentes respostas. Os modelos apresentados sustentam-se na maximização do R^2 ajustado e do R^2 previsto.

Tabela 8.3 – Sumário do modelo estatístico para os parâmetros de resposta nos aglomerados (ST)

Resposta	Modelo	Des. Padrão	R^2	R^2 Ajustado	R^2 Previsto	SQRPM	
<i>ffz</i>	Linear	0.0149	0.8818	0.8649	0.7865	0.0056	
	SdQ	0.0120	0.9293	0.9130	0.8162	0.0048	
	Quadrático	0.0083	0.9716	0.9586	0.8938	0.0028	Sugerido
	Cúbico	0.0069	0.9838	0.9712	0.9096	0.0024	Descartado
<i>Es</i>	Linear	42.52	0.7014	0.6588	0.5683	36591.92	
	SdQ	43.68	0.7074	0.6399	0.5000	42381.53	
	Quadrático	28.33	0.8958	0.8485	0.6188	32309.03	Sugerido
	Cúbico	26.67	0.9245	0.8657	-1.0769	1.760E+05	Descartado
<i>Tw</i>	Linear	0.1689	0.3850	0.2971	-0.0167	0.6603	
	SdQ	0.1722	0.4066	0.2697	-0.4893	0.9672	
	Quadrático	0.1381	0.6769	0.5300	-0.2900	0.8378	Sugerido
	Cúbico	0.1169	0.8108	0.6636	-3.0041	2.60	Descartado

Tabela 8.4 – Sumário do modelo estatístico para os parâmetros de resposta nos aglomerados (MR)

Resposta	Modelo	Des. Padrão	R^2	R^2 Ajustado	R^2 Previsto	SQRPM	
<i>ffz</i>	Linear	0.0139	0.9149	0.9028	0.8623	0.0044	
	SdQ	0.0128	0.9335	0.9181	0.8752	0.0040	
	Quadrático	0.0100	0.9654	0.9496	0.8723	0.0041	Sugerido
	Cúbico	0.0081	0.9813	0.9667	0.9247	0.0024	Descartado
<i>Es</i>	Linear	38.23	0.7615	0.7274	0.6284	31879.90	
	SdQ	39.58	0.7626	0.7078	0.4227	49532.53	
	Quadrático	19.20	0.9527	0.9312	0.9038	8256.52	Sugerido
	Cúbico	20.89	0.9542	0.9186	0.8718	10998.79	Descartado
<i>Tw</i>	Linear	0.0719	0.5508	0.4866	0.3236	0.1088	Sugerido
	SdQ	0.0741	0.5566	0.4543	0.1523	0.1364	
	Quadrático	0.0726	0.6396	0.4757	0.0458	0.1535	
	Cúbico	0.0783	0.6568	0.3899	-5.8715	1.11	Descartado

Tabela 8.5 – Sumário do modelo estatístico para os parâmetros de resposta nos aglomerados (HG)

Resposta	Modelo	Des. Padrão	R ²	R ² Ajustado	R ² Previsto	SQRPM	
<i>ffz</i>	Linear	0.0189	0.8383	0.8152	0.7390	0.0081	
	SdQ	0.0159	0.8942	0.8698	0.8488	0.0047	
	Quadrático	0.0127	0.9428	0.9168	0.8463	0.0048	Sugerido
	Cúbico	0.0137	0.9454	0.9029	-0.2194	0.0378	Descartado
<i>Es</i>	Linear	31.22	0.8495	0.8280	0.7782	20113.87	
	SdQ	30.91	0.8630	0.8314	0.7618	21603.28	
	Quadrático	14.88	0.9731	0.9609	0.8902	9952.17	Sugerido
	Cúbico	14.55	0.9790	0.9626	-0.0351	93858.10	Descartado
<i>Tw</i>	Linear	0.0392	0.5489	0.4845	0.3268	0.0321	Sugerido
	SdQ	0.0406	0.5501	0.4463	0.0578	0.0450	
	Quadrático	0.0424	0.5851	0.3965	-0.4856	0.0709	
	Cúbico	0.0381	0.7257	0.5123	-4.2898	0.2524	Descartado

Conforme se pode apreciar nas Tabelas 8.3, 8.4 e 8.5, para o parâmetro de resposta 1- avanço efetivo por dente (*ffz*), é proposto o modelo quadrático para a interação com os dois factores de entrada (*A* e *f*), o que é comum aos três tipos de aglomerados. Para a resposta 2 - referente ao parâmetro (*Es*), é proposto também um modelo quadrático, que é também comum aos três tipos de aglomerados. No caso do parâmetro de resposta 3, que define a qualidade da aresta de corte (*Tw*), o modelo proposto para o aglomerado ST difere dos modelos propostos para os aglomerados MR e HG. Esta diferença de proposta de modelos, pode ser eventualmente explicada pela maior dispersão dos resultados para o caso do aglomerado ST.

8.2 Análise estatística ANOVA

8.2.1 Comparação da variação no tratamento dos fatores

A análise de variância (ANOVA) foi preconizada com o objetivo de investigar a variação devido ao tratamento dos fatores, em relação às variações causadas pelos erros aleatórios característicos das respostas geradas (Cox *et al.*, 2000; Montgomery, 2008, 2009). Esta análise possibilita avaliar a significância da regressão utilizada, partindo do princípio que os ensaios tenham sido realizados com repetições autênticas. Assim sendo, e pelo menos em torno do seu ponto central, é válida a análise com base no critério da *Falta de ajuste (Lack of fit)*, que evidencia se o modelo representa bem a resposta média em função dos níveis dos fatores (Dean e Voss, 1999; Bezerra *et al.*, 2008). Assim procedendo, os dados devem apresentar uma correlação significativa e ausência de *Lack of fit* para garantirem um bom ajuste (Sit, 2007; Freedman, *et al.*, 2007).

Nas Tabelas 8.6, 8.7 e 8.8, estão reunidos os resultados da análise estatística ANOVA, aplicada ao estudo dos efeitos dos fatores sobre os parâmetros de resposta que foram examinados nos três tipos de Aglomerados de Partículas.

Tabela 8.6 – Análise estatística ANOVA para os aglomerados (ST)

Resposta	Parâmetros	Soma dos quadrados	GL	Média dos quadrados	Razão F	Valor de Prova	Significância
<i>ffz</i> Modelo quadrático	Modelo	0.0256	5	0.0051	75.18	< 0.0001	significativo
	A-Vel. Avan.	0.0177	1	0.0177	259.23	< 0.0001	
	B-Frequência	0.0056	1	0.0056	81.96	< 0.0001	
	AB	0.0013	1	0.0013	18.40	0.0013	
	A ²	0.0011	1	0.0011	15.94	0.0021	
	B ²	0.0000	1	0.0000	0.1632	0.6940	
	Residual	0.0007	11	0.0001			
	Falta de ajuste	0.0003	3	0.0001	2.25	0.1593	n/ significativo
	Erro	0.0004	8	0.0001			
	Corr. Total	0.0264	16				
<i>Es</i> Modelo quadrático	Modelo	75927.92	5	15185.58	18.92	< 0.0001	significativo
	A-Vel. Avan.	54450.00	1	54450.00	67.85	< 0.0001	
	B-Frequência	5000.00	1	5000.00	6.23	0.0297	
	AB	506.25	1	506.25	0.6308	0.4439	
	A ²	15942.18	1	15942.18	19.86	0.0010	
	B ²	154.68	1	154.68	0.1927	0.6691	
	Residual	8827.96	11	802.54			
	Falta de ajuste	5082.96	3	1694.32	3.62	0.0647	n/ significativo
	Erro	3745.00	8	468.12			
	Corr. Total	84755.88	16				
<i>Tw</i> Modelo quadrático	Modelo	0.4396	5	0.0879	4.61	0.0164	significativo
	A-Vel. Avan.	0.2481	1	0.2481	13.00	0.0041	
	B-Frequência	0.0020	1	0.0020	0.1029	0.7544	
	AB	0.0141	1	0.0141	0.7372	0.4089	
	A ²	0.0106	1	0.0106	0.5565	0.4713	
	B ²	0.1691	1	0.1691	8.86	0.0126	
	Residual	0.2099	11	0.0191			
	Falta de ajuste	0.1250	3	0.0417	3.93	0.0540	n/ significativo
	Erro	0.0849	8	0.0106			
	Corr. Total	0.6495	16				

Olhando ao caso dos resultados relativos ao aglomerado ST expressos na Tabela 8.6, facilmente se constata que o modelo é significativo para os três parâmetros de resposta. Isto pode ser explicado através dos valores da *Razão F* para os parâmetros de resposta *ffz* (75.18), *Es* (18.92) e *Tw* (4.61), evidenciam aqui a significância do modelo. Estes resultados exibem apenas uma probabilidade de aumentar de 0.01% devido a ruído para os parâmetros de resposta *ffz* e *Es*, e 1.64% para o parâmetro *Tw*. Por outro lado (estabelece o método

estatístico), os valores *de Prova* quando inferiores a 0.0500 indicam que os termos do modelo são significativos, em sentido oposto valores superiores a 0.1000 indicam que os termos do modelo são não-significativos. Verificamos que para o parâmetro de resposta *ffz* os termos do modelo A, B, AB e A^2 são significativos, bem como A, B, A^2 para o parâmetro de resposta *Es*. Significativos são também os termos do modelo A, B^2 , para o parâmetro de resposta *Tw*. Em relação ao critério da *Falta de ajuste*, verifica-se que para os parâmetros de resposta estudados este é *não-significativo*, o que revela que o modelo proposto para cada um destes parâmetros, representa de forma correta a resposta média em função dos níveis dos fatores.

Tabela 8.7 – Análise estatística ANOVA para os aglomerados (MR)

Resposta	Parâmetros	Soma dos quadrados	GL	Média dos quadrados	Razão F	Valor de Prova	Significância
<i>ffz</i> Modelo quadrático	Modelo	0.0308	5	0.0062	61.31	< 0.0001	significativo
	A-Vel. Avan.	0.0238	1	0.0238	236.72	< 0.0001	
	B-Frequência	0.0054	1	0.0054	53.82	< 0.0001	
	AB	0.0006	1	0.0006	5.89	0.0336	
	A^2	0.0008	1	0.0008	8.07	0.0160	
	B^2	0.0003	1	0.0003	2.52	0.1408	
	Residual	0.0011	11	0.0001			
	Falta de ajuste	0.0005	3	0.0002	2.46	0.1376	n/ significativo
	Erro	0.0006	8	0.0001			
Corr. Total	0.0319	16					
<i>Es</i> Modelo quadrático	Modelo	81737.37	5	16347.47	44.33	< 0.0001	significativo
	A-Vel. Avan.	62128.12	1	62128.12	168.46	< 0.0001	
	B-Frequência	3200.00	1	3200.00	8.68	0.0133	
	AB	100.00	1	100.00	0.2712	0.6129	
	A^2	15602.63	1	15602.63	42.31	< 0.0001	
	B^2	384.23	1	384.23	1.04	0.3293	
	Residual	4056.74	11	368.79			
	Falta de ajuste	139.24	3	46.41	0.0948	0.9608	n/ significativo
	Erro	3917.50	8	489.69			
Corr. Total	85794.12	16					
<i>Tw</i> Modelo linear	Modelo	0.0886	2	0.0443	8.58	0.0037	significativo
	A-Vel. Avan.	0.0885	1	0.0885	17.14	0.0010	
	B-Frequência	0.0001	1	0.0001	0.0254	0.8756	
	Residual	0.0723	14	0.0052			
	Falta de ajuste	0.0332	6	0.0055	1.13	0.4242	n/ significativo
	Erro	0.0391	8	0.0049			
Corr. Total	0.1609	16					

À semelhança do que foi feito para os aglomerados ST, examinou-se em que medida a significância dos efeitos dos fatores nos parâmetros de resposta para o aglomerado MR, podia explicar a adequação dos modelos propostos. Na Tabela 8.7 estão registados, para todos os

parâmetros de resposta, os resultados da análise estatística ANOVA para o referido aglomerado MR. Verifica-se que para o modelo o valor da *Razão F* é significativo para os parâmetros de resposta *ffz*, *Es* e *Tw*. Em relação aos *valores Prova*, os termos do modelo A, B, AB e A² são significativos para o caso do parâmetro de resposta *ffz*, e para o parâmetro de resposta *Es* os termos A, B e A², uma vez que todos eles exibem um *Valor de Prova* < 0.0500. Já em relação ao parâmetro de resposta *Tw*, o *Valor de Prova* revela que apenas o parâmetro A (velocidade de avanço) é significativo. Em relação ao critério da *Falta de ajuste*, verifica-se que para todos os parâmetros de resposta estudados este não é significativo, o que aliás já se havia verificado para os aglomerados ST.

Tabela 8.8 – Análise estatística ANOVA para os aglomerados (HG)

Resposta	Parâmetros	Soma dos quadrados	GL	Média dos quadrados	Razão F	Valor de Prova	Significância
<i>ffz</i> Modelo quadrático	Modelo	0.0292	5	0.0058	36.25	< 0.0001	significativo
	A-Vel. Avan.	0.0171	1	0.0171	106.04	< 0.0001	
	B-Frequência	0.0089	1	0.0089	55.11	< 0.0001	
	AB	0.0017	1	0.0017	10.75	0.0074	
	A ²	0.0015	1	0.0015	9.31	0.0110	
	B ²	0.0000	1	0.0000	0.1007	0.7569	
	Residual	0.0018	11	0.0002			
	Falta de ajuste	0.0006	3	0.0002	1.51	0.2848	n/ significativo
	Erro	0.0011	8	0.0001			
	Corr. Total	0.0310	16				
<i>Es</i> Modelo quadrático	Modelo	88239.96	5	17647.99	79.67	< 0.0001	significativo
	A-Vel. Avan.	60378.12	1	60378.12	272.59	< 0.0001	
	B-Frequência	16653.12	1	16653.12	75.18	< 0.0001	
	AB	1225.00	1	1225.00	5.53	0.0384	
	A ²	9926.33	1	9926.33	44.81	< 0.0001	
	B ²	4.11	1	4.11	0.0186	0.8941	
	Residual	2436.51	11	221.50			
	Falta de ajuste	2011.51	3	670.50	12.62	0.0021	significativo
	Erro	425.00	8	53.13			
	Corr. Total	90676.47	16				
<i>Tw</i> Modelo linear	Modelo	0.0262	2	0.0131	8.52	0.0038	significativo
	A-Vel. Avan.	0.0196	1	0.0196	12.73	0.0031	
	B-Frequência	0.0066	1	0.0066	4.31	0.0568	
	Residual	0.0215	14	0.0015			
	Falta de ajuste	0.0122	6	0.0020	1.73	0.2305	n/ significativo
	Erro	0.0094	8	0.0012			
	Corr. Total	0.0477	16				

Na Tabela 8.8, podem ser apreciados os resultados da análise estatística ANOVA, sobre a significância dos efeitos dos fatores nos parâmetros de resposta estudados para o

aglomerado HG. Por esta tabela se conclui que em todos os modelos o valor da *Razão F* é significativo. O mesmo se verifica em relação aos termos do modelo representado pelo valor *Valor de Prova*, que neste caso indica que os valores abaixo de 0,0500 são significativos, situação que se observou nos três parâmetros de resposta estudados. Para o critério de falta de juste verifica-se que para os parâmetros *ffz* e *Tw* este não é significativo. Em contraposição, o mesmo não acontece para o parâmetro de resposta *Es* em que a falta de ajuste é neste caso significativa, assim sendo, podemos confirmar que este efeito não é aqui revelador de uma boa contribuição para o modelo.

8.2.2 Modelo estatístico

Na Tabela 8.9 resumem-se os valores fornecidos pela regressão para os modelos eleitos, considerando os efeitos dos fatores (*velocidade de avanço e frequência*) nos parâmetros de resposta (*avanço efetivo por dente, energia específica de corte e critério de qualidade*), que foram examinados nas experiências com os 3 tipos de aglomerados. Constatamos que para os parâmetros de resposta *ffz* e *Es*, o coeficiente de determinação está próximo da unidade, o que garante nestes casos uma boa confiabilidade no modelo proposto. Já em relação ao parâmetro de resposta *Tw*, observamos que o coeficiente de determinação é muito baixo para todos os tipos de aglomerados. Todavia, e numa primeira análise, conclui-se que teoricamente a melhor qualidade da aresta é obtida no aglomerado HG, por via deste apresentar menos diferença entre o R^2 Ajustado e o R^2 Previsto. Em termos práticos, isto pode ser explicado pela sua composição mais uniforme e por este possuir camadas externas de maior densidade. Este fato para além de garantir melhor solidez no arranjo das partículas, e maior densidade nas camadas externas, pode eventualmente contribuir aqui para melhorar a qualidade de corte.

