



M 2020



OTIMIZAÇÃO E *SCALE-UP* DE SOLUÇÕES PARA VALORIZAÇÃO DE DESPERDÍCIOS INDUSTRIAIS

CAROLINA DO NASCIMENTO BORGES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA

À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA QUÍMICA

Mestrado Integrado em Engenharia Química

Otimização e scale-up de soluções para valorização de desperdícios industriais

Dissertação de Mestrado

de

Carolina do Nascimento Borges

Desenvolvida no âmbito da unidade curricular de Dissertação

realizada em

SURFORMA®

SURFORMA®
by Sonae Indústria

Orientador na FEUP: Professora Doutora Luísa Hora de Carvalho

Professor Doutor Fernão Domingos de Magalhães

Coordenador na (SURFORMA): Engenheira Ana Vinhas



março de 2021

Agradecimentos

Assim dou por terminada mais uma etapa na minha vida. Sem dúvida que a presença de certas pessoas foi impreterível e é nesse sentido que aqui deixo o meu sincero e verdadeiro, obrigada.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à SURFORMA por me ter concebido a oportunidade de estar perante um desafio inovador e por ter permitido alicerçar o meu percurso profissional vindouro. À minha orientadora empresarial, Eng^a Ana Vinhas, um obrigada por todo o apoio prestado, confiança e disponibilidade.

O meu profundo obrigada aos meus orientadores de âmbito académico: à Prof^a Luísa Carvalho pela ajuda e disponibilidade incansáveis e toda a sabedoria que me transmitiu e ao Prof. Fernão Magalhães por todas as sugestões que me deu, sempre no sentido de aprimorar o trabalho desenvolvido.

Da mesma forma, agradeço ao Prof. Jorge Martins todo o acompanhamento incansável, todas as ideias trocadas, paciência constante e vontade de me ajudar. A ambos, Prof^a Luísa e Prof. Jorge, o meu muito obrigado por terem sido a minha “inspiração” ao longo deste caminho e, não menos importante, pelo transporte que me ofereceram até ao IPV, sempre com boa disposição. Foram sem dúvida incansáveis.

Ao Designer Nuno Ferreira, à Eng^a Margarida Almeida e ao Eng. João Pereira do IPV, não poderia deixar de transmitir o meu agradecimento por toda a ajuda prestada, o apoio sempre que necessário e os momentos de companheirismo que tornaram os meus dias mais animados.

À Claudinha, a minha maior surpresa neste ano difícil, o meu obrigada de coração por ter acreditado sempre em mim e principalmente pelos jantares, os risos sinceros e as aventuras partilhadas.

À minha companheira diária nesta jornada, Bia, pelos momentos de *breakdown* juntas, pelo riso, o choro, por me fazer ver a força que tenho nos momentos mais complicados e por me ter permitido tê-la sempre ao meu lado. Sei que sem ti, não teria sido tão fácil.

À Martinha, o meu sincero obrigada, por nos últimos 6 anos me ter permitido vivenciar as melhores histórias, os melhores momentos, que levarei comigo para a vida inteira. Pelo companheirismo, entreajuda e acima de tudo, por permitir que eu tenha ao meu lado, todos os dias, uma amiga tão especial.

À Jequinhas, a minha confidente. O meu obrigada pela pessoa que és, pela inspiração que me transmites, por todas as horas a fio de conversa, por seres tão doida e, principalmente, por acompanhares o meu dia-a-dia e permitires que te leve comigo para a vida toda.

À Sara, um dos meus maiores pilares. O meu sincero obrigada por 13 anos de amizade única e verdadeira. Por sermos tão parecidas, por termos crescido juntas e pela força que me transmites ao simplesmente seres quem és.

À Inês, ao Dinis e à Mariana pelas horas de estudo infundáveis e principalmente por me fazerem rir à toa nos momentos mais apertados. Guardo-vos sempre comigo.

Ao Medina, que sempre me soube ouvir e aconselhar, que teve uma paciência infundável para comigo e nunca desistiu de me demonstrar que consigo ser muito mais do que aparento, o meu sincero obrigada. Palavras não chegariam.

Ao Buno e ao Freixinho, obrigada por todos os momentos únicos passados ao vosso lado, por terem marcado o meu percurso tanto académico, quanto pessoal, pelas risadas contagiantes e por serem um pilar nas horas de maior aperto.

Às pessoas mais importantes da minha vida, a quem devo tudo o que sou, o meu maior obrigada: à minha mãe, ao meu pai, ao meu irmão e à minha avó Teresa. À minha mãe por ser a minha maior inspiração, a minha mentora de vida e por não se importar de passar em claro noites a fio, apenas para estar ao pé de mim. Ao meu irmão por ser o meu orgulho, o meu melhor amigo e a pessoa com quem me dá mais gosto partilhar a vida. Ao meu pai, pelo orgulho desmedido que sei que tem em mim e toda a confiança depositada. À minha avó Teresa, que apesar de já não estar ao pé de mim, transmite-me a sua força todos os dias e zela por mim como só ela sabe e sempre fez tão bem. Obrigada por viverem os meus sonhos como se fossem vossos e por me terem feito chegar até aqui. Para vocês, todo o amor do mundo.

A Prof.^a Luísa H. Carvalho e o Prof. Fernão Magalhães, orientadores desta dissertação, são membros integrados do LEPABE - Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente Biotecnologia e Energia, financiado por: Financiamento Base - UIDB/00511/2020 da Unidade de Investigação - Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia - LEPABE - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

A linha piloto utilizada no *scale-up* do produto desta dissertação faz parte do projeto Victor - Desenvolvimento de compactos reciclados (POCI-01-0247-FEDER-045250).

Resumo

A SURFORMA®, integrada no Grupo Sonae Indústria, surgiu com o intuito de estabelecer uma identidade própria e evidenciar a posição de liderança nas indústrias de mobiliário, construção e decoração. Dada a visão inovadora da marca e constante compromisso de versatilidade na oferta, a missão da SURFORMA consiste na constante procura de melhoria, acrescentando valor aos seus projetos, culminando numa qualidade de excelência. A SURFORMA potencializa soluções diferenciadoras, conjugando a vanguarda ao design singular da sua oferta. Neste sentido, e devido à crescente preocupação em torno da consciencialização ambiental e economia circular, surge a oportunidade de criação de um novo produto, incorporando no seu interior os resíduos do processo produtivo da empresa. Este novo produto consiste numa placa de resíduos aglomerados por prensagem a quente, após destroçamento e peneiração dos mesmos. O sistema adesivo é constituído por uma resina de poliuretano e água.

Foram efetuados diversos estudos com o intuito de otimizar as características do produto, nomeadamente a influência de diferentes distribuições de granulometria, a redução do teor de formaldeído e a diminuição de custos associados a matérias primas e parâmetros do processo. De modo a avaliar o seu desempenho, as placas foram sempre submetidas a ensaios diversificados, entre os quais a resistência à tração perpendicular ao plano, imersão em água, água fervente e determinação do teor de formaldeído.