Tabela 8.9 – Resultados ANOVA para os aglomerados ST, MR e HG

Parâmetros estatísticos	Resp. 1	Resp. 2	Resp. 3	Resp.1	Resp. 2	Resp. 3	Resp. 1	Resp. 2	Resp. 3
	(ST)	(ST)	(ST)	(MR)	(MR)	(MR)	(HG)	(HG)	(HG)
	<i>ffz</i>	<i>Es</i>	<i>Tw</i>	<i>ffz</i>	<i>Es</i>	<i>Tw</i>	<i>ffz</i>	<i>Es</i>	<i>Tw</i>
R²	0.9716	0.8958	0.6769	0.9654	0.9527	0.5508	0.9428	0.9731	0.5489
R² Ajustado	0.9586	0.8485	0.5300	0.9496	0.9312	0.4866	0.9168	0.9609	0.4845
R² Previsto	0.8938	0.6188	-0.2900	0.8723	0.9038	0.3236	0.8463	0.8902	0.3268
Precisão Adeq.	29.9390	12.7748	7.2619	27.0446	18.9545	7.2370	21.0924	29.9714	9.4992
Desvio Padrão	0.0083	28.33	0.1381	0.0100	19.20	0.0719	0.0127	14.88	0.0392
Média	0.1096	257.65	0.5466	0.1191	244.41	0.3275	0.1141	236.18	0.2313
C.V. (%)	7.53	11.00	25.27	8.42	7.86	21.94	11.13	6.30	16.95

Ainda em relação à Tabela 8.9, saliente-se que o critério **Precisão Adequada**, que mede a razão sinal/ruído, é desejável que tenha um valor superior a 4 (Myers *et al.*, 2016; *Design-Expert 13*[®], 2021). Verifica-se que este mostra um sinal adequado em todos os tipos de aglomerados e para todos os parâmetros de resposta, o que significa que os modelos são confiáveis e podem ser usados para se navegar com confiança no espaço do *design*.

8.2.3 Equações finais em termos de fatores reais

As equações em termos de fatores reais podem ser usadas para fazer previsões sobre a resposta para determinados níveis de cada fator (*Design-Expert 13*[®], 2021). Aqui, os níveis foram especificados nas unidades originais de cada fator. Estas equações, não devem por isso ser usadas para determinar o impacto relativo de cada fator, porque os coeficientes foram preparados para acomodar apenas as unidades de cada fator e a interseção não está no centro do espaço do *design*.

8.2.3.1 Equações para previsão das respostas no Aglomerado ST

$$ffz = -0.354706 + 0.055522 \times \text{Vel. Avan.} + 0.004410 \times \text{Frequência} - 0.000443 \times \text{Vel. Avan.} \times \text{Frequência} - 0.001003 \times \text{Vel. Avan.}^2 - 0.000016 \times \text{Frequência}^2 \quad (8.1)$$

$$Es = +1098.14967 - 131.72697 \times \text{Vel. Avan.} + 3.68586 \times \text{Frequência} + 0.281250 \times \text{Vel. Avan.} \times \text{Frequência} + 3.84046 \times \text{Vel. Avan.}^2 - 0.060526 \times \text{Frequência}^2 \quad (8.2)$$

$$Tw = -3.33527 + 0.021830 \times \text{Vel. Avan.} + 0.177787 \times \text{Frequência} - 0.001482 \times \text{Vel. Avan.} \times \text{Frequência} + 0.003134 \times \text{Vel. Avan.}^2 - 0.002001 \times \text{Frequência}^2 \quad (8.3)$$

8.2.3.2 Equações para previsão das respostas no Aglomerado MR

$$ffz = -0.131966 + 0.048335 \times \text{Vel. Avan.} - 0.004842 \times \text{Frequência} - 0.000304 \times \text{Vel. Avan.} \times \text{Frequência} - 0.000867 \times \text{Vel. Avan.}^2 + 0.000077 \times \text{Frequência}^2 \quad (8.4)$$

$$Es = +1277.44243 - 125.81414 \times \text{Vel. Avan.} - 7.25658 \times \text{Frequência} + 0.125000 \times \text{Vel. Avan.} \times \text{Frequência} + 3.79934 \times \text{Vel. Avan.}^2 + 0.095395 \times \text{Frequência}^2 \quad (8.5)$$

$$Tw = +0.001837 + 0.026294 \times \text{Vel. Avan.} - 0.000405 \times \text{Frequência} \quad (8.6)$$

8.2.3.3 Equações para previsão das respostas no Aglomerado HG

$$ffz = -0.333164 + 0.062998 \times \text{Vel. Avan.} + 0.001862 \times \text{Frequência} - 0.000520 \times \text{Vel. Avan.} \times \text{Frequência} - 0.001178 \times \text{Vel. Avan.}^2 + 0.000020 \times \text{Frequência}^2 \quad (8.7)$$

$$Es = +613.17 - 83.0099 \times \text{Vel. Avan.} + 9.46053 \times \text{Frequência} - 0.4375 \times \text{Vel. Avan.} \times \text{Frequência} + 3.03043 \times \text{Vel. Avan.}^2 + 0.00986842 \times \text{Frequência}^2 \quad (8.8)$$

$$Tw = +0.185656 + 0.012365 \times \text{Vel. Avan.} - 0.002878 \times \text{Frequência} \quad (8.9)$$

8.3 Resultados

8.3.1 Qualidade de ajuste do modelo

Nas Figuras 8.2, 8.3 e 8.4 podem ser apreciados os valores resultantes das equações anteriores aplicadas aos resultados experimentais, bem como os valores residuais e respetiva normalização nas figuras seguintes. Podemos afirmar que a avaliação realizada sobre as equações de resposta resultou numa boa concordância com os dados experimentais, tal como se confirma nos gráficos que exibem poucas diferenças entre os dados experimentais e os modelos de previsão para cada resposta e tipo de aglomerado. Todavia, no caso do parâmetro de resposta Tw confirma-se novamente que existe algum desfasamento entre ambos os valores, o que efetivamente bem pode explicar a dificuldade em caracterizar a qualidade da aresta de corte nos Aglomerados de Partículas (Garrido, 2007; Davim, 2011).

8.3.2 Suposição de normalidade e variância constante

Analisando as Figuras 8.5, 8.6 e 8.7, confirma-se o que atrás já foi referido sobre a significância dos modelos. Verificamos que praticamente todos os pontos dos gráficos seguem uma linha reta, o que claramente mostra que os modelos podem ser aqui validados por via da análise da distribuição normal dos resíduos. Ainda assim, nota-se que há uma leve fuga de normalidade em alguns gráficos, que pode ser explicada pela possível presença de *outliers*. Todavia, não está aqui posta em causa a suposição de normalidade, mantendo-se a confiança na validação dos modelos.

Outra suposição importante no modelo de previsão é a de que os resíduos possuam variância constante. A verificação dessa suposição é feita analisando os gráficos dos dados previstos pelo modelo versus os resíduos, ou do número de experiências versus resíduos (Box *et al.*, 1978; Myers *et al.*, 2016). Constatou-se que não há padrões aparentemente detetáveis, e com isso a suposição de variância constante dos resíduos é válida para o modelo de previsão.

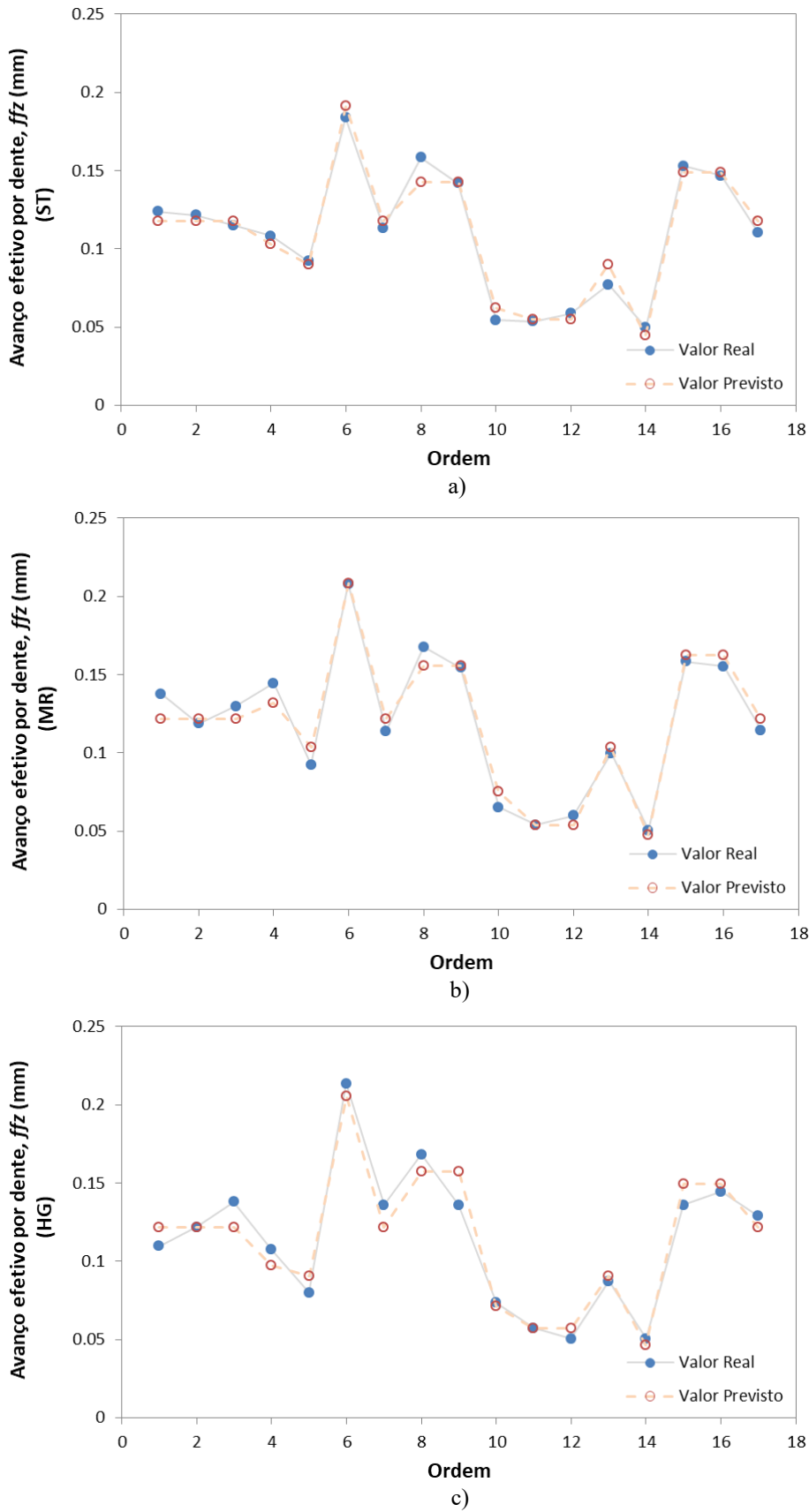


Figura 8.2 – Comparação dos dados experimentais com os fornecidos pelo modelo de previsão
 a) Aglomerado ST; b) Aglomerado MR; c) Aglomerado HG
 Parâmetro de resposta: Avanço efetivo por dente (*ffz*)

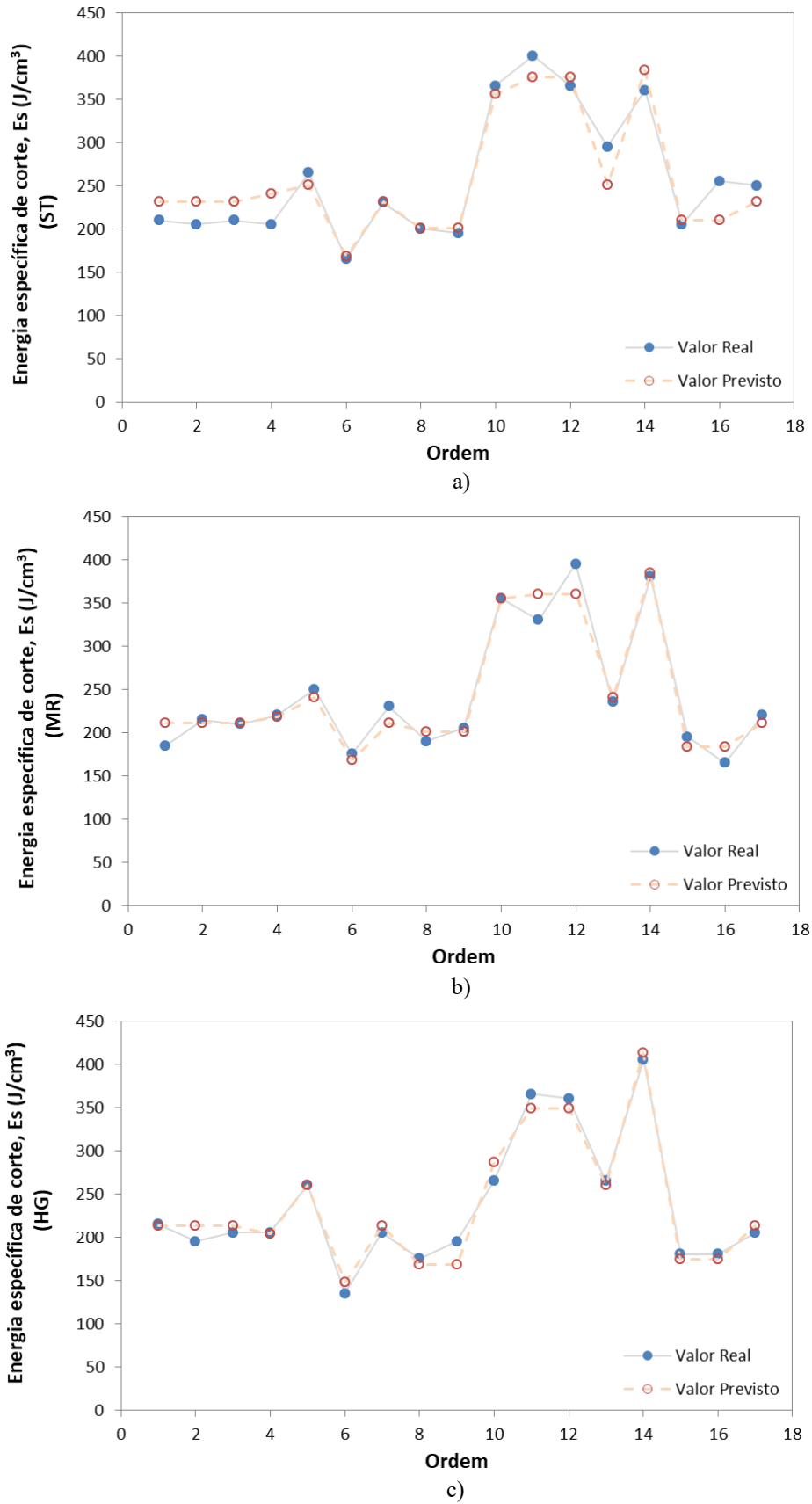


Figura 8.3 – Comparação dos dados experimentais com os fornecidos pelo modelo de previsão
 a) Aglomerado ST; b) Aglomerado MR; c) Aglomerado HG
 Parâmetro de resposta: Energia específica de corte (E_s)

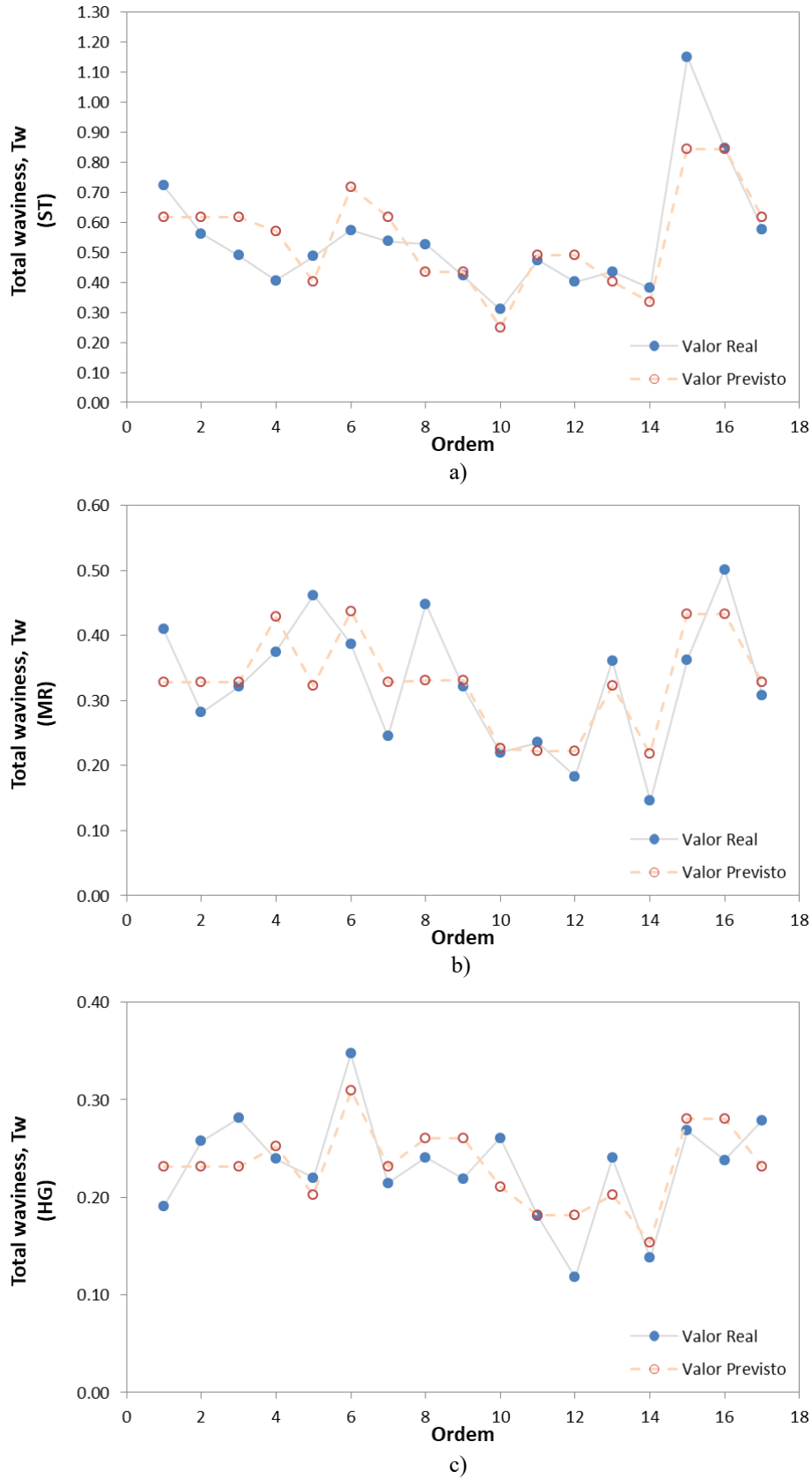


Figura 8.4 – Comparação dos dados experimentais com os fornecidos pelo modelo de previsão
 a) Aglomerado ST; b) Aglomerado MR; c) Aglomerado HG
 Parâmetro de resposta: Total waviness (T_w)

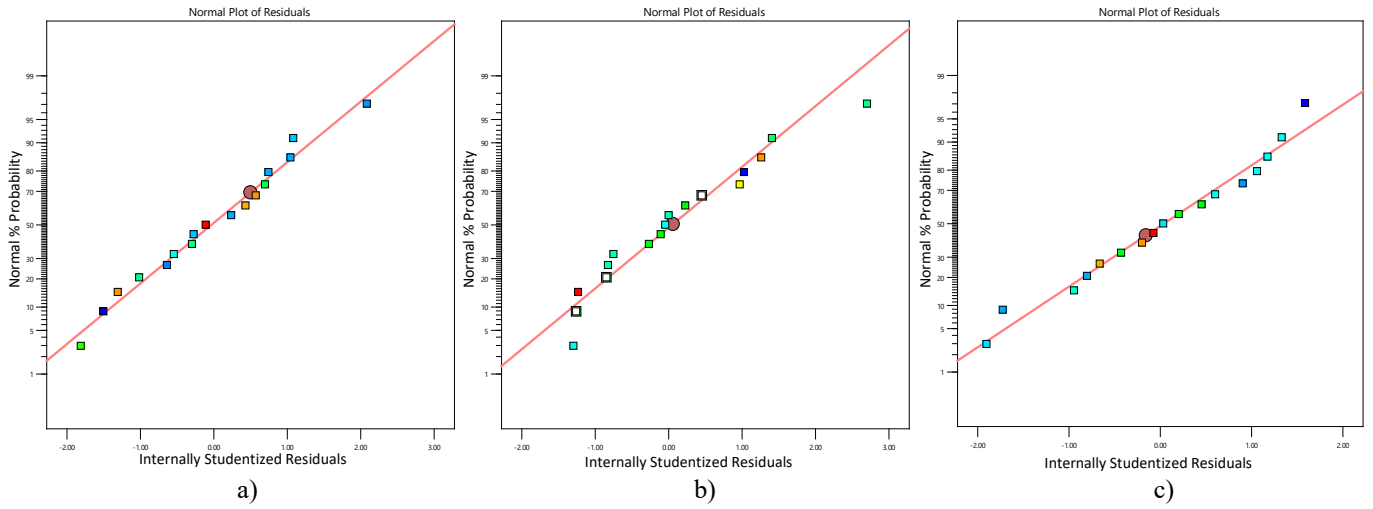


Figura 8.5 – Distribuição normal dos resíduos
 a) Aglomerado ST; b) Aglomerado MR; c) Aglomerado HG
 Parâmetro de resposta: Avanço efectivo por dente (ffz)

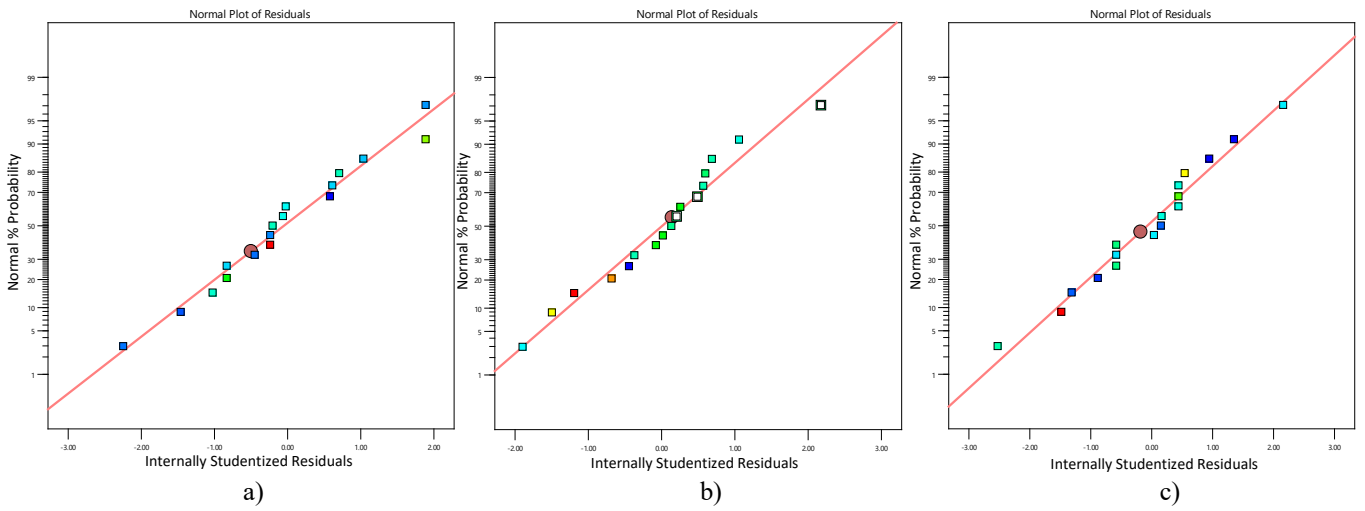


Figura 8.6 – Distribuição normal dos resíduos
 a) Aglomerado ST; b) Aglomerado MR; c) Aglomerado HG
 Parâmetro de resposta: Energia específica de corte (Es)

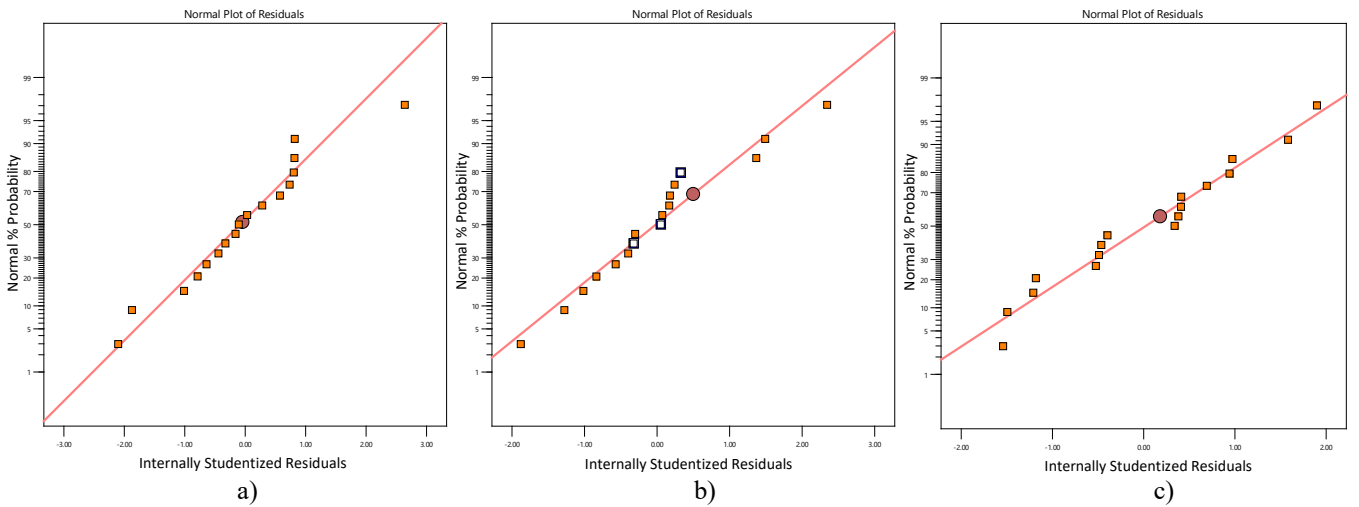


Figura 8.7 – Distribuição normal dos resíduos
 a) Aglomerado ST; b) Aglomerado MR; c) Aglomerado HG
 Parâmetro de resposta: Total waviness (Tw)

8.3.3 Metodologia de superfície de resposta

A metodologia de superfície de resposta pode auxiliar na localização de um possível ponto de ótimo (Bas e Boyaci, 2007; Myers *et al.*, 2016). Conforme se pode apreciar nas Figuras 8.8 (a, b, c), torna-se evidente que, tomando o valor mais baixo de velocidade de avanço na gama de frequências estudadas (neste caso 50 Hz), obtém-se o valor mais baixo de avanço efetivo por dente. Para o critério E_s (Figuras 8.9: a, b, c), traçando o valor mais elevado da velocidade de avanço (17 m/min), a uma frequência de 30 Hz, obtemos o valor mais baixo da energia específica de corte. No caso do critério de qualidade T_w (Figuras 8.10: a, b, c), verifica-se o valor mais baixo para a frequência de 50 Hz conjugado com uma velocidade de avanço de 9 m/min. Porém, o aglomerado ST mostra um comportamento misto e relativamente inesperado para este parâmetro de resposta.

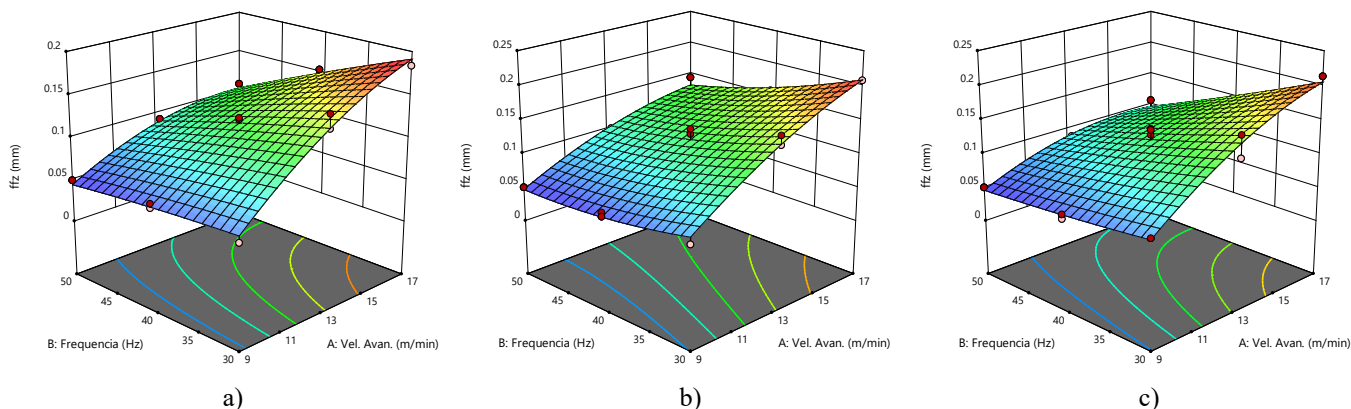


Figura 8.8 – Superfície de resposta
 a) Aglomerado ST; b) Aglomerado MR; c) Aglomerado HG
 Parâmetro de resposta: ffz

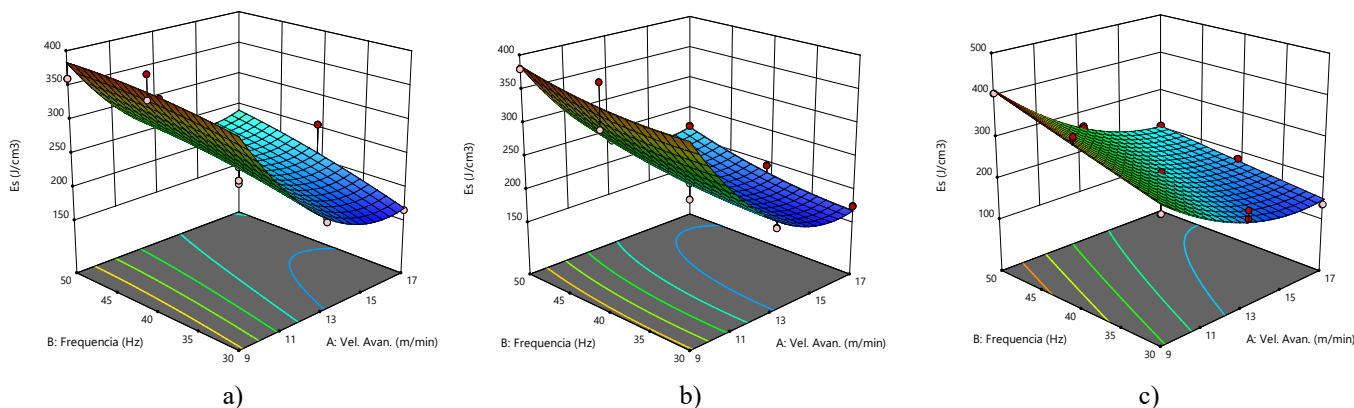


Figura 8.9 – Superfície de resposta
 a) Aglomerado ST; b) Aglomerado MR; c) Aglomerado HG
 Parâmetro de resposta: E_s

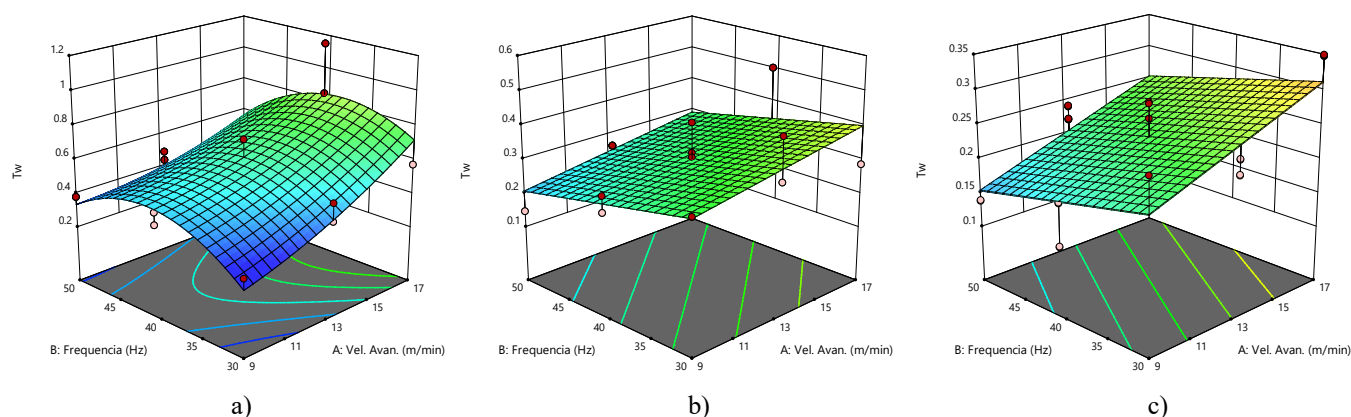


Figura 8.10 – Superfície de resposta
a) Aglomerado ST; b) Aglomerado MR; c) Aglomerado HG
Parâmetro de resposta: T_w

8.4 Otimização e confirmação

A otimização dos parâmetros de maquinação representa um enorme desafio para os setores industriais. Como referimos na introdução, esta pode conduzir a vantagens importantes, nomeadamente na redução do número de experiências a realizar durante a maquinação. Por sua vez, esta redução pode traduzir-se na diminuição dos custos de manufatura, de mão-de-obra e de desperdício de tempo durante a maquinação. No entanto, existe sempre a necessidade de selecionar as condições de maquinação mais adequadas para cada setor de fabricação. Isto pode ser conseguido através da otimização dos fatores de entrada com o objetivo final de se atingir um patamar ótimo para as condições de maquinação. Para a otimização do corte nos Aglomerados de Partículas, um dos aspetos mais relevantes centra-se na necessidade de diminuir o dano na aresta, que deverá ser conseguido através do mínimo consumo de energia, e da maximização da velocidade de avanço, tendo em conta o avanço efetivo por dente em compromisso com os parâmetros anteriores. [ver também Anexo IV, Figuras A4.1, A4.2 e A4.3 – Interação fatores/parâmetros de resposta para ST, MR e HG), e Tabelas A4.1, A4.2 e A4.3 – Coeficientes (confirmação), neste caso dos fatores codificados, somente para efeitos de comparação com os fatores reais].