Adicionalmente, foram ainda desenvolvidas duas vertentes do produto, através da implementação de papel *overlay* nas superfícies da placa e também da incorporação de resíduos de menor granulometria, na constituição da mesma.

Conclui-se que o melhor resultado diz respeito a uma placa com uma massa volúmica de $(816 \pm 4,95) \text{ kg/m}^3$, prensada a 160 °C durante 30 minutos, com 15 % de resina PU (massa de sólidos de resina por massa de resíduos secos) e 30 % de água em relação ao teor de sólidos da resina. O produto final apresenta, então, o menor custo associado possível, cumpre com os requisitos de aglomerados das classes E1 e E2 relativamente ao teor de formaldeído e com a normalização em vigor para placas de aglomerado de partículas de madeira para fins não estruturais, utilizadas em ambiente húmido (norma EN 312 - Tipo P3). A partir desta fase, o produto passou a denominar-se ECODECOR e foi possível iniciar a sua produção à escala piloto. Os resultados de caracterização destas placas permitiram concluir que o valor de IB aumentou e que, embora no geral estas apresentem um bom desempenho, o produto não obedece à norma referente à resistência à flexão nem à classe de aglomerados E1 para o método de análise de gás, referente às emissões de formaldeído.

Palavras Chave (Tema):

resíduos, economia circular, aglomerados de partículas, poliuretano, formaldeído

Abstract

SURFORMA®, part of the Sonae Indústria Group, emerged with the aim of establishing its own identity and highlighting its leadership position in furniture, construction and decoration industries. Given the brand's innovative vision and constant commitment of versatility in the offer, SURFORMA's mission is to constantly seek improvement, adding value to its projects, culminating in a quality of excellence. SURFORMA potentializes differentiating solutions, combining vanguard with unique design in its offer. In this way, and due to the growing concern around environmental awareness and circular economy, arises the opportunity to create a new product, incorporating the company's production process residues, inside. This new product consists of a board of agglomerated residues by hot-pressing, after its milling and sieving. The adhesive system consists of a polyurethane resin and water mixture.

Several studies were carried out in order to optimize the product's characteristics, namely the influence of different particle size distributions, the reduction of formaldehyde content and the reduction of costs associated with raw materials and process parameters. In order to assess their performance, the produced boards were subjected to diversified tests, including tensile strength perpendicular to the plane of the board, immersion in water, boiling and determination of formaldehyde content.

In addition, two slightly different products were also developed, either by the implementation of overlay paper on the board surfaces, as well as by the incorporation of residues of smaller granulometry, in its constitution.

It is concluded that the best achieved result concerns a board with a density of $(816 \pm 4.95) \text{ kg/m}^3$, pressed at 160 °C for 30 minutes, with 15 % PU resin (resin solids mass per dry residues mass) and 30 % water in relation to the resin solids content. The final product, therefore, has the lowest possible associated cost, complies with the emission classes E1 and E2 regarding the formaldehyde content and with the standardization in force for particleboard for non-structural purposes used in a humid environment (standard EN 312 - Type P3). From this stage on, the product became known as ECODECOR and it was possible to start its production on a pilot scale. The characterization results of these boards allowed to conclude that the IB value increased and that, although in general they present a good performance, the product does not comply with the standard concerning the flexural strength neither the E1 agglomerates class concerning the gas analysis method, regarding formaldehyde emissions.

Keywords: residues, circular economy, particleboard, poliurethane, formaldehyde

Declaração

Declara, sob compromisso de honra, que este trabalho é original e que todas as contribuições não originais foram devidamente referenciadas com identificação da fonte.

Assinar e datar

Carolina Borges

Carolina do Nascimento Borges

9 de março de 2021

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento e Apresentação do Projeto	1
1.2	Contributos do(a) autor(a) para o Trabalho.....	3
1.3	Organização da Dissertação	4
2	Contexto e Estado da Arte	5
2.1	Termolaminados de alta pressão (HPL)	6
2.2	Aglomerados de partículas	7
2.3	Processo de produção de aglomerados de partículas	8
2.4	Uso de madeira recuperada para produção de aglomerados	9
2.5	Poliuretano (PU).....	9
2.6	Resinas fenol formaldeído e melamina formaldeído	11
2.6.1	Resinas fenol formaldeído	11
2.6.2	Resina melamina formaldeído.....	12
2.7	Formaldeído.....	12
2.8	Aproveitamento de resíduos na indústria de HPL	16
3	Materiais e Métodos	18
3.1	Materiais utilizados	18
3.2	Procedimentos.....	18
3.2.1	Preparação da matéria prima	19
3.2.2	Encolagem	20
3.2.3	Formação de cargas	21
3.2.4	Prensagem	22
3.2.5	Acabamento	22
3.3	Caracterização físico-mecânica do produto	23
3.3.1	Comportamento em água em ebulição	23
3.3.2	Determinação do inchamento em espessura	24
3.3.3	Determinação do teor de água.....	24

3.3.4	Determinação da massa volúmica	25
3.3.5	Resistência à tração perpendicular ao plano	25
3.3.6	Método do Perforador	26
3.3.7	Método da análise de gás	27
3.3.8	Resistência à flexão	28
4	Resultados e Discussão.....	29
4.1	Otimização das condições operatórias.....	29
4.2	Influência da granulometria	31
4.3	Redução do teor de formaldeído.....	32
4.4	Diminuição de custos associados.....	35
4.4.1	Tempo de prensagem.....	35
4.4.2	Teor de resina	37
4.4.3	Massa Volúmica.....	39
4.5	Estudos adicionais	40
4.5.1	Papel <i>overlay</i>	40
4.5.2	Implementação de resíduos de granulometria inferior	40
4.6	<i>Scale-up</i>	41
5	Conclusões	44
6	Avaliação do trabalho realizado.....	46
6.1	Objetivos Realizados	46
6.2	Apreciação Final	46
7	Referências	47
	Anexo A - Ficha Técnica Flexpur 805.....	51
	Apêndice B - Exemplos de cálculo referentes às quantidades necessárias, de cada composto, na produção dos painéis.	53
	Apêndice C - Resultados obtidos nos ensaios de caracterização do estudo de avaliação da influência de granulometria.	54
	Apêndice D - Distribuição obtida dos resíduos úteis na etapa de preparação da matéria prima.	55

Apêndice E - Resultados obtidos nos ensaios de caracterização do estudo de redução do formaldeído.	56
Anexo F - Limites atualmente em vigor para as emissões de formaldeído.	57
Apêndice G - Resultados obtidos nos ensaios de caracterização do estudo da influência da diminuição do tempo de prensagem.	58
Apêndice H - Resultados obtidos nos ensaios de caracterização do estudo da influência da diminuição do teor de resina.	59
Apêndice I - Resultados obtidos nos ensaios de caracterização da placa proveniente do <i>scale-up</i>	60