8.4.1 Modelo otimizado e confirmação para os aglomerados ST

Na Tabela 8.10, podem ser apreciadas as 7 soluções numéricas para o caso específico dos aglomerados ST, determinadas recorrendo à função de otimização do *software Design-Expert 13*[®]. Identifica-se na tabela a solução ótima para os fatores em compromisso com os parâmetros de resposta. Esta solução otimizada acontece a uma velocidade de avanço de 15.828 m/min e uma frequência de 30 Hz, que conduz a um valor o menor possível para o

parâmetro de resposta T_w , que é aqui o objetivo pretendido. Na Figura 8.11 apresentam-se os gráficos de contorno que caracterizam o comportamento dos fatores face aos parâmetros de resposta estudados, e que mostram clara concordância com os critérios de otimização discutidos anteriormente.

Tabela 8.10 – Resultados da otimização para os aglomerados ST

Ordem	Vel. Avan.	Frequência	ffz	Es	T_w	Desejável	
1	15.828	30.000	0.180	164.959	0.624	0.811	Selecionado
2	15.913	30.000	0.181	164.842	0.631	0.811	
3	15.738	30.000	0.179	165.146	0.617	0.811	
4	16.038	30.000	0.183	164.769	0.640	0.811	
5	15.665	30.000	0.179	165.341	0.612	0.810	
6	16.426	50.000	0.103	234.581	0.538	0.780	
7	16.588	50.000	0.103	236.060	0.547	0.780	

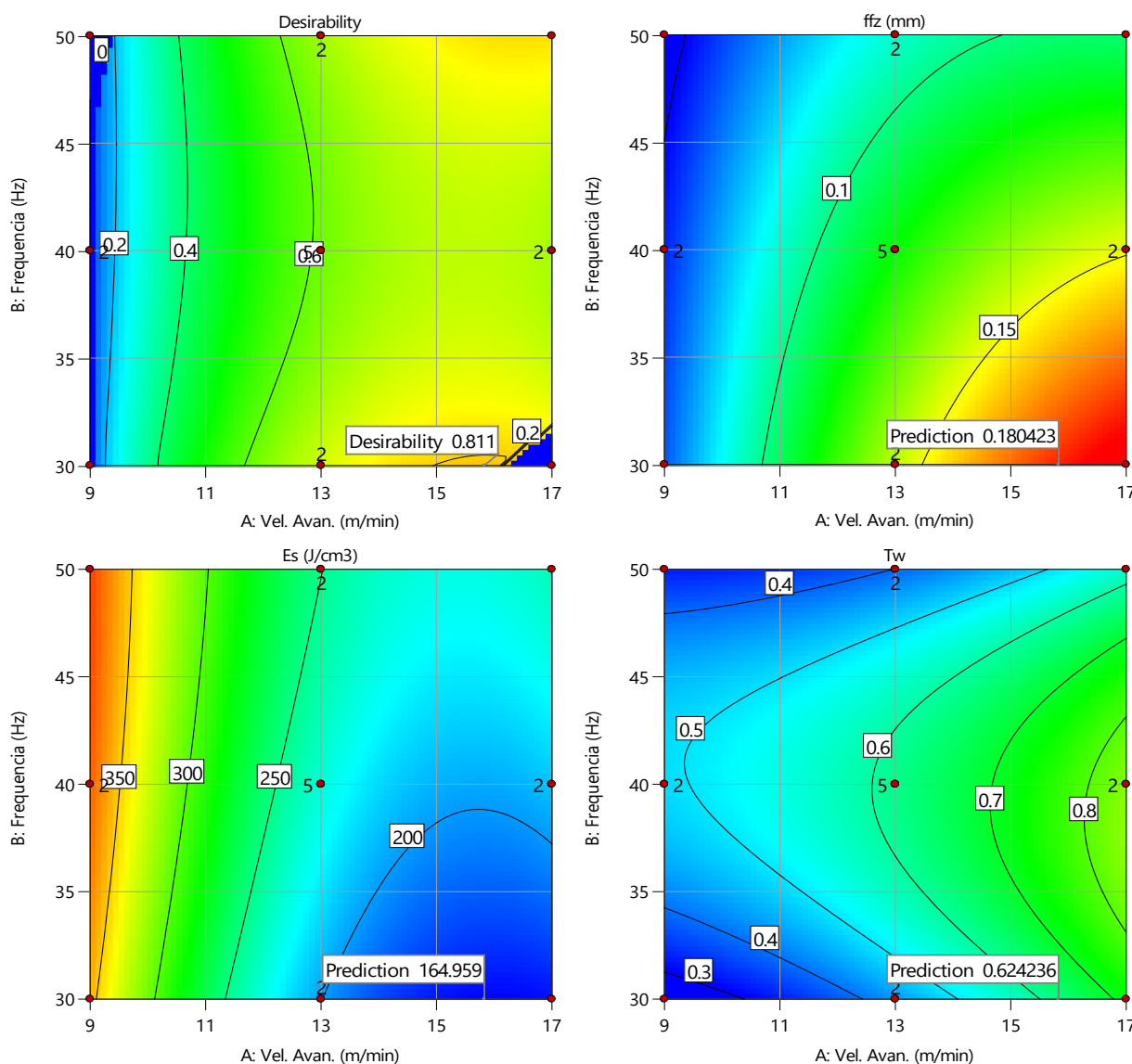


Figura 8.11 – Parâmetros otimizados para o Aglomerado de Partículas ST

A confirmação dos resultados obtidos pelo modelo otimizado é exibida na Tabela 8.11. Após verificação da normalidade dos valores e realizada a otimização numérica, foi calculado o intervalo de confiança sobre o valor da média, a um nível de significância de 95%. Conforme se pode apreciar nesta tabela, nenhum valor está fora do intervalo de previsão (IP), o que atesta que não existe qualquer falha na confirmação do modelo.

Tabela 8.11 – Confirmação do modelo de otimização para os aglomerados ST

Solução 1 de 7 Resposta	Previsto Média	Previsto Mediana	Desvio Padrão	n	Erro Previsto	95% IP -	95% IP +
<i>ffz</i>	0.180429	0.180429	0.00825564	1	0.00989822	0.158643	0.202215
<i>Es</i>	164.959	164.959	28.3292	1	33.9657	90.2006	239.716
<i>Tw</i>	0.624279	0.624279	0.138128	1	0.16561	0.259772	0.988785

8.4.2 Modelo otimizado e confirmação para os aglomerados MR

Tal como aconteceu nos aglomerados ST, também aqui recorreremos à função de otimização para determinarmos as soluções numéricas para o modelo. Na Tabela 8.12 apresenta-se a informação relativa às 4 melhores soluções para a otimização adequadas ao caso dos aglomerados MR.

Tabela 8.12 – Resultados da otimização para os aglomerados MR

Ordem	Vel. Avan.	Frequência	<i>ffz</i>	<i>Es</i>	<i>Tw</i>	Desejável
1	17.000	50.000	0.132	218.520	0.293	0.767 Selecionado
2	17.000	49.601	0.133	216.775	0.295	0.767
3	17.000	49.482	0.133	216.263	0.295	0.766
4	17.000	44.461	0.147	197.031	0.322	0.756

Na Figura 8.12 apresentam-se os gráficos de contorno que atestam a concordância dos parâmetros otimizados, já apresentados na Tabela 8.12. Identifica-se nesta tabela a solução ótima para os fatores conjugados com os parâmetros de resposta. A solução otimizada ocorre quando se experiencia uma velocidade de avanço de 17.0 m/min e uma frequência de 50 Hz, que se reflecte num mínimo valor de 0.293 para o critério de qualidade *Tw*.

Na Tabela 8.13 apresenta-se a confirmação dos resultados obtidos pelo modelo otimizado. Tal como se pode constatar, nenhum valor está fora do intervalo de previsão (IP), o que bem atesta que não existe nenhuma lacuna na confirmação do modelo quando este é calculado num intervalo de confiança sobre o valor da média a um nível de significância de 95%.

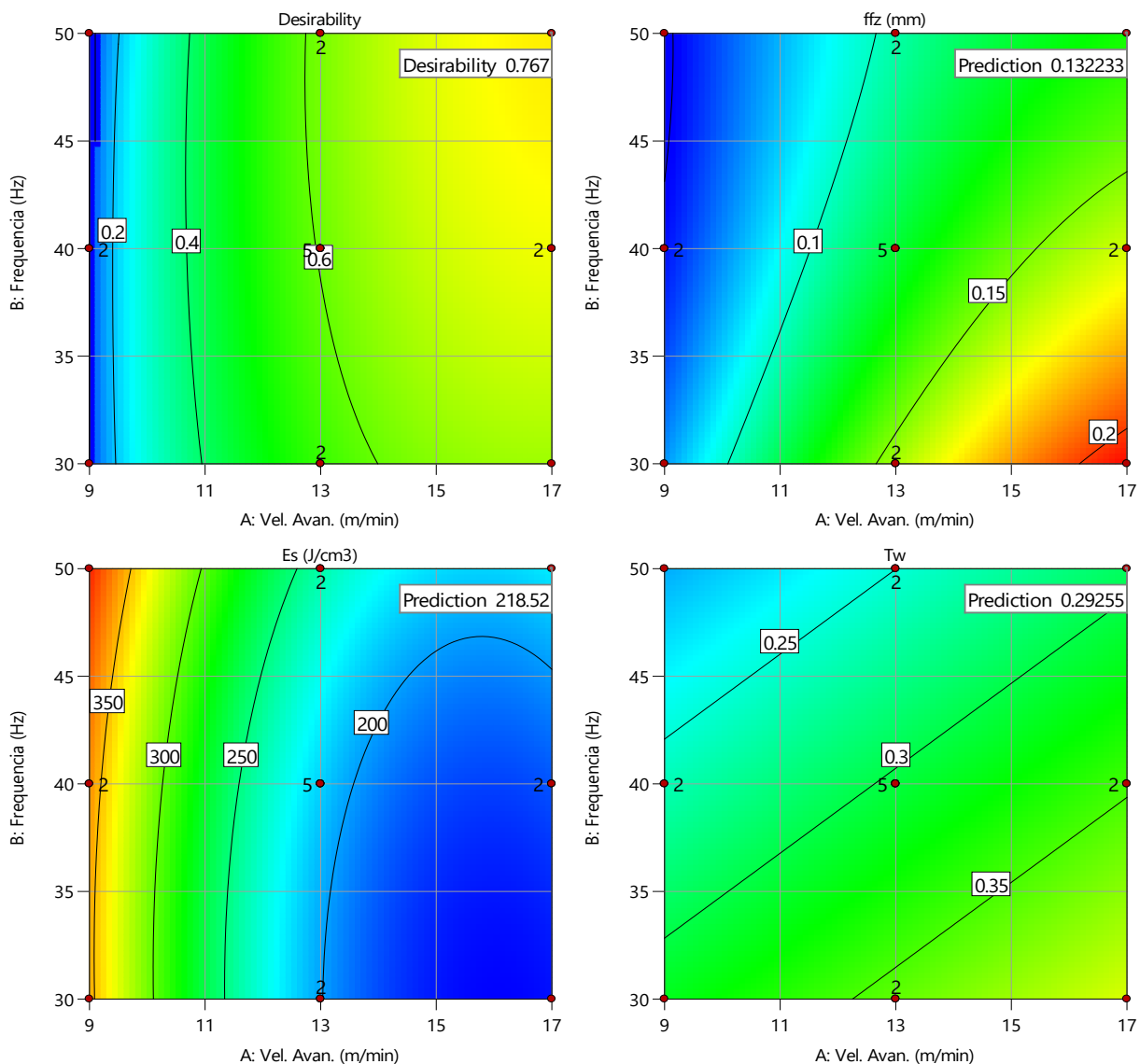


Figura 8.12 – Parâmetros otimizados para o Aglomerado de Partículas MR

Tabela 8.13 – Confirmação do modelo de otimização para os aglomerados MR

Solução 1 de 4 Resposta	Previsto Média	Previsto Mediana	Desvio Padrão	n	Erro Previsto	95% IP -	95% IP +
<i>ffz</i>	0.132233	0.132233	0.0100277	1	0.0130137	0.10359	0.160876
<i>Es</i>	218.52	218.52	19.204	1	24.9224	163.666	273.374
<i>Tw</i>	0.29255	0.29255	0.0728234	1	0.0833127	0.113862	0.471238

8.4.3 Modelo otimizado e confirmação para os aglomerados HG

Na Tabela 8.14 apresenta-se a informação relativa às 5 melhores soluções para a otimização ajustada ao caso dos aglomerados HG. Tal como aconteceu nos aglomerados ST e MR, recorreremos também aqui à função de otimização para determinarmos as melhores soluções numéricas para o modelo. A solução otimizada ocorre quando se emprega uma velocidade de avanço de 17.0 m/min e uma frequência de 50 Hz, que conduz a um valor otimizado de 0.252 para o critério de qualidade T_w .

Tabela 8.14 – Resultados da otimização para os aglomerados HG

Ordem	Vel. Avan.	Frequência	ffz	Es	T_w	Desejável
1	17.000	50.000	0.097	203.618	0.252	0.677 Selecionado
2	16.955	50.000	0.097	203.707	0.251	0.676
3	16.890	50.000	0.098	203.858	0.251	0.676
4	16.756	50.000	0.098	204.251	0.249	0.676
5	15.952	50.000	0.099	208.882	0.239	0.668

Na Figura 8.13 apresentam-se os gráficos de contorno da otimização dos fatores face aos parâmetros de resposta para os aglomerados HG, estes atestam a concordância dos parâmetros otimizados apresentados na tabela anterior.

Na Tabela 8.15 apresenta-se a confirmação dos resultados obtidos pelo modelo otimizado. Tal como facilmente se comprova nenhum valor está fora do intervalo de previsão, quando estes são calculados num intervalo de confiança sobre o valor da média a um nível de significância de 95%. Estes resultados atestam a confiança no modelo uma vez que não existe nenhuma falha na sua confirmação, pelo facto de não existirem valores fora dos limites.