Lista de Figuras

<i>Figura 1.1 - Aplicações de compactos e termolaminados em coleções lançadas pela SURFORMA [2].</i>	<i>2</i>
<i>Figura 2.1 - Modelo de economia circular que o presente trabalho permite implementar [7,8].</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2.2 - Constituição de um termolaminado de alta pressão (HPL) [4].</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2.3 - Aglomerado de partículas [10].</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2.4 - Ilustração de poliisocianatos: 2,6-TDI e 4,4'-MDI [14].</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2.5 - Estrutura molecular do PETP (do Inglês, Polyether) e do PEP (do Inglês, Polyester) [13].</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2.6 - Processo comum de síntese de um poliuretano (PU) [13].</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3.1 - Processo de produção dos painéis de resíduos.</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3.2 - a) Moinho de corte SM300 da Restsch; b) Agitador de peneiros AS 200 control da Retsch; c) Granulometria 1 e 2 mm.</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3.3 - Processo de encolagem.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 3.4 - Preparação do painel antes da sua introdução na prensa.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 3.5 - Processo de formação de cargas.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3. 6 - a) Carga formada; b) Prensagem; c) Placa após saída da prensa.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3. 7 - Placa final.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3. 8 - Instrumento auxiliar na medição de espessura.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3. 9 - Método do perforador.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 4.1 - Distribuição de resíduos, por granulometria, obtida para uma grelha constante de 10 mm.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 4.2 . Distribuição de resíduos, por granulometria, obtida para uma grelha constante de 10 mm.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 4. 3 - Amostras teor de formaldeído.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4. 4 - Provete fratura pela linha de cola.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4. 5 - Teor de formaldeído das placas e comparação com os limites atualmente em vigor das classes de aglomerados E1 e E2.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4. 6 - Resultados de IB em função do tempo de prensagem das placas.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4. 7' - Resultados do teor de formaldeído em função do tempo de prensagem das placas.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4. 8 - Placa CB-15.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4. 9 - Resultados de IB em função do teor de resina das placas.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4. 10 - Resultados do teor de formaldeído em função do tempo de prensagem das placas.</i>	<i>39</i>

<i>Figura 4. 11 - Aspetto das placas CB-16 e CB-17.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4. 12 - Aspetto das placas com papel overlay.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4. 13 - Aspetto visual da placa CB-18.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4. 14 - Estágios de produção das placas na fase de desenvolvimento industrial.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 4. 15 - Aspetto das placas desenvolvidas industrialmente.</i>	<i>43</i>

Lista de Tabelas

<i>Tabela 3. 1 - Escala de avaliação.</i>	<i>24</i>
<i>Tabela 4.1 - Distribuições de granulometria das placas submetidas a teste.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 4.2 - Requisitos AP-P3 e propriedades das placas submetidas a teste de influência da granulometria.</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 4.3 - Condições das placas produzidas no sentido de avaliar o aumento da temperatura de prensagem na redução do formaldeído.</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 4.4 - Condições das restantes placas produzidas no estudo de redução do teor de formaldeído.</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 4.5 - Propriedades das placas resultantes do estudo de redução do teor de formaldeído.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 4.6 - Condições das placas produzidas no sentido de avaliar a diminuição do tempo de prensagem na redução de custos do produto final.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 4.7 - Condições das placas produzidas no sentido de avaliar a diminuição do teor de resina na redução de custos do produto final.</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 4.8 - Requisitos e propriedades das placas resultantes do estudo de redução do teor de resina.</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 4.9 - Condições das placas produzidas no sentido de avaliar a diminuição da massa volúmica na redução de custos do produto final.</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 4.10 - Condições operatórias da placa CB-18.</i>	<i>41</i>
<i>Tabela 4.11 - Condições operatórias das placas produzidas na etapa de desenvolvimento industrial. .</i>	<i>41</i>
<i>Tabela 4.12 - Resultados referentes à norma EN 312 para placas para fins não estruturais utilizadas em ambiente húmido.</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 4.13 . Resultados referentes ao teor e emissão de formaldeído.</i>	<i>43</i>
<i>Tabela C. 1 - Resultados obtidos no ensaio de água em ebulição referente ao estudo de avaliação da influência da granulometria.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela C. 2 - Resultados obtidos nos ensaios de IB, MV, IE e TA referente ao estudo de avaliação da influência da granulometria.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela D. 1 - Distribuição obtida dos resíduos úteis na etapa de preparação da matéria prima.</i>	<i>55</i>
<i>Tabela E. 1 - Resultados obtidos no ensaio de água em ebulição referente ao estudo de redução do formaldeído.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabela E. 2 - Resultados obtidos nos ensaios de IB, MV, IE, TA e TF referente ao estudo de avaliação da influência da granulometria referentes ao estudo de redução do formaldeído.</i>	<i>56</i>

<i>Tabela F. 1 - Valores limite de emissão de formaldeído e teor de formaldeído, consoante o método de ensaio aplicado.</i>	<i>57</i>
<i>Tabela G. 1 - Resultados obtidos no ensaio de água em ebulição referente ao estudo de diminuição do tempo de prensagem.</i>	<i>58</i>
<i>Tabela G. 2 - Resultados obtidos nos ensaios de IB, MV, IE, TA e TF referente ao estudo da diminuição do tempo de prensagem.</i>	<i>58</i>
<i>Tabela H. 1 - Resultados obtidos no ensaio de água em ebulição referente ao estudo de diminuição do teor de resina.</i>	<i>59</i>
<i>Tabela H. 2 - Resultados obtidos nos ensaios de IB, MV, IE, TA e TF referente ao estudo da diminuição do teor de resina.</i>	<i>59</i>
<i>Tabela I. 1 - Resultados obtidos no ensaio de água em ebulição referente ao scale-up do produto. ...</i>	<i>60</i>
<i>Tabela I. 2 - Resultados obtidos nos ensaios de MV e TA referente ao scale-up do produto.</i>	<i>60</i>

Notação e Glossário

A_B	Absorvância de uma solução com água destilada	nm
A_S	Absorvância da solução de extração analisada	nm
a	Comprimento do provete	mm
b	Largura do provete	mm
F	Área total das superfícies de emissão (não seladas)	m ²
$F_{máx}$	Carga de rotura	N
f	Declive da curva de calibração	mg/ mL
H	Teor de água	%
IB	Resistência à tração perpendicular ao plano	N·mm ⁻²
IE	Inchamento em espessura	%
M	Variação em massa	%
m	Massa do provete	g
m_a	Massa inicial do provete	g
m_b	Massa final do provete	g
m_f	Massa do provete após imersão	g
m_i	Massa do provete antes da imersão	g
MV	Massa volúmica	kg/ m ³
RF	Resistência à flexão	N·mm ⁻²
V	Volume do balão volumétrico	mL

Letras gregas

ε	Espessura do provete	mm
ε_i	Espessura média do provete, antes da imersão em água	mm
ε_f	Espessura média do provete, após a imersão em água	mm

Lista de Siglas

AP	Placa de aglomerados de partículas
ATCM	<i>Airbone Toxic Control Measure</i>
CAGR	<i>Compound Annual Growth Rate</i>
CARB	<i>Californian Air Resource Board</i>
CLP	<i>Classification, Labelling and Packaging of substances and mixture regulation</i>
ECHA	<i>European Chemicals Agency</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
GHS	<i>Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals</i>
HDI	1,6-hexametileno diisocianato
HPL	<i>High-pressure laminates</i>
HUD	<i>United States Department of Housing and Urban Development</i>
IARC	<i>International Agency for Research on Cancer</i>
IPV	<i>Instituto Politécnico de Viseu</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>
LVL	<i>Laminated Veneer Lumber</i>
MDI	<i>Diisocianato de metileno 4,4' - difenileno</i>
MDF	Aglomerado de fibras de madeira de média densidade, obtido por via seca
MF	Melamina-formaldeído
OELs	<i>Occupational Exposure Limits</i>
OSB	Painéis de aglomerado de partículas longas e orientadas
PEP	Polióis de Poliéster

PETP	Polióis de Poliéter
PF	Fenol-formaldeído
PU	Poliuretano
PW	Plywood
REACH	<i>Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals</i>
rpm	Rotações por minuto
R&D	<i>Research and Development</i>
SIR	Sonae Indústria de Revestimentos, S.A.
SONAE	Sociedade Nacional de Estratificados, SARL
TDI	Diisocianato de tolueno
TSCA	<i>Toxic Substances Control Act</i>

1 Introdução

1.1 Enquadramento e Apresentação do Projeto

O presente trabalho, desenvolvido no âmbito da Dissertação de Mestrado, procura otimizar certos aspetos referentes à valorização de resíduos industriais provenientes do processo produtivo da empresa SURFORMA. As atuais tendências de crescimento da procura e consequente pressão nos recursos naturais, têm vindo a sublinhar a necessidade da sociedade atual de avançar para um paradigma mais sustentável. É neste sentido que a SURFORMA, uma das principais líderes a nível mundial na produção de derivados de madeira, visa proporcionar os melhores produtos, com qualidades diferenciadoras, promovendo boas práticas, tanto empresariais como ambientais.

A Sonae Indústria de Revestimentos fundada em 1959 na Maia, onde se localiza atualmente a sua sede, deu origem ao Grupo Sonae - Sociedade Nacional de Estratificados, SARL. Atua nas áreas de produção e comercialização de termolaminados decorativos de alta pressão (HPL, do inglês *high-pressure laminates*) e compactos [1].

Inicialmente, a Sonae tinha por objetivo a produção de termolaminados decorativos e o produto com que consolidou a sua posição no mercado, o LAMINITE, ainda hoje é a marca do laminado decorativo comercializado [1].

A empresa produziu termolaminados em regime de exclusividade até 1971, data que marca a decisão de uma expansão dos seus negócios, passando a produzir resinas melamínicas e fenólicas, em 1982. Estendeu a sua atividade no sector da química industrial, mas apenas em 1984 é que surgiu o objetivo de liderança no sector de aglomerados de madeira em Portugal, com a aquisição da maior produtora do país, até então [1]. No final de 1988, surgiu a *holding* do grupo e o património industrial da unidade da Maia integrou-se na Sonae Indústria de Revestimentos, SA., onde se desenvolve o presente trabalho.

No fim da década de 80, a Sonae avigora a posição de líder no setor de aglomerados de madeira em Portugal e internacionaliza a sua área de negócios, adquirindo uma empresa na Irlanda do Norte. A partir de 1991, surge a necessidade de um maior enfoque na área dos negócios e é neste sentido que nasce a Sonae Indústria, SGPS. Segue-se uma fase crucial de expansão e internacionalização dos negócios da Sonae Indústria, que a torna líder do setor de painéis de madeira na Península Ibérica e num dos cinco maiores produtores europeus. Em 1994, a empresa dividiu-se em várias entidades autónomas, ficando a SIR apenas com a produção de termolaminados e papel impregnado [1].

Dada a ambição, o esforço e a visão da Sonae Indústria, os anos seguintes ficaram marcados por um enorme processo de expansão por parte da empresa, através da alienação de

crescimento e aquisições, tendo-se afirmando cada vez mais como líder nos setores a que se dedica, em países como o Reino Unido, o Canadá e a Alemanha.

Através de uma fusão entre a Sonae Indústria e a *Inversiones Arauco Internacional*, com sede no Chile, surge então em 2016 a Sonae Arauco, que engloba as operações de painéis derivados de madeira e atividades relacionadas na Europa e África do Sul, nomeadamente todas as unidades de produção de painéis derivados de madeira, químicos e papel impregnado. Em agosto de 2018, com o intuito de criar uma identidade própria, a SIR lança a sua marca de laminados e compactos, SURFORMA, destinada às indústrias de construção, mobiliário e design de interiores [1]. No início de novembro de 2020, a SIR passa oficialmente a denominar-se SURFORMA®. Na Figura 1.1 apresentam-se algumas das aplicações de compactos e termolaminados em coleções lançadas pela SURFORMA® [1].

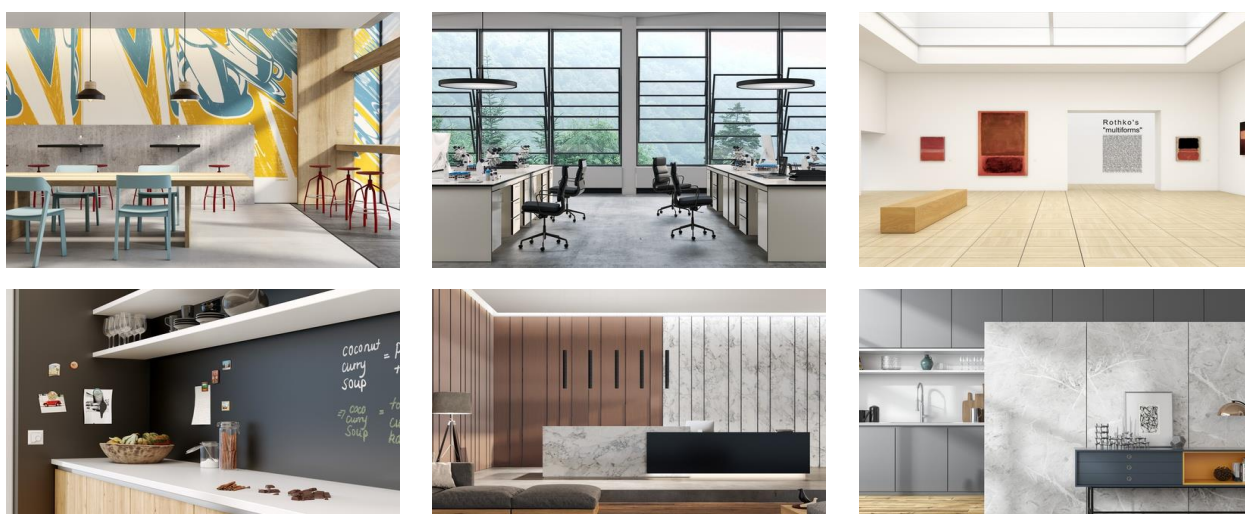


Figura 1.1 - Aplicações de compactos e termolaminados em coleções lançadas pela SURFORMA [2].