Tabela 8.15 – Confirmação do modelo de otimização para os aglomerados HG

Solução 1 de 5 Resposta	Previsto Média	Previsto Mediana	Desvio Padrão	n	Erro Previsto	95% IP -	95% IP +
ffz	0.0972231	0.0972231	0.012695	1	0.0164752	0.0609615	0.133485
Es	203.618	203.618	14.8829	1	19.3146	161.107	246.13
T_w	0.25198	0.25198	0.0392115	1	0.0448595	0.155766	0.348194

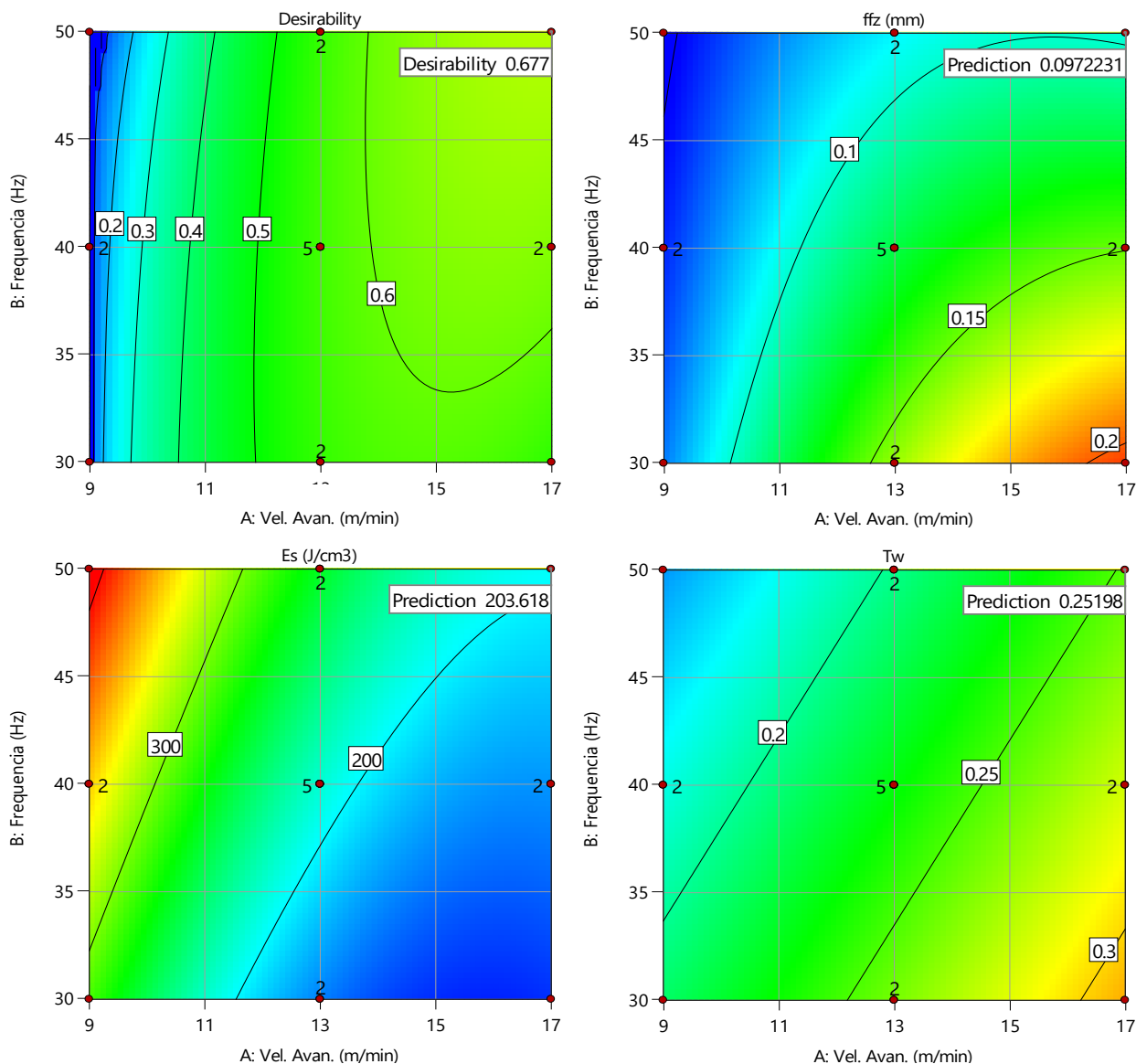


Figura 8.13 – Parâmetros otimizados para o Aglomerado de Partículas HG

8.5 Conclusões

A maquinação dos Aglomerados de Partículas é, como oportunamente referimos nos capítulos anteriores, de extrema importância particularmente para a indústria do mobiliário. O estudo da otimização dos parâmetros de maquinação pode contribuir para a seleção dos adequados níveis e fatores de maquinação. A produtividade e qualidade podem ser aumentadas por via da otimização, contribuindo assim para a rentabilização dos recursos disponíveis. Neste capítulo, focámos a atenção na maquinação de três tipos de aglomerados: standard (ST), resistente à humidade (MR) e homogéneo (HG). Foram considerados dois fatores de entrada: a velocidade de avanço (A) e a frequência (f) com três níveis, e como

parâmetros de resposta: o avanço efetivo por dente (ffz), a energia específica de corte (Es) e o parâmetro de qualidade que designamos por Tw . Para o design das experiências recorreremos ao modelo de Box-Behnken, e a combinação gerada entre os fatores deu origem à realização de 17 experiências.

Para averiguar a adequação e capacidade preditiva do modelo nos três parâmetros de resposta relativamente aos três tipos de aglomerados, recorreremos à determinação do coeficiente de determinação (R^2), e de seguida à análise do R^2 ajustado. Os modelos centraram-se na maximização do R^2 ajustado e do R^2 previsto. Verificámos que para os parâmetros de resposta ffz e Es existe uma boa correlação, o mesmo já não se pode confirmar para o caso do parâmetro de resposta Tw , onde apenas o aglomerado HG apresenta uma correlação que poderemos considerar aceitável (quando comparada com os outros dois tipos de aglomerados) apesar de distante da unidade. Esta análise, permite-nos concluir que a qualidade na aresta de corte nos aglomerados ST e MR é relativamente mais baixa que no aglomerado HG. Esta divergência pode ser explicada por via das composições dos aglomerados ST e MR e respetivas propriedades físico-mecânicas, que são relativamente mais baixas quando comparadas com as de HG. Este facto poderá contribuir para a diminuição da solidez do agregado partícula-partícula, com conseqüente reflexo na menor qualidade do perfil da aresta de corte.

Com vista a fazer previsões sobre as respostas para os níveis de cada fator foram determinadas as equações em termos de fatores reais. A partir destas comparam-se os dados experimentais com os modelos teóricos, e concluiu-se que os resultados para os parâmetros de resposta (ffz e Es), mostravam -uma vez mais- boa concordância para os 3 tipos de aglomerados ensaiados.

Por último procedeu-se à otimização e confirmação dos modelos selecionados, centrando o objetivo na minimização do dano (Tw), que deverá ser conseguido através do menor consumo energético, e em sentido oposto pela maximização da velocidade avanço (A). Com estes pressupostos acautelados confirmámos que os modelos otimizados exibem boa concordância, uma vez que nenhum valor apareceu fora do intervalo de previsão (IP), o que bem atesta que não existiu nenhuma lacuna na confirmação dos modelos. Estes foram calculados num intervalo de confiança sobre o valor da média a um nível de significância de 95%.

8.6 Referências bibliográficas

Bas D., Boyaci I. H., (2007): “Modeling and optimization: Usability of response surface Methodology”. *Journal of Food Engineering*, v. 78, n. 3, p. 836–845, 2007.

Bezerra, M. A. Santelli, R.E., Oliveira, E.P., Villar, L.S. and Escaleira, L.A., (2008): “Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry”. *Talanta*, v. 76, n. 5, p. 965–977.

Box G. E. P. & Behnken D. W., (1960): “Some new three level designs for the study of quantitative variables”. *Technometrics* 2, 455–475.

Box, G.E.P.; Hunter, W. G.; Hunter, J.S. (1978): “Statistics for experimenters: an introduction to design, analysis and model building”. John Wiley & Sons. p. 1-14; 291-344; 510-552.

Cox David R. & Reid Nancy M. (2000): “The theory of design of experiments”. (Chapman & Hall/CRC). ISBN 978-1-58488-195-7

Davim, J. P., (2011): “Wood Machining”. First ed. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc. Great Britain and the United States, pp. 275.

Dean, A. & Voss, D. (1999): “Design and Analysis of Experiments”. [s.l.] Springer US, v. 26.

Design-Expert® (2021); “Design and interpretation of multi-factor experiments”. Design of Experiments (DOE) Made Easy. Version 13, ©Copyright 2021, Stat-Ease, Inc.

Freedman, David A.; Pisani, Robert; Purves, Roger (2007): “Statistics”, 4th edition. W.W. Norton & Company ISBN 978-0-393-92972-0

Ferreira, C., Bruns E., Ferreira S., Matos D., David M., Bandao C., da Silva P., Portugal A., dos Reis S., Souza S., dos Santos L., (2007): “Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods”. *Analytica Chimica Acta*, 597(2), 179–186.

Garrido N., Martins J., Carvalho L., Mendes J., Costa C. (2007): “Influence of the sawing conditions on particleboard edge quality”. *Proceedings of the Third International Symposium on Wood Machining, Lausanne, Switzerland*.

Montgomery D. C., (2008): “Design and Analysis of Experiments”. 7th Edition, John Wiley and Sons.

Montgomery, D. C., (2009): “Introduction to Statistical Quality Control”. 6th Edition, John Wiley & Sons, New York.

Myers R. H., Montgomery D. C., Anderson-Cook C. M., (2016): “Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments”. 4rd Ed. New York: Wiley.

Sit V., (2007): “Analyzing ANOVA Designs: Biometrics Information Handbook No. 5”. Province of British Columbia, Ministry of Forests Research Program. Working paper 07/1995.

CONCLUSÕES GERAIS E PERSPETIVAS DE TRABALHO FUTURO

*Otimização da operação de corte de Aglomerados de Partículas
fabricados com um elevado teor de madeira reciclada*

Conclusões Gerais

Este trabalho centrou-se fundamentalmente no estudo da influência de parâmetros operatórios de fabrico dos Aglomerados de Partículas, das suas propriedades físico-mecânicas e dos parâmetros de corte, na maquinação e na qualidade do perfil da aresta de corte. O Aglomerado de Partículas fabricado com um elevado teor de reciclados, foi selecionado para este trabalho por se tratar de um material ambientalmente compatível e de crescente interesse para a indústria. Com efeito, algumas indústrias do sector têm como objetivo para o próximo triénio, incorporar 70% de madeira reciclada no processo de fabrico industrial dos Aglomerados de Partículas. Daqui se retira que a utilização dos reciclados é de especial importância na actualidade, e que se projeta através do seu enorme potencial para o futuro. Esta situação é explicada de uma forma geral por razões económicas, por via da contribuição na redução dos custos de produção, e de forma particular pela relevância do seu impacto ambiental positivo. De facto, é no domínio ambiental que se verificam os maiores ganhos, uma vez que estamos perante uma abordagem processual circular. Ou seja, a reutilização e reciclagem dos resíduos mantem-se numa especial cadência circular, e aqui bem podemos afirmar que se trata de um ciclo virtuoso onde a madeira reciclada pode reintegrar o processo inúmeras vezes.

Ao longo deste trabalho foi descrita a metodologia experimental e de tratamento de dados, e analisada a influência dos fatores, com especial atenção para influência do *mix* de reciclados, dos parâmetros operatórios de fabrico, das propriedades e das condições de maquinação nos parâmetros de resposta, em especial na energia específica de corte e na qualidade da aresta. As conclusões do trabalho que foi efetuado foram já apresentadas ao longo dos capítulos que integram esta tese. Aqui reunimos as principais conclusões, bem como as perspectivas de trabalho futuro.

Relativamente ao sistema de visão artificial preconizado nos *ensaios preliminares 1* (Capítulo IV) onde o destaque foi dado à caracterização da aresta, e ao estudo efetuado sobre a influência das condições de maquinação na qualidade da aresta apresentado nos *ensaios preliminares 2*, concluímos que:

Ensaio preliminares (P1)

- i) A aplicação do sistema de visão artificial com uso dum feixe laser como fonte de luz e quatro parâmetros (desvio da superfície, dimensão da partícula, regularidade

da superfície < 1 mm e regularidade da superfície < 10 mm) é um sistema bastante promissor para a análise do perfil e área de influência da aresta;

- ii) o sistema apresenta boas condições para ser instalado *on-line*, pelo menos no que diz respeito ao Aglomerado de Partículas revestido com papel melamínico.

Ensaio preliminares (P2)

- i) A partir dos efeitos dos fatores (tipo de aglomerado, velocidade de avanço por dente e velocidade de rotação), sobre os parâmetros de resposta (*Total waviness*, *energia específica de corte e avanço efetivo por dente*) e na resposta dos sensores piezoelétricos (*forças de corte*), verificamos que todos os fatores considerados são muito significativos;
- ii) os sensores piezoelétricos utilizados são capazes de detetar o contacto entre cada dente da lâmina da serra com a superfície do Aglomerado de Partículas;
- iii) mesmo que os níveis de maquinação selecionados correspondam a uma elevada qualidade da aresta, o sistema tem capacidade para detetar diferenças de qualidade;
- iv) apesar da pouca diferença existente nos três tipos de Aglomerado de Partículas (todos eles têm três camadas e são produzidos da mesma mistura de madeira, só o tipo HG tem um volume mais elevado da camada externa e o MR tem um tipo de adesivo diferente dos outros dois), o sistema de visão artificial utilizado para a avaliação da qualidade da aresta aparenta ser bastante sensível para aquelas diferenças nos três tipos de Aglomerado de Partículas;
- v) o baixo custo e a elevada sensibilidade dos dois sistemas combinados (sensores piezoelétricos e câmara CCD) tornam possível o seu uso para monitorização e controlo online de máquinas de corte industriais.

Do trabalho sobre o efeito do *mix* de madeira na maquinação (Capítulo V), foi-nos possível retirar as seguintes conclusões principais:

- i) Para o critério de qualidade “total waviness”, o *mix* de madeira e os parâmetros de produção (resina, tempo e temperatura de prensa) são fortemente significativos;
- ii) uma elevada percentagem de madeira reciclada conduz a uma fraca qualidade da aresta, devido ao facto das frágeis partículas da madeira reciclada se desagregarem com relativa facilidade;
- iii) os resultados não são afetados pelo método de captação das imagens, o que permite concluir que este sistema de visão artificial pode ser aplicado de forma direta numa máquina de corte industrial;
- iv) para a energia específica de corte, o *mix* de madeira é muito significativo, no entanto, as condições de produção dos aglomerados não se revelam significativas;
- v) o efeito do avanço por dente é muito importante, facto que deve ser tomado em consideração no fabrico das ferramentas de corte com o objetivo de melhorar, não só a qualidade da aresta de corte dos Aglomerados de Partículas, mas particularmente contribuir para a redução da energia consumida durante o seu processo de maquinação.

Dos resultados experimentais relativos ao estudo do impacto dos captadores de formaldeído na maquinação e qualidade da aresta (Capítulo VI), conclui-se genericamente que:

- i) Os captadores de formaldeído conduzem a uma diminuição do teor em formaldeído, embora provoquem uma redução nas propriedades físico-mecânicas, em particular na resistência interna;
- ii) a incorporação de captadores tem muito menos influência na energia específica de corte durante a operação de corte do que as condições de maquinação, particularmente do que diz respeito ao avanço por dente;
- iii) as diferentes estratégias usadas para fazer diminuir o teor de formaldeído tem grande influência, não só na energia específica de corte, mas especialmente na qualidade da aresta maquinada;

- iv) todos os captadores testados provocaram uma redução significativa na qualidade relativa da aresta. O captador com melhor desempenho parece ser a ureia sólida, uma vez que apresenta um decréscimo na energia específica de corte, embora com uma pequena redução na qualidade da aresta. O captador com pior desempenho foi o amido;
- v) a granulometria das partículas de ureia exerce uma forte influência na qualidade da aresta, embora não afete a energia específica de corte. A ureia fina apresenta melhor desempenho comparativamente à ureia grossa.