Atualmente, a empresa produz termolaminados decorativos de alta pressão, que consistem num conjunto de folhas de papel kraft impregnadas, sobrepostas entre si e submetidas a elevadas pressões e temperaturas, concebidos para situações de utilização e impacto exigentes. Apesar da qualidade superior destes produtos, estes apresentam-se por vezes sobre qualificados em determinado tipo de utilizações. Ao longo do processo produtivo são gerados resíduos, resultantes do corte e lixagem dos termolaminados, que são enviados para uma empresa que procede à sua incineração e consequente reaproveitamento energético. Foi neste sentido que surgiu a necessidade de desenvolver soluções alternativas, não apenas aos compactos atualmente produzidos, mas também à valorização destes resíduos [3, 4]. O objetivo primordial deste projeto consiste, então, na implementação de novas soluções que visam a otimização das propriedades de um painel fabricado através dos resíduos provenientes da SURFORMA. Devido à sua constituição e método de produção, este assemelha-se a um painel aglomerado de partículas.

A principal matéria-prima a utilizar para este trabalho são, então, os resíduos industriais da SURFORMA, que englobam papel impregnado, laminados, papel seco e folhas de separativo.

Sendo um dos principais objetivos por parte da empresa a diminuição dos custos de produção, os restantes materiais utilizados foram selecionados tendo em conta aspetos como o custo associado e o fácil acesso.

Posto isto, numa primeira fase pretende-se encontrar soluções que definam a composição do aglomerado, principalmente no que diz respeito à proporção de resíduos necessária de cada granulometria e quantidade de resina apropriada e ainda relativamente à sua viabilidade de acordo com a normalização em vigor para as diferentes áreas de utilização, tais como materiais de construção, mobiliário de casa de banho e cozinhas. Numa fase seguinte, tentar-se-á desenvolver o produto até que seja possível a sua implementação industrial. Para que tal aconteça, será necessário recorrer a métodos de análise e caracterização, com vista à perceção de otimizações necessárias, como por exemplo o tempo de prensagem do produto necessário de modo a ser viável para ser produzido na indústria, e avaliação do comportamento do produto.

1.2 Contributos do(a) autor(a) para o Trabalho

A visão ambiciosa, o empenho e a perseverança são fatores chave que contribuem para que a SURFORMA salvguarde a sua qualidade de líder no setor em que atua. Torna-se necessário, desta forma, superar continuamente desafios e perceber onde é fundamental intervir de modo a preservar vantagem competitiva no mercado. Neste contexto, em 2019 surgiu a ideia da criação de um produto economicamente sustentável para a empresa, substituindo o uso de folhas de papel kraft por resíduos provenientes da indústria. Esse projeto originou outra dissertação, coordenada pela SURFORMA, com o tema “Desenvolvimento de soluções para valorização de desperdícios industriais” (Pedro Ramos, 2020) [3]. O presente trabalho realiza-se, então, com o intuito de colmatar limitações encontradas inicialmente, de modo a efetuar a otimização do produto, tornando-o economicamente rentável e viável de acordo com as normas em vigor, até à sua implementação a nível industrial.

Do ponto de vista do utilizador, os produtos que a SURFORMA comercializa apresentam-se por vezes sobre qualificados, pois nem todas as aplicações requerem resistência mecânica tão elevada. Desta forma, este projeto surge maioritariamente para ser adotado nestas situações, resultando num maior valor acrescentado. Por outro lado, este produto contribui ainda para a valorização sustentável dos resíduos, promovendo uma economia circular.

A contribuição direta do autor para o presente trabalho passa por:

- Destroçar os resíduos, fazendo variar a velocidade de rotação e a grelha utilizada, de modo a afinar as condições operatórias;
- Produzir diversas placas com o intuito de avaliar a influência de diferentes distribuições granulométricas nas suas propriedades;

- Diminuir o teor de formaldeído, produzindo placas com diferentes tempos e temperaturas de prensagem e massas volúmicas;
- Estudar a possibilidade de diminuir os custos associados a matérias primas (teor de resina e massa volúmica) e parâmetros do processo (tempo de prensagem);
- Caracterizar as placas produzidas, efetuando diversos ensaios (resistência à tração perpendicular ao plano, imersão em água, água fervente, entre outros);
- Produzir placas à escala piloto e proceder à caracterização das mesmas.

1.3 Organização da Dissertação

A presente dissertação divide-se nas seguintes secções:

1. Enquadramento, apresentação, principais objetivos do projeto e contributos do autor para o trabalho;
2. Contexto e estado da arte, onde surge uma breve introdução dos assuntos mais relevantes e componentes utilizados no decorrer do presente trabalho e se efetua uma revisão à literatura, referente a estudos anteriormente realizados na área;
3. Materiais e métodos, que se traduz pela descrição dos materiais utilizados e origem dos mesmos e onde se descrevem todos os procedimentos efetuados e técnicas utilizadas durante o período da dissertação;
4. Resultados e discussão, onde são apresentados todos os resultados obtidos e se efetua uma descrição, com sentido crítico, dos mesmos;
5. Conclusões, onde são sumariadas as principais conclusões a retirar ao longo do projeto;
6. Avaliação do trabalho realizado, onde se avalia o trabalho desenvolvido, são definidas as limitações encontradas e se desenvolvem possíveis propostas para trabalhos futuros.

2 Contexto e Estado da Arte

A SURFORMA aposta na melhoria contínua da eficiência das suas atividades e promove a inovação, mantendo os seus padrões de qualidade e excelência. Neste sentido, surge a necessidade de apostar na constante investigação, promovendo novas práticas e soluções que proporcionem, de forma consistente, os melhores produtos.

Com o intuito de obter soluções para aplicações em superfícies horizontais e verticais de menor custo associado, tentando não comprometer o seu desempenho, nos últimos anos a empresa apostou na incorporação de resíduos provenientes de outras indústrias, em compactos. Tornou-se assim possível valorizar um resíduo de elevada disponibilidade, alargando a gama de produtos da empresa. Foi nesta ótica que surgiu a ideia de utilizar os resíduos provenientes do processo produtivo da SURFORMA cujo fim de vida, até então, era ditado pela sua incineração e posterior valorização energética. Desta forma, este projeto permite, não apenas uma redução de custos no tratamento dos resíduos, mas também a criação de maior valor acrescentado em situações que não é necessário um desempenho mecânico muito elevado. Este novo produto idealizado permite a entrada da SURFORMA no mercado de painéis aglomerados de partículas, devido à semelhança no processo de produção. Desta forma, este torna-se um desafio acrescido, já que existe ainda pouca experiência em produtos desta gama, não se podendo comparar os mesmos diretamente com HPL.

O crescimento do mercado global no setor dos laminados decorativos é atribuído, maioritariamente, às crescentes aplicações na indústria de construção e aos avanços tecnológicos, que se têm vindo cada vez mais a notar, nas técnicas de textura e impressão [5]. O aumento do poder de compra e a crescente preferência, por parte dos consumidores, por um melhor apelo estético e por móveis decorativos são também fatores que contribuem para o posicionamento do setor, a nível global. Por outro lado, o principal desafio deste mercado consiste na flutuação do preço das matérias primas que, de certa forma, prejudica o seu desenvolvimento. A expansão, o lançamento de novos produtos e aquisições apresentam-se como estratégias preponderantes adotadas pelas empresas que atuam neste setor [5].

Atualmente enfrenta-se, a nível global, a pandemia Covid-19 e, deste modo, foi necessário efetuar uma revisão às projeções iniciais deste setor, dadas as implicações comerciais e a crise económica induzida. Posto isto, até ao final do ano de 2020 estima-se atingir os 7,2 milhões de euros no mercado global de laminados decorativos e em 2027, 8,4 milhões, crescendo a uma taxa de crescimento anual composta (CAGR, do inglês, *Compound Annual Growth Rate*), neste período, de 2,1 % [6].

Atualmente, o paradigma vigente da economia concentrado num modelo linear, confronta-se com questões referentes ao aumento da população mundial e consequente procura crescente por matérias-primas, muitas delas escassas e finitas. Este cenário remonta cada vez

mais para a economia circular, que constitui um aspecto essencial da transformação da indústria em direção à neutralidade climática e à competitividade a longo prazo, podendo gerar reduções substanciais de custos ao longo das cadeias de valor e dos processos produtivos, criar valor acrescentado e abrir oportunidades económicas [7, 8]. É neste cenário que o projeto de incorporação dos resíduos nos compactos assenta, aliando a circularidade à obtenção de soluções estruturais mais baratas, alargando o portefólio da empresa e promovendo a sustentabilidade. Na Figura 2.1 encontra-se representado um modelo de economia circular que o presente trabalho permite implementar na SURFORMA.



Figura 2.1 - Modelo de economia circular que o presente trabalho permite implementar [7,8].

Posto isto, é possível salientar que este estudo se torna bastante interessante para a SURFORMA do ponto de vista económico, pois prevê a diminuição de custos associados às matérias primas, à valorização dos resíduos da própria empresa e à produção do painel, face a produtos apresentados pela concorrência no setor. Propicia ainda uma melhoria da imagem da empresa, devido à sua contribuição para a economia circular e para a sustentabilidade.

2.1 Termolaminados de alta pressão (HPL)

De acordo com a norma EN 438-1:2016, um laminado de alta pressão consiste numa placa composta por camadas de material fibroso celulósico (normalmente papel) [9]. A adesão destas camadas ocorre através de um processo de alta pressão e temperatura. Este processo é definido como a aplicação simultânea de calor (temperatura $\geq 120^{\circ}\text{C}$) e alta pressão ($\geq 5\text{ MPa}$), para proporcionar escoamento e posterior cura das resinas fenólica e melamínica, obtendo-se um material não poroso, homogêneo, com maior massa volúmica ($\geq 1,35\text{ g/cm}^3$) e com o acabamento superficial exigido [9].

As camadas dos termolaminados são constituídas por um conjunto de folhas de papel kraft impregnadas com resina fenólica, uma folha de papel decorativo impregnado com resina melamínica e, em alguns casos, uma folha de papel *overlay* na superfície.

Os termolaminados de alta pressão têm sido cada vez mais requeridos para superfícies residenciais e comerciais e apresentam-se como uma solução prática para superfícies verticais e horizontais que exigem alto desempenho físico, mecânico e químico. A nível global, o interesse por este mercado tem vindo a aumentar devido à sua versatilidade, polivalência e excelente capacidade decorativa. Dependendo da sua aplicação final, as suas propriedades

variam e o desenvolvimento de resinas de impregnação inovadoras com novas funcionalidades pode resultar em laminados multifuncionais como resultado da combinação de novas e melhores propriedades [9].

Os termolaminados são placas finas que apenas se distinguem dos compactos fenólicos pela sua espessura, que deverá situar-se abaixo dos 2 mm. A espessura é determinada somente pelo número de folhas de papel kraft utilizadas. Na Figura 2.2 apresenta-se a constituição de um termolaminado de alta pressão.

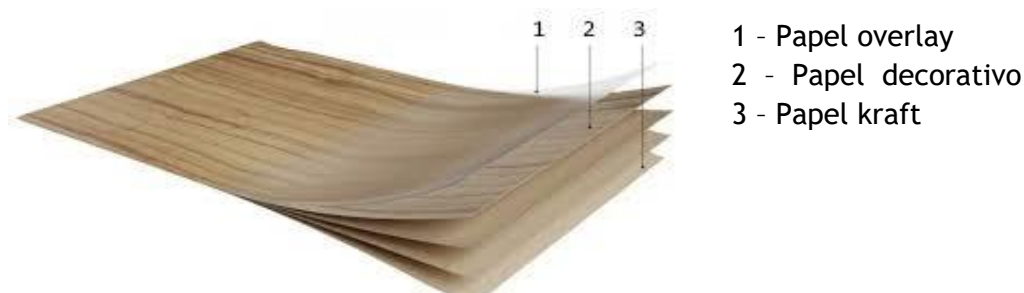


Figura 2.2 - Constituição de um termolaminado de alta pressão (HPL) [4].

2.2 Aglomerados de partículas

Uma vez que o processo produtivo do presente projeto se assemelha ao dos aglomerados de partículas, uma introdução sobre os mesmos, torna-se necessária.

Um aglomerado de partículas consiste numa placa fabricada maioritariamente a partir de material lenho-celulósico, sob a ação de um ligante orgânico sintético termoendurecível, sujeito a temperaturas entre 150 e 220 °C e pressões entre 10 e 50 bar [10].

Este produto é amplamente utilizado na produção de móveis em prole das suas características tecnológicas, custo competitivo e escala de produção (KOLLMANN *et al.*, 1975).

Segundo a Norma EN 309, um aglomerado é um “painel à base de madeira fabricado sob pressão e calor a partir de partículas de madeira (lascas de madeira, estilha, aparas, serradura e similares) e/ou outro material lenho-celulósico em forma de partículas (aparas de linho ou cânhamo, fragmentos de bagaço e similares) com a adição de um adesivo.”

Os aglomerados (Figura 2.3) possuem uma série de vantagens em relação à madeira maciça, apresentando-se mais baratos, com propriedades mais isotrópicas, substituindo o seu uso quando o custo é mais importante do que a resistência e a aparência. Uma desvantagem significativa do aglomerado é a baixa estabilidade dimensional, ocorrendo o seu inchamento em espessura por absorção de humidade, especialmente quando não se encontra coberto com tinta ou outro aditivo selante.