Relativamente ao trabalho sobre a influência da incorporação de espécies alternativas na maquinação e qualidade da aresta (Capítulo VII), conclui-se que:

- i) O uso de diferentes *mix* de madeira tem uma influência importante, quer na qualidade da aresta maquinada dos Aglomerados de Partículas, quer na energia específica de corte (e consequentemente no desgaste da ferramenta);
- ii) a introdução destas espécies de madeira (*Populus alba* e *Eucalyptus globulus*), que têm baixa massa volúmica e menor rigidez que o pinho, melhora a maquinação dos Aglomerados de Partículas, no entanto, reduz a sua resistência interna.

Do Capítulo VIII, relativo ao estudo dos modelos para a previsão da qualidade da aresta de corte, podemos retirar as seguintes conclusões principais:

- i) Com os modelos centrados na maximização do R^2 ajustado e do R^2 previsto, verificámos que para os parâmetros de resposta: avanço efectivo por dente (ffz) e energia específica de corte (Es), existe uma boa correlação, o mesmo já não se pode confirmar para o caso do parâmetro de resposta *Total waviness*;
- ii) apenas o aglomerado HG apresenta uma correlação aceitável (quando comparada com os outros dois tipos de aglomerados) apesar de distante da unidade;

- iii) a qualidade na aresta de corte nos aglomerados ST e MR é relativamente mais baixa que nos aglomerados HG. Esta divergência ser explicada por via das suas composições e das mais baixas propriedades físico- mecânicas quando comparadas com HG, e que poderão contribuir para a diminuição da solidez do agregado partícula-partícula, com conseqüente reflexo na menor qualidade do perfil da aresta de corte;
- iv) a partir das previsões sobre as respostas para os níveis de cada fator, comparam-se os dados experimentais com os modelos teóricos, e estes revelaram que os resultados para os parâmetros de resposta (ffz e Es), mostravam mais uma vez boa concordância para os tipos de aglomerados ensaiados;
- v) os modelos otimizados exibem boa concordância, uma vez que nenhum valor apareceu fora do intervalo de previsão (PI), o que bem atesta que não existiu nenhuma lacuna na confirmação dos modelos. Estes foram calculados num intervalo de confiança sobre o valor da média a um nível de significância de 95%.

No que respeita às **perspetivas de trabalho** imediato que complementem o trabalho aqui apresentado, salientamos os seguintes pontos:

- i) Estudo da influência do desgaste da ferramenta de corte na maquinação e qualidade da aresta de aglomerados com elevado teor de reciclados, e por outro lado o efeito da adição de captadores de formaldeído no desgaste da ferramenta;
- ii) avaliar a possibilidade de aplicar o sistema de visão artificial (ou uma versão melhorada) a outras geometrias de corte, nomeadamente a fresagem e furação, uma vez que são processos de maquinação bastante comuns na indústria de fabrico de mobiliário, e por usarem frequentemente os PB (revestidos a diversos materiais) como matéria-prima de excelência;
- iii) estudo dos efeitos da rigidez e dureza do elemento cortante, e da tensão e tensionamento dos discos na maquinação e qualidade da aresta de corte nos aglomerados;

- iv) analisar a possibilidade de estender este trabalho de investigação a outros derivados de madeira, nomeadamente o MDF (aglomerado de fibras de madeira obtido por via seca) revestido, uma vez que também este é bastante usado na indústria de mobiliário, e está sujeito basicamente as mesmas operações de corte que os PB;
- v) apesar dos sensores piezoelétricos Murata[®] se mostrarem fiáveis, e terem por isso respondido bem aos propósitos deste trabalho, sugerimos que possam ser usados outros sensores mais robustos para aquisição dos valores das forças de corte, por exemplo dinamómetros piezoelétricos acoplados à máquina de corte, que melhor limitem as interferências por via de perturbações externas ou internas provocadas pela máquina, que não são desejáveis durante o processo de aquisição de dados;
- vi) simulação numérica das forças de corte versus condições de maquinação com o objetivo de analisar o contato íntimo entre o gume da ferramenta e os PB, para análise detalhada da amplitude das forças de corte teóricas envolvidas, comparativamente aos resultados experimentais. Sugere-se aqui o uso do método dos elementos finitos.

ANEXO I

Especificações das Propriedades dos Aglomerados de Partículas

A1. Especificações das Propriedades dos Aglomerados de Partículas

A1.1 Requisitos gerais para todos os tipos de placas

O Aglomerado de Partículas deve, à saída da fábrica, satisfazer os requisitos gerais indicados na Tabela A1.1. Para alguns tipos ou aplicações de Aglomerados de Partículas, ou no caso de placas pré-cortadas, ou placas com maquinação adicional (macheado e similares) podem ser acordadas tolerâncias especiais para as propriedades nº. 1, 2 e 3.

Tabela A1.1 – Requisitos gerais à saída da fábrica EN 312-1 (2010)

Nº	Propriedade	Método de ensaio	Requisito
1 ¹⁾	Tolerâncias nas dimensões nominais - Espessura (lixada) numa mesma placa e entre placas - Espessura (não lixada) numa mesma placa e entre placas - Comprimento e largura	EN 324-1	± 0,3 mm ± 0,3 mm + 1,7 mm ± 0,5 mm
2 ¹⁾	Tolerância da rectilinearidade dos bordos	EN 324-2	1,5 mm por m
3 ¹⁾	Tolerância de esquadria	EN 324-2	2 mm por m
4	Teor em água	EN 322	5% a 13%
5 ¹⁾	Tolerância na massa volúmica média no interior da placa	EN 323	± 10%
6 ²⁾	Teor em formaldeído (valor do perforador) - Classe 1 - Classe 2	EN 120	≤ 8 mg/100g > 8 mg/100g ≤ 30mg/100g
<p>¹⁾ Estes valores são caracterizados por um teor em água no material correspondente a uma humidade relativa de 65% e uma temperatura de 20 °C.</p> <p>²⁾ Os valores do perforador aplicam-se e um teor de água H no material de 6,5%. No caso do Aglomerado de Partículas com outros de teores em água (no intervalo $3\% \leq H \leq 10\%$ o valor do perforador deve ser multiplicado por factor F que pode ser calculado a partir da seguinte equação:</p> $F = - 0,133 H + 1,86$			

A1.2 Requisitos para placas de uso geral em ambiente seco (P1)

O Aglomerado de Partículas deve estar conforme os requisitos da EN 312-1 e com os apresentados no quadro 1 dessa Norma. Os requisitos da Tabela A1.2 referem-se a valores do percentil 5 com base nos valores médios das placas tomadas individualmente e calculados segundo a EN 326-1. Estes devem ser superiores ou iguais aos valores da Tabela A1.2.

Tabela A1.2 – Requisitos para as propriedades mecânicas especificadas EN 312-2 (2010)

Propriedade	Método de ensaio	Unidade	Requisito					
			Gama de espessura (nominal, mm)					
			> 6 a 13	> 13 a 20	> 20 a 25	> 25 a 32	> 32 a 40	> 40
Resistência à flexão	EN 310	N/mm ²	12,5	11,5	10	8,5	7	5,5
Resistência à tracção perpendicular às faces da placa	EN 319	N/mm ²	0,28	0,24	0,20	0,17	0,14	0,14

Nota: Estes valores são caracterizados por um teor em água no material correspondente a uma humidade relativa de 65% e uma temperatura de 20 °C.

Os valores da Tabela A1.2 para a resistência à flexão são aplicáveis aos resultados do ensaio obtidos em todas as direcções do plano da placa.

A1.3 Requisitos para placas para aplicações interiores (incluindo mobiliário) em ambiente seco (P2)

Para o módulo de elasticidade em flexão e resistência à flexão, os valores da Tabela A1.3 devem aplicar-se aos resultados do ensaio obtidos em todas as direcções do plano da placa.

Tabela A1.3 – Requisitos para as propriedades mecânicas especificadas EN 312-3 (2010)

Propriedade	Método de ensaio	Unidade	Requisito					
			Gama de espessura (nominal, mm)					
			> 6 a 13	> 13 a 20	> 20 a 25	> 25 a 32	> 32 a 40	> 40
Resistência à flexão	EN 310	N/mm ²	14	13	11,5	10	8,5	7
Módulo de elasticidade em flexão	EN 310	N/mm ²	1800	1600	1500	1350	1200	1050
Resistência à tracção perpendicular às faces da placa	EN 319	N/mm ²	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20	0,20
Resistência ao arranque da camada superficial	EN 311	N/mm ²	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

Nota: Estes valores são caracterizados por um teor em água no material correspondente a uma humidade relativa de 65% e uma temperatura de 20 °C.

Os valores da Tabela A1.3 para a resistência à camada superficial devem aplicar-se aos resultados do ensaio obtidos em cada face.

A1.4 Requisitos para fins estruturais em ambiente seco (P4)

Os requisitos definidos na Tabela A1.4 referem-se a valores do percentil 5 (percentil 95 no caso do inchamento em espessura) com base nos valores médios das placas tomadas individualmente e calculados segundo a EN 326. No caso do inchamento em espessura, estes

devem ser iguais ou inferiores aos valores da Tabela A1.4 e no caso de todas as outras propriedades, eles devem ser iguais ou superiores aos valores da tabela A1.4.

Tabela A1.4 – Requisitos para as propriedades mecânicas e de inchamento especificadas EN 312-4 (2010)

Propriedade	Método de ensaio	Unidade	Requisito					
			Gama de espessura (nominal, mm)					
			> 6 a 13	> 13 a 20	> 20 a 25	> 25 a 32	> 32 a 40	> 40
Resistência à flexão	EN 310	N/mm ²	17	15	13	11	9	7
Módulo de elasticidade em flexão	EN 310	N/mm ²	2300	2150	1900	1700	1500	1200
Resistência à tracção perpendicular às faces da placa	EN 319	N/mm ²	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20	0,20
Inchamento em espessura 24 h	EN 317	%	16	15	15	15	14	14

Nota: Os valores para as propriedades de flexão e resistência à tracção perpendicular ao plano da placa são caracterizados por um teor em água no material correspondente a uma humidade relativa de 65% e uma temperatura de 20 °C.

Os valores para o inchamento em espessura são caracterizados por um teor em água no material, antes do tratamento, correspondente a uma humidade relativa de 65% e uma temperatura de 20 °C.

Os valores da Tabela A1.4 para a resistência e para o módulo de elasticidade devem aplicar-se aos resultados do ensaio obtidos em qualquer das direcções do plano das placas.

A1.5 Requisitos para placas para fins estruturais em ambiente húmido (P5)

O ambiente húmido é definido para a classe de serviço 2 da ENV 1995-1-1: *Eurocode 5 – Design of timber structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*, que é caracterizado por um teor em água no material que corresponde a uma temperatura de 20 °C e uma humidade relativa do ar ambiente que apenas ultrapassa os 85% durante algumas semanas por ano. As placas deste tipo estão aptas para serem utilizadas na classe de risco biológico 1 e 2 da EN 335-3.

Os requisitos definidos na Tabela A1.5 e A1.6 referem-se a valores do percentil 5 (percentil 95 no caso do inchamento em espessura) com base nos valores médios das placas tomadas individualmente e calculados segundo a EN 326-1. No caso do inchamento em espessura, estes devem ser iguais ou inferiores aos valores da Tabela A1.5 e A1.6 e no caso de todas as outras propriedades, eles devem ser iguais ou superiores aos valores da Tabela A1.5 e A1.6.

Tabela A1.5 – Requisitos para as propriedades mecânicas e de inchamento especificadas EN 312-5 (2010)

Propriedade	Método de ensaio	Unidade	Requisito					
			Gama de espessura (nominal, mm)					
			> 6 a 13	> 13 a 20	> 20 a 25	> 25 a 32	> 32 a 40	> 40
Resistência à flexão	EN 310	N/mm ²	18	16	14	12	10	9
Módulo de elasticidade em flexão	EN 310	N/mm ²	2550	2400	2150	1900	1700	1550
Resistência à tracção perpendicular às faces da placa	EN 319	N/mm ²	0,45	0,40	0,35	0,25	0,30	0,25
Inchamento em espessura 24 h	EN 317	%	11	10	10	10	9	9

Nota: Os valores para as propriedades de flexão e resistência à tracção perpendicular ao plano da placa são caracterizados por um teor em água no material correspondente a uma humidade relativa de 65% e uma temperatura de 20 °C.

Os valores para o inchamento em espessura são caracterizados por um teor em água no material, antes do tratamento, correspondente a uma humidade relativa de 65% e uma temperatura de 20 °C.

Os valores da Tabela A1.6 para a resistência à flexão e módulo de elasticidade devem aplicar-se aos resultados do ensaio obtidos em qualquer das direcções do plano das placas.

Tabela A1.6 – Requisitos para a resistência à humidade EN 312-5 (2010)

Propriedade	Método de ensaio	Unidade	Requisito					
			Gama de espessura (nominal, mm)					
			> 6 a 13	> 13 a 20	> 20 a 25	> 25 a 32	> 32 a 40	> 40
opção 1 Resistência à tracção perpendicular às faces da placa após ensaio cíclico	EN 321	N/mm ²	0,25	0,22	0,20	0,17	0,15	0,12
Inchamento em espessura após ensaio cíclico	EN 321	%	11	11	10	10	9	9
opção 2 Resistência à tracção perpendicular às faces da placa após ensaio em água fervente	EN 1087-1	N/mm ²	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09

Nota: Os valores para a resistência à tracção perpendicular às faces da placa e o inchamento em espessura após tratamento de acordo com a opção 1 são caracterizados por um teor em água no material (antes e após o ensaio cíclico) correspondente a uma humidade relativa de 65% e uma temperatura de 20 °C.

Os valores para a resistência à tracção perpendicular às faces da placa após tratamento de acordo com a opção 2 são caracterizados por um teor em água no material (antes do ensaio em água fervente) correspondente a uma humidade relativa de 65% e uma temperatura de 20 °C.

A1.6 Requisitos para placas para fins estruturais especiais em ambiente seco (P6)

Os requisitos definidos na Tabela A1.7 referem-se a valores do percentil 5 (percentil 95 no caso do inchamento em espessura) com base nos valores médios das placas tomadas individualmente e calculados segundo a EN 326-1. No caso do inchamento em espessura, estes devem ser iguais ou inferiores aos valores da Tabela A1.6 e no caso de todas as outras propriedades, eles devem ser iguais ou superiores aos valores da Tabela A1.7.

Tabela A1.7 – Requisitos para as propriedades mecânicas e de inchamento especificadas EN 312-6 (2010)

Propriedade	Método de ensaio	Unidade	Requisitos					
			Gama de espessura (nominal, mm)					
			6 a 13	> 13 a 20	> 20 a 25	> 25 a 32	> 32 a 40	> 40
Resistência à flexão	EN 310	N/mm ²	20	18	16	15	14	12
Módulo de elasticidade em flexão	EN 310	N/mm ²	3150	3000	2550	2400	2200	2050
Resistência à tracção perpendicular às faces da placa	EN 319	N/mm ²	0,60	0,50	0,40	0,35	0,30	0,25
Inchamento em espessura 24 h	EN 317	%	15	14	14	14	13	13

Nota: Os valores para as propriedades de flexão e resistência à tracção perpendicular às faces da placa são caracterizados por um teor em água no material correspondente a uma humidade relativa de 65% e uma temperatura de 20 °C.

Os valores para o inchamento em espessura são caracterizados por um teor em água no material, antes do tratamento, correspondente a uma humidade relativa de 65% e uma temperatura de 20 °C.

Os valores da Tabela A1.7 para a resistência à flexão e módulo de elasticidade devem aplicar-se aos resultados do ensaio obtidos em qualquer das direcções do plano das placas.

A1.7 Requisitos para placas para fins estruturais especiais em ambiente húmido (P7)

Os requisitos definidos na Tabela A1.8 e A1.9 referem-se a valores do percentil 5 (percentil 95 no caso do inchamento em espessura) com base nos valores médios das placas tomadas individualmente e calculados segundo a EN 326-1. No caso do inchamento em espessura, estes devem ser iguais ou inferiores aos valores da Tabela A1.8 e A1.9 e no caso de todas as outras propriedades, eles devem ser iguais ou superiores aos valores da Tabela A1.8 e A1.9.