Figura 2.3 - Aglomerado de partículas [10].

Por essa razão, a sua utilização não é recomendada no exterior ou em locais com elevados níveis de humidade, à exceção de casas de banho, cozinhas e lavandarias [11, 12].

2.3 Processo de produção de aglomerados de partículas

O processo de produção de um aglomerado de partículas engloba as seguintes etapas: preparação da matéria-prima, produção das partículas, secagem, classificação, mistura das partículas com a resina e os aditivos, formação do colchão, prensagem, arrefecimento e acabamento [11].

No processo de preparação da matéria prima, ocorre o seu armazenamento de acordo com a sua espécie e tamanho. Na etapa de produção das partículas, as amostras maiores são, em primeiro lugar, fragmentadas em destroçadores primários e, posteriormente são convertidas em tamanhos menores em destroçadores secundários por meio de moinhos de lâminas ou de martelos [10, 11].

Em seguida, as partículas são enviadas para o secador, de modo a atingir o teor de água desejado. Este teor deve ser reduzido e encontrar-se entre 2 e 8 %, dependendo da resina a utilizar. Estes valores devem-se ao facto do teor de água residual ser convertido a vapor no processo da prensagem a quente; Logo, se este for gerado em demasia, a placa delamina devido à libertação repentina de pressão de vapor, aquando da abertura da prensa [11].

Após o processo de secagem, as partículas são sujeitas a uma classificação de acordo com o seu tamanho e posição no colchão, sendo que as partículas da camada interna da placa são geralmente maiores do que as da camada externa. Alguns fabricantes, de modo a minimizar o consumo de energia, separam as partículas antes do processo de secagem [11, 12].

A etapa seguinte consiste na mistura das partículas de madeira com a resina e os restantes aditivos, num processo contínuo. Os aditivos podem ser adicionados diretamente às partículas de madeira ou previamente misturados com a resina. Finalizada esta etapa, ocorre a formação do colchão e é crucial que este se apresente consistente, de modo a produzir placas com as características adequadas. Após a formação do colchão, este é pré-prensado e pré-aquecido para melhorar a eficiência da operação de prensagem, reduzindo os custos operacionais. Antes da prensagem, é necessário garantir a mesma temperatura em todo o colchão e uma densidade uniforme. O tempo mínimo de prensagem é determinado pelo tempo necessário para aquecer e curar a resina na camada central [11, 12].

Depois de prensadas, as placas são cortadas, os seus bordos retestados e finalmente são arrefecidas para, em seguida, serem empilhadas e armazenadas. Antes do envio, as placas são lixadas e cortadas à medida.

A maior parte dos aglomerados de partículas são produzidos com resinas à base de formaldeído. As taxas de cura destas resinas são muito dependentes do pH do meio, pois todas as espécies de madeira apresentam um pH específico. Logo, se uma espécie quase neutra for

usada, a resina pode não curar completamente e se uma espécie ácida for usada, pode ocorrer pré-cura. A resina mais utilizada na produção de aglomerados de partículas é a ureia formaldeído, seguido pela melamina ureia formaldeído e posteriormente pelo fenol formaldeído [11].

2.4 Uso de madeira recuperada para produção de aglomerados

A concorrência é muito cerrada na maioria dos setores da indústria de painéis de madeira e, neste sentido, é crucial reduzir os custos de produção o máximo possível. De modo a contribuir para essa diminuição, a maioria dos fabricantes utiliza madeira recuperada, pois para além de ser uma alternativa barata a outras fontes, é geralmente mais seca, reduzindo-se consideravelmente o consumo de energia durante a fase de secagem. Contudo, o uso de madeira recuperada acarreta algumas complicações, como por exemplo, a presença de contaminantes que necessitam de ser removidos. Existem sistemas de limpeza sofisticados disponíveis, mas requerem um gasto de capital significativo. Efetuando um balanço económico global, é possível afirmar que os benefícios associados ao uso de madeira recuperada justificam o investimento necessário [11].

2.5 Poliuretano (PU)

Sendo que a resina selecionada para o processo de produção das placas de aglomerados de resíduos é o poliuretano (PU), torna-se necessário uma introdução acerca da mesma.

A descoberta dos poliuretanos remonta a 1937 na *I.G. Farben Laboratories*, uma subdivisão da *Bayer Corporation*, em Leverkusen, Alemanha, onde Heinrich Rinke primeiro preparou 1,6-hexametileno diisocianato (HDI) e Otto Bayer desenvolveu o processo de poliadição de diisocianato [13].

O poliuretano (PU) é uma das classes mais versáteis de materiais poliméricos conhecidos atualmente. São materiais únicos, onde a elasticidade característica da borracha se combina com a dureza e durabilidade dos metais, resultando em propriedades como elevada resistência, dureza e elevado alongamento na rutura. Este mercado começou a desenvolver-se na década de 1970, a capacidade de produção começou a crescer rapidamente e a indústria passou a ser dominada por grandes empresas químicas [13].

Os poliuretanos são produzidos por uma reação de polimerização de adição a partir de compostos hidroxilados (OH), como os polióis e isocianatos, na presença de catalisadores, de um extensor de cadeia e aditivos adequados. Pode ser produzida uma grande variedade de estruturas com polióis e isocianatos, levando a um amplo espectro de propriedades e aplicações (Yeganeh *et al.*, 2007). Este polímero contém uma elevada concentração de grupos polares, em particular o grupo uretano, resultante de reações entre o grupo hidróxilo e o grupo isocianato. As interações entre essas entidades polares são de grande importância na determinação das

propriedades de todos os tipos de PU (Lee *et al.*, 1999), para além da composição dos polióis, isocianatos e aditivos utilizados durante a síntese (Pachecho *et al.*, 2009) [13, 14].

Os isocianatos, componentes essenciais à síntese dos poliuretanos, podem ser di ou polifuncionais, contendo dois ou mais grupos -NCO, por molécula. Embora exista uma enorme diversidade de poliisocianatos aromáticos e alifáticos, dois são de particular importância industrial: TDI (diisocianato de tolueno) e MDI (Diisocianato de metileno 4,4' -difeníleno). Cada um deles possui variantes e, em conjunto, formam a base de cerca de 95 % de todos os poliuretanos [14, 15]. Uma ilustração de ambos os compostos encontra-se representada na Figura 2.4.