Tabela A1.8 – Requisitos para as propriedades mecânicas e de inchamento especificadas EN 312-7 (2010)

Propriedade	Método de ensaio	Unidade	Requisitos					
			Gama de espessura (nominal, mm)					
			6 a 13	> 13 a 20	> 20 a 25	> 25 a 32	> 32 a 40	> 40
Resistência à flexão	EN 310	N/mm ²	22	20	18,5	17	16	15
Módulo de elasticidade em flexão	EN 310	N/mm ²	3350	3100	2900	2800	2600	2400
Resistência à tracção perpendicular às faces da placa	EN 319	N/mm ²	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
Inchamento em espessura 24 h	EN 317	%	9	8	8	8	7	7

Nota: Os valores para as propriedades de flexão e resistência à tracção perpendicular às faces da placa são caracterizados por um teor em água no material correspondente a uma humidade relativa de 65% e uma temperatura de 20 °C.

Os valores para o inchamento em espessura são caracterizados por um teor em água no material, antes do tratamento, correspondente a uma humidade relativa de 65% e uma temperatura de 20 °C.

Os valores da Tabela A1.8 para a resistência à flexão e módulo de elasticidade devem aplicar-se aos resultados do ensaio obtidos em qualquer das direcções do plano das placas.

Tabela A1.9 – Requisitos para a resistência à humidade EN 312-7 (2010)

Propriedade	Método de ensaio	Unidade	Requisito					
			Gama de espessura (nominal, mm)					
			6 a 13	> 13 a 20	> 20 a 25	> 25 a 32	> 32 a 40	> 40
opção 1 Resistência à tracção perpendicular às faces da placa após ensaio cíclico	EN 321	N/mm ²	0,41	0,36	0,33	0,28	0,25	0,20
Inchamento em espessura após ensaio cíclico	EN 321	%	10	10	9	9	8	8
opção 2 Resistência à tracção perpendicular às faces da placa após ensaio em água fervente	EN 1087-1	N/mm ²	0,25	0,23	0,20	0,18	0,17	0,15

Nota: Os valores para a resistência à tracção perpendicular às faces da placa e o inchamento em espessura após tratamento de acordo com a opção 1 são caracterizados por um teor em água no material (antes e após o ensaio cíclico) correspondente a uma humidade relativa de 65% e uma temperatura de 20 °C.

Os valores para a resistência à tracção perpendicular às faces da placa após tratamento de acordo com a opção 2 são caracterizados por um teor em água no material (antes do ensaio em água fervente) correspondente a uma humidade relativa de 65% e uma temperatura de 20 °C.

ANEXO II

Resultados das médias referentes ao Capítulo IV - Ensaios preliminares P2

Tabela A2.1 – Resumo dos resultados para as experiências P2 do Capítulo IV

E_s (J/cm^3)	ffz (mm)	F_c (N)	A (m/min)	F_c (N)	V_c (m/s)	F_c (N)
437.500	0.0065	8.4	1	8.4	50	8.4
375.000	0.0081	9	1	9	40	9
312.500	0.0109	10	1	10	30	10
220.486	0.0195	12.7	3	12.7	50	12.7
194.444	0.0244	14	3	14	40	14
167.708	0.0326	16.1	3	16.1	30	16.1
167.708	0.0326	16.1	5	16.1	50	16.1
150.833	0.0407	18.1	5	18.1	40	18.1
131.875	0.0543	21.1	5	21.1	30	21.1

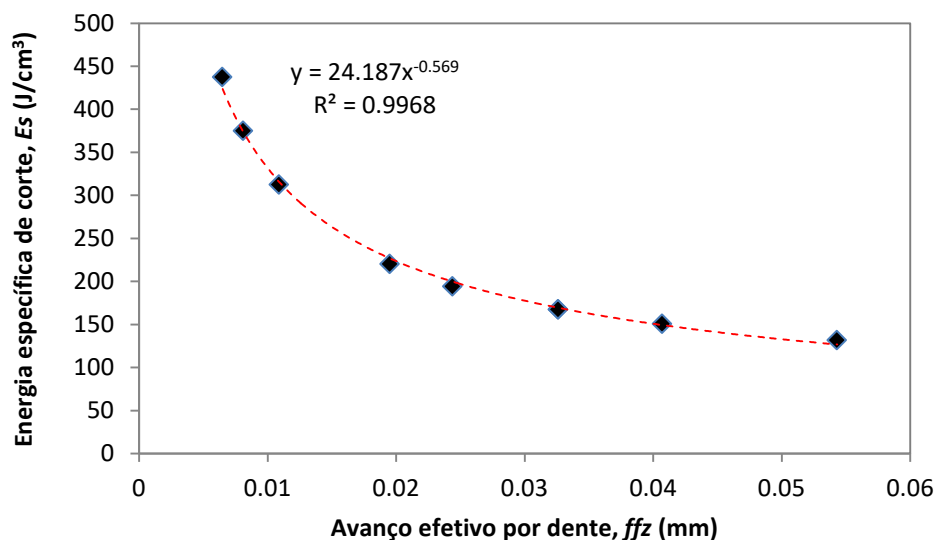


Figura A2.1 – Influência de ffz (mm) na E_s (J/cm^3) nos ensaios P2 do Capítulo IV (resultado das médias)

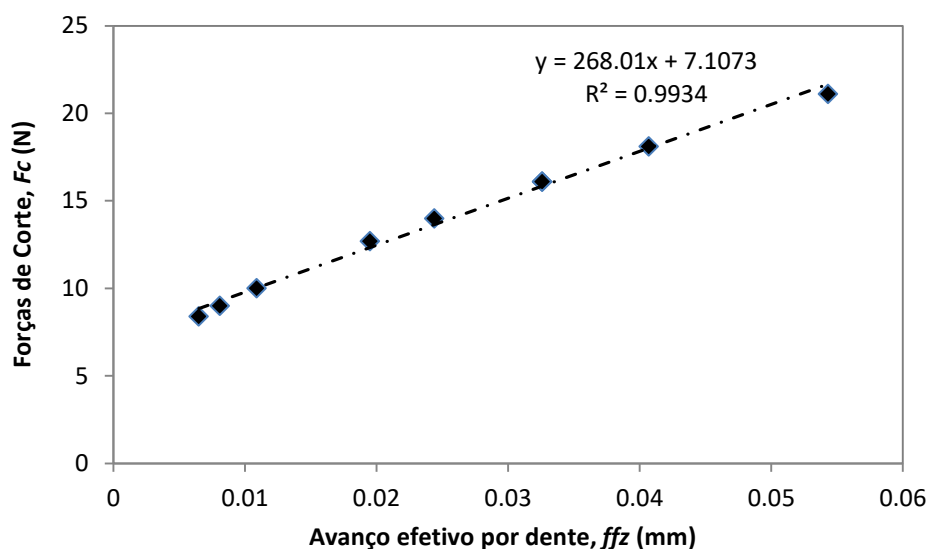


Figura A2.2 – Relação entre ffz (mm) e F_c (N) nos ensaios P2 do Capítulo IV (resultado das médias)

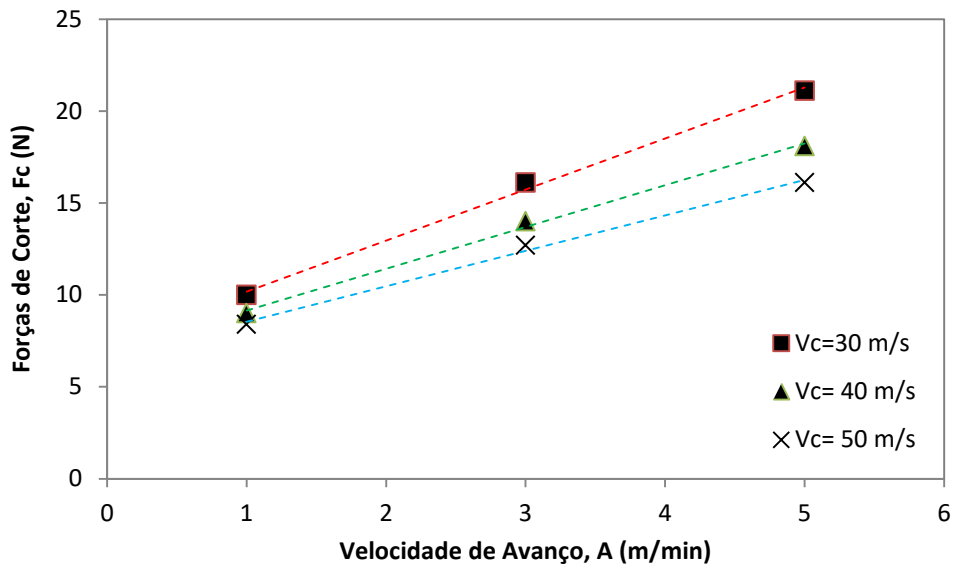


Figura A2.3 – Relação entre A (m/min) e F_c (N) nos ensaios P2 do Capítulo IV (resultado das médias)

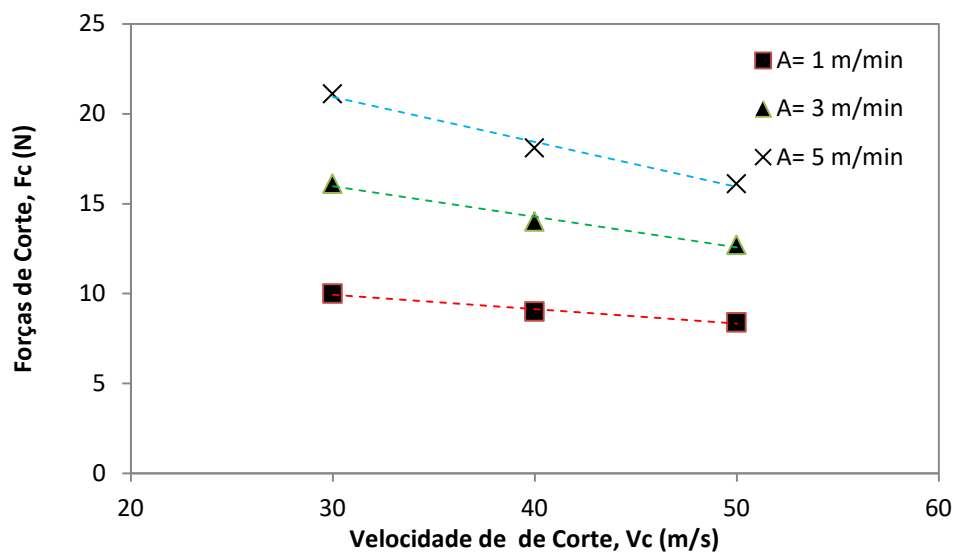


Figura A2.4 – Relação entre V_c (m/s) e F_c (N) nos ensaios P2 do Capítulo IV (resultado das médias)

ANEXO III

Características das resinas UF, condições de prensagem e esquema de corte dos provetes

Tabela A3.1 - Características da resina ureia-formaldeído

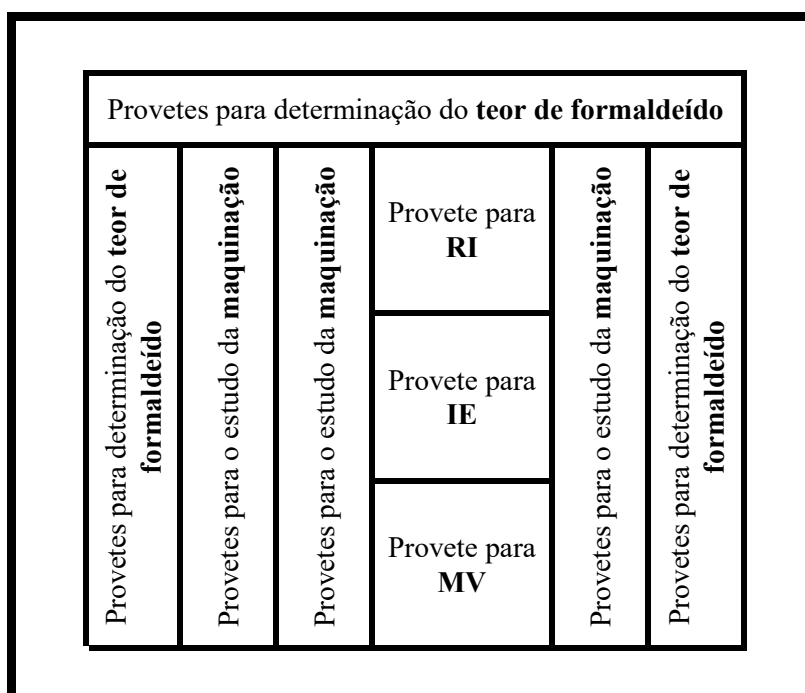
Propriedade	Base	
Formaldeído/ureia	Razão molar	1.08
Viscosidade Brookfield (20°C)	MPa.s	180
Teor de sólidos	%	63.8
pH (20°C)	-	8.6
Reactividade (100 °C)	s	52

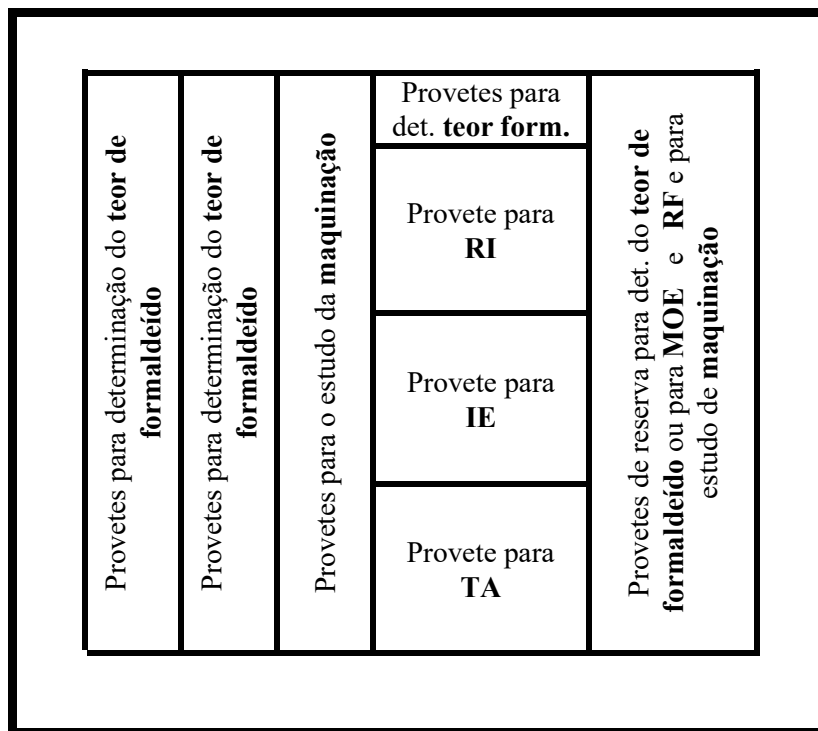
Tabela A3.2 – Produção de Aglomerados de Partículas com diferentes *mix*
Matriz das experiências do ciclo de prensagem

Experiência	Tempo de Prensagem (s)	Velocidade de Prensagem (m/s)	Temperatura dos pratos (°C)	Factor X	Mix da CI (% Reciclados)
1	90	0.356	195	6.56	60
2	90	0.356	220	7.25	80
3	90	0.356	245	6.90	100
4	90	0.356	195	6.90	40
5	90	0.356	220	6.56	50
6	90	0.356	245	7.25	30
7	90	0.356	195	7.25	50
8	90	0.356	220	6.90	30
9	90	0.356	245	6.56	40
10	120	0.268	195	6.90	100
11	120	0.268	220	6.56	60
12	120	0.268	245	7.25	80
13	120	0.268	195	7.25	30
14	120	0.268	220	6.90	40
15	120	0.268	245	6.56	50
16	120	0.268	195	6.56	40
17	120	0.268	220	7.25	50
18	120	0.268	245	6.90	30