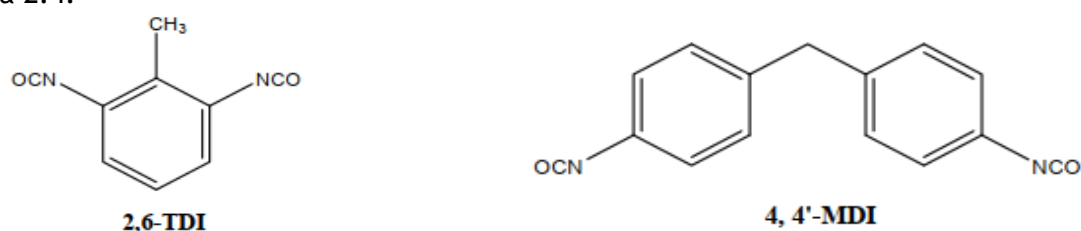


Figura 2.4 - Ilustração de poliisocianatos: 2,6-TDI e 4,4'-MDI [14].

As propriedades físicas, bem como a estrutura química de um poliuretano, dependem das dos reagentes que lhe dão origem, tal como já foi referido. As características dos polióis, em particular a sua massa molecular relativa, número de grupos funcionais reativos por molécula e estrutura molecular, influenciam as propriedades do polímero final e, por conseguinte, os fins a que se destina. Se se tomar como exemplo os polióis de poliéster (PEP) e os polióis de poliéter (PETP), é possível afirmar que PEP altamente ramificados resultam em poliuretanos rígidos com boa resistência ao calor e a químicos, PEP menos ramificados originam poliuretanos com boa flexibilidade (a baixas temperaturas) e baixa resistência química; da mesma forma, os PEP de baixo peso molecular produzem um PU rígido, enquanto os PEP de cadeia longa de alto peso molecular produzem um PU flexível; os polióis de poliéter (PETP) originam poliuretanos com elevada resistência à humidade e baixa temperatura de transição vítrea, o que limita o seu uso extensivo em revestimentos e tintas [13]. Na Figura 2.5, encontram-se representadas as estruturas moleculares do PEP e do PETP.

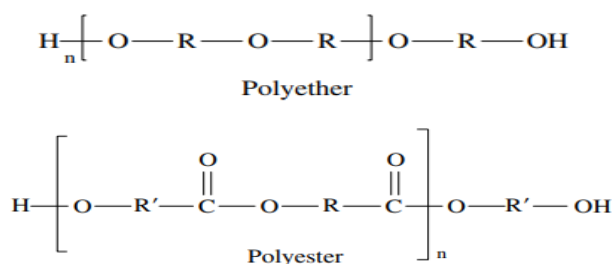


Figura 2.5 - Estrutura molecular do PETP (do Inglês, *Polyether*) e do PEP (do Inglês, *Polyester*) [13].

Juntamente com um polioli e um isocianato, outros aditivos e catalisadores adequados também podem ser incorporados para a síntese dos poliuretanos, principalmente para controlar e modificar as condições da reação e também para terminar ou modificar o produto final. Os aditivos que podem ser incorporados na síntese de PU incluem retardadores de chama, pigmentos, reticulantes, entre outros. Na Figura 2.6 encontra-se então esquematizado o processo comum de síntese de poliuretanos [13, 14, 16].

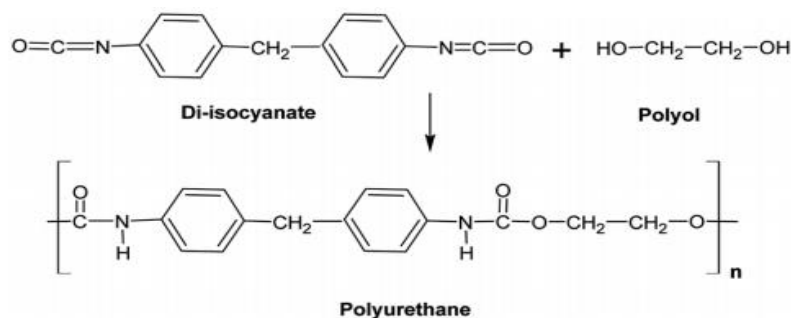


Figura 2.6 - Processo comum de síntese de um poliuretano (PU) [13].

Os poliuretanos para além de apresentarem maior resistência à abrasão e ao envelhecimento por oxidação, também contêm boa flexibilidade e elasticidade. Em comparação aos restantes polímeros, este apresenta ainda a melhor resistência a baixas temperaturas. No entanto, estes materiais têm a desvantagem de se decomporem rapidamente na presença de água e calor [13, 14].

2.6 Resinas fenol formaldeído e melamina formaldeído

Na presente dissertação, torna-se relevante efetuar uma breve introdução a cerca das resinas de fenol formaldeído (PF) e das resinas de melamina formaldeído (MF), pois desempenham um papel fundamental na produção dos termolaminados de alta pressão produzidos na SURFORMA e, como tal, apresentam uma dada contribuição nos resíduos utilizados para produção dos painéis. Para além disso, torna-se necessário ressaltar nesta subsecção que um dos principais problemas a colmatar no sentido de tornar viável a produção e consequente comercialização do produto desenvolvido na presente dissertação, consistiu na diminuição do teor de formaldeído do mesmo. Estes valores elevados surgem da utilização das resinas MF e PF que apresentam formaldeído na sua constituição.

2.6.1 Resinas fenol formaldeído

A resina de fenol formaldeído foi inventada em 1909 por Leo Bakland. Vendida comercialmente como baquelite, esta foi a primeira resina termoendurecível sintética a ser produzida. Estas resinas surgem de uma reação de policondensação que ocorre entre o fenol e o formaldeído e apesar de no passado apresentarem um amplo e diversificado espectro de

aplicações ao nível industrial, o seu uso atual é mais restrito, principalmente devido ao seu elevado custo (Gardziella *et al.*, 2000; Detlefsen, 2002) [17].

No universo dos HPL, esta resina desempenha um papel fundamental, pois permite a adesão dos laminados a um material de substrato, com inúmeras finalidades em superfícies verticais e horizontais, tais como pisos de chão e revestimentos de paredes.

As resinas de fenol formaldeído também são amplamente utilizadas na produção de compensados de madeira maciça, painéis de aglomerados de partículas longas e orientadas, aglomerados de partículas e aglomerado de fibras obtido por via seca de baixa densidade com elevada resistência à humidade e baixas emissões de formaldeído (Gardziella *et al.* 2000; Dunky e Pizzi, 2002; Detlefsen, 2002; Dunky, 2003) [17].

As resinas PF apresentam excelentes propriedades de resistência à intempérie, à água e exibem elevada coesão após a sua cura. Nas indústrias automóvel e de construção, estas apresentam uma posição bem consolidada devido à elevada estabilidade térmica e propriedades de resistência ao fogo (Gardziella *et al.*, 2000). Por outro lado, no que diz respeito à cura destas resinas, estas necessitam de temperaturas acima dos 130 °C e tempos prolongados [12, 17].

2.6.2 Resina melamina formaldeído

As resinas de melamina formaldeído (MF) são polímeros termoendurecíveis pertencentes ao grupo das resinas amino. De forma análoga às resinas PF, apresentam um elevado custo, o que justifica um número mais reduzido de aplicações (Dunky e Pizzi, 2002; Dunky, 2003). No entanto, no que diz respeito