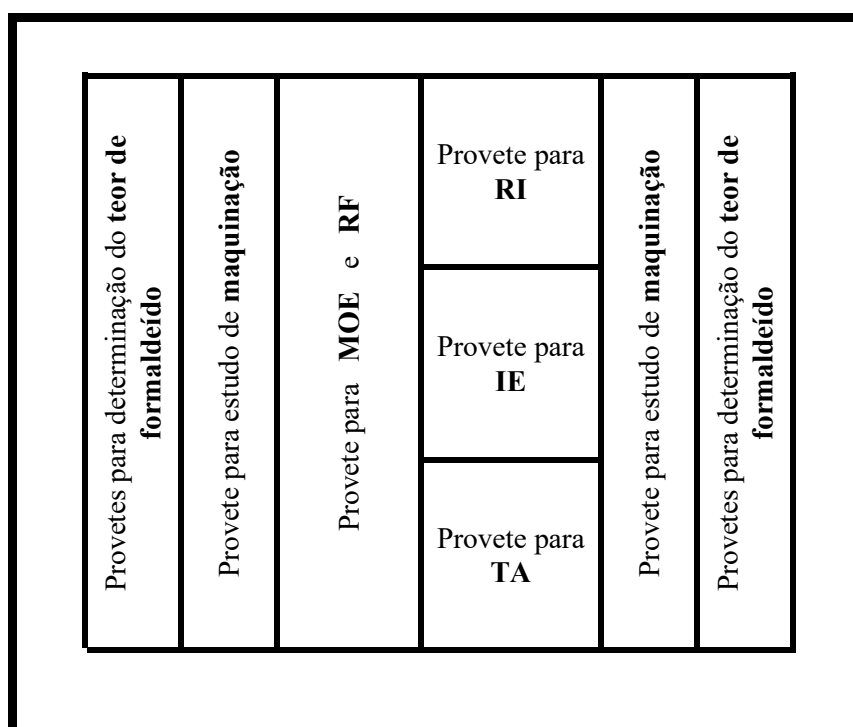
Tabela A3.3 – Resumo das condições operatórias de prensagem das diversas experiências

Série	Formação	Condições operatórias	Programa de prensagem	Placas produzidas
<i>mix</i>	Formas de alumínio 22x22x8 cm 3 camadas	Temperatura dos pratos: 195, 220, 245 °C Tempo de ciclo: 90, 120 s	SI-03.vi	371-380; 399-403; 410-419; 432-441; 448-452; 459-463; 479-488; 494-498; 512-516; 522-526; 527-531
captadores		Temperatura dos pratos: 195 °C (constante) Tempo de ciclo: 120 s	SI-03.vi	E0
eucalipto		Temperatura dos pratos: 220 °C (constante) Tempo de ciclo: 90, 120 s	SI-03.vi	826-848 864-866
choupo		Temperatura dos pratos: 220 °C (constante) Tempo de ciclo: 150 s	SI-03.vi	950-969

**Figura A3.1** – Esquema de corte dos provetes em séries de placas com dimensões de 220 x 220 mm para a série de experiências com diferentes *mix* de madeira



a)



b)

Figura A3.2: a) - Esquema de corte dos provetes para as experiências com os captadores de formaldeído; b) espécies alternativas

ANEXO IV

Otimização dos modelos para PB (ST, MR e HG)

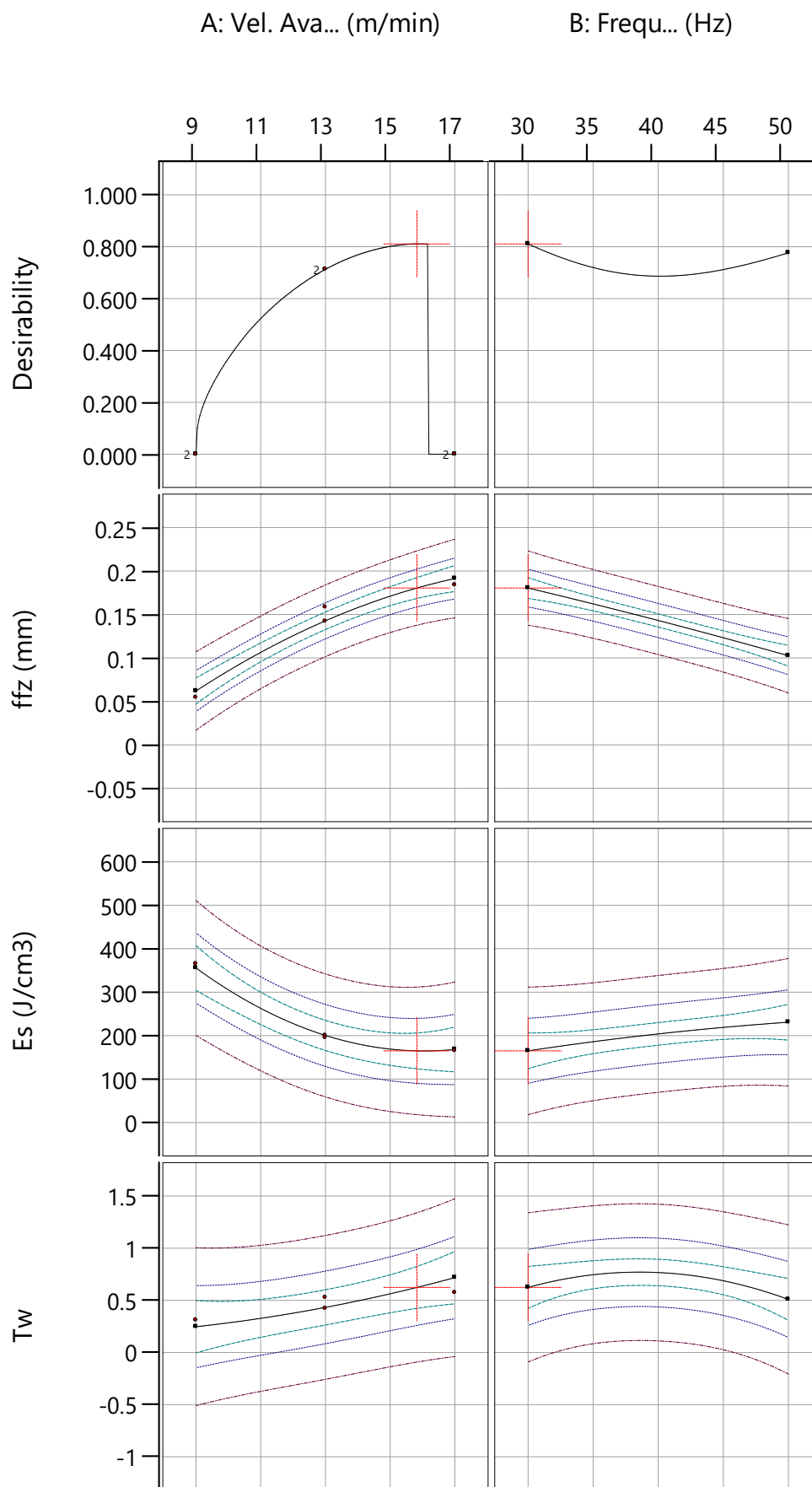


Figura A4.1 – Interação fatores/parâmetros de resposta
Agglomerado de Partículas ST

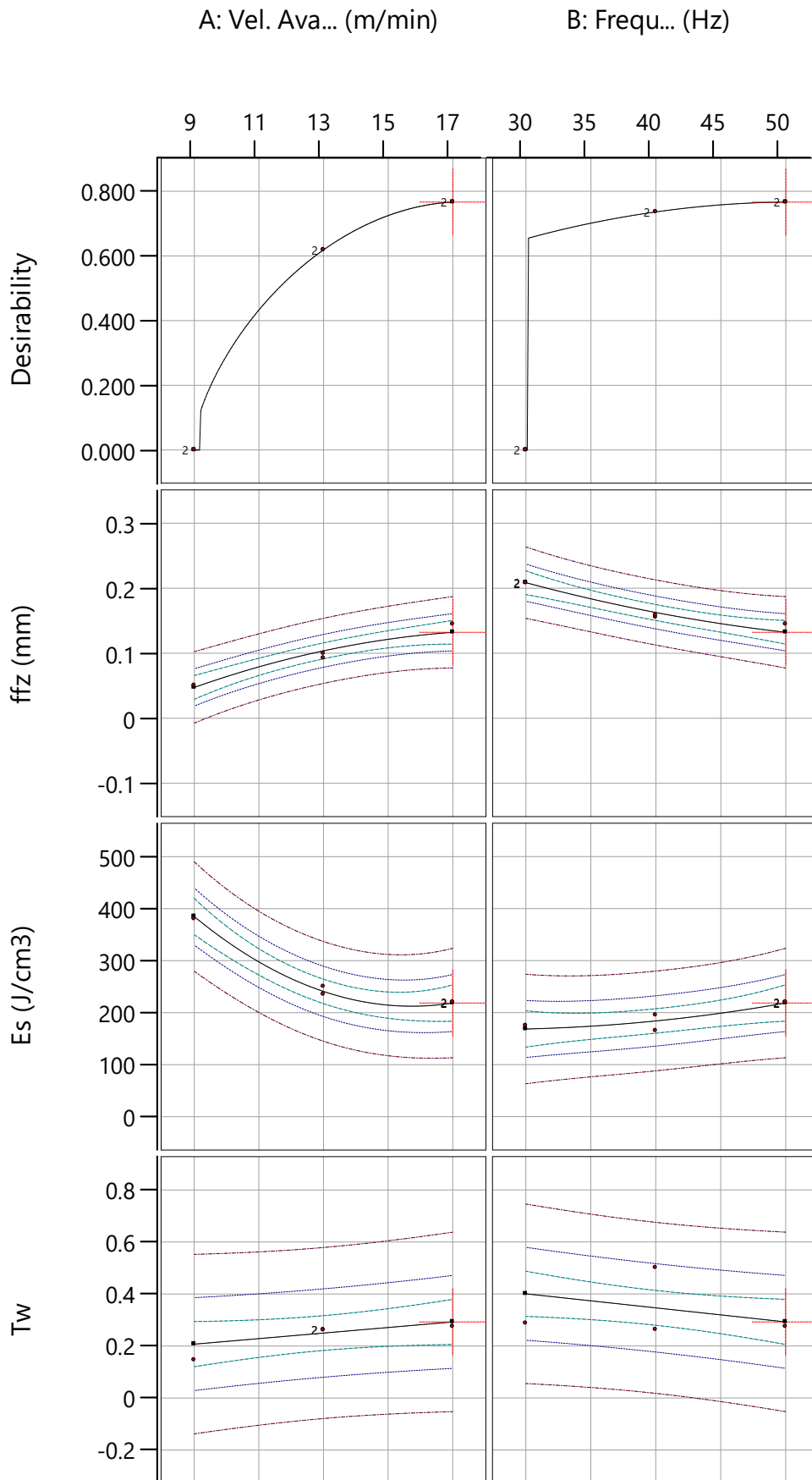


Figura A4.2 – Interação fatores/parâmetros de resposta
Agglomerado de Partículas MR

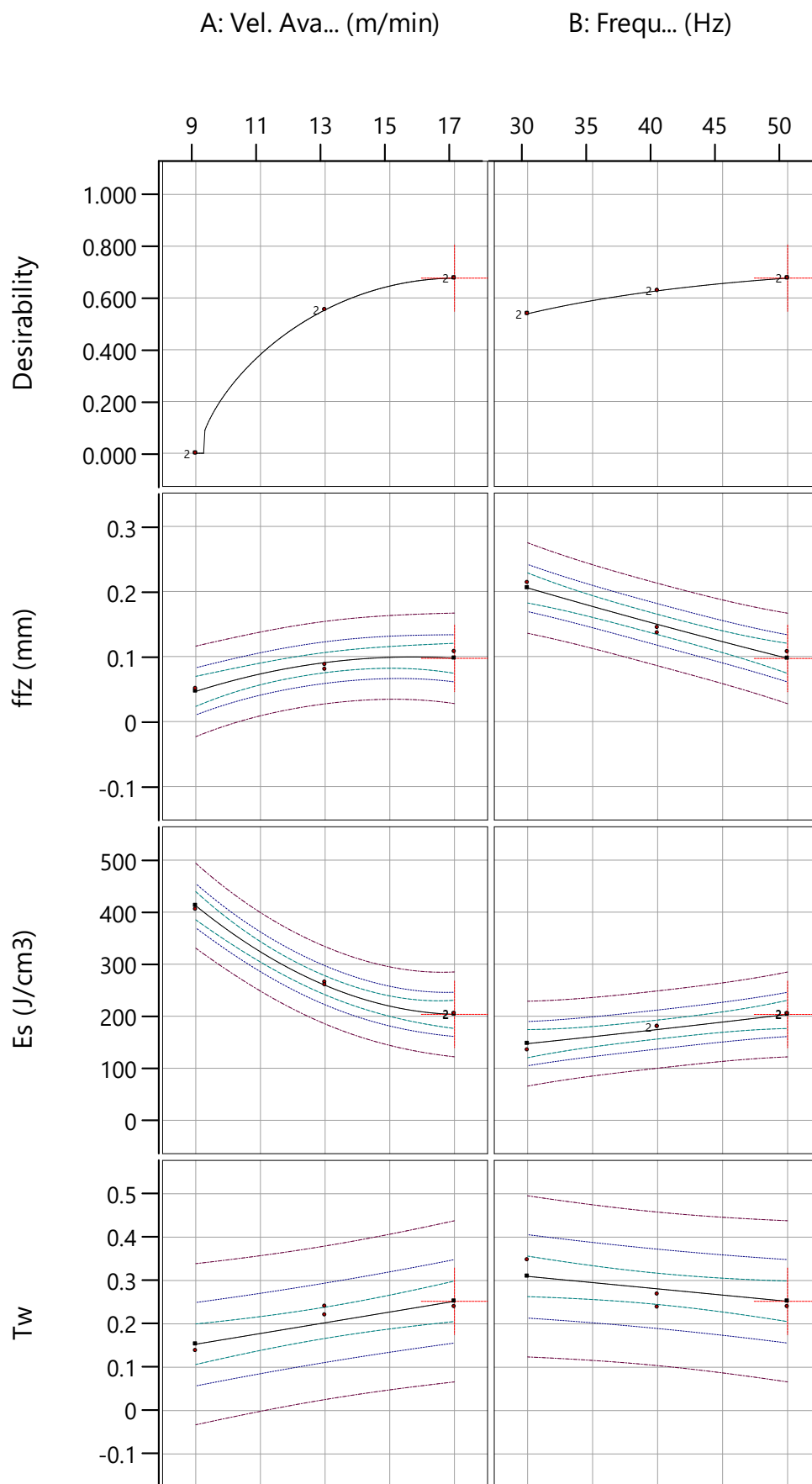


Figura A4.3 – Interação fatores/parâmetros de resposta
Agglomerado de Partículas HG

Tabela A4.1 – Tabela de coeficientes (confirmação)
Agglomerado de Partículas ST

	Interseção	A	B	AB	A²	B²
<i>ffz</i>	0.117898	0.0469942	-0.0264248	-0.0177041	-0.0160427	-0.00162297
Valor p		< 0.0001	< 0.0001	0.0013	0.0021	0.6940
<i>Es</i>	231.579	-82.5	25	11.25	61.4474	-6.05263
Valor p		< 0.0001	0.0297	0.4439	0.0010	0.6691
<i>Tw</i>	0.617189	0.176088	-0.0156625	-0.0593	0.0501487	-0.200101
Valor p		0.0041	0.7544	0.4089	0.4713	0.0126
		Valor p: p < 0.05 0.05 ≤ p < 0.1 p ≥ 0.1				

Tabela A4.2 – Tabela de coeficientes (confirmação)
Agglomerado de Partículas MR

	Interseção	A	B	AB	A²	B²
<i>ffz</i>	0.121984	0.054547	-0.0260101	-0.0121672	-0.0138651	0.00774446
Valor p		< 0.0001	< 0.0001	0.0336	0.0160	0.1408
<i>Es</i>	211.316	-88.125	20	5	60.7895	9.53947
Valor p		< 0.0001	0.0133	0.6129	< 0.0001	0.3293
<i>Tw</i>	0.303925	0.0426762	-0.0540513			
Valor p		0.1196	0.0544			
		Valor p: p < 0.05 0.05 ≤ p < 0.1 p ≥ 0.1				

Tabela A4.3 – Tabela de coeficientes (confirmação)
Agglomerado de Partículas HG

	Interseção	A	B	AB	A²	B²
<i>ffz</i>	0.122022	0.0462194	-0.0333195	-0.020807	-0.0188529	0.00196089
Valor p		< 0.0001	< 0.0001	0.0074	0.0110	0.7569
<i>Es</i>	212.895	-86.875	45.625	-17.5	48.4868	0.986842
Valor p		< 0.0001	< 0.0001	0.0384	< 0.0001	0.8941
<i>Tw</i>	0.231296	0.04946	-0.0287763			
Valor p		0.0031	0.0568			
		Valor p: p < 0.05 0.05 ≤ p < 0.1 p ≥ 0.1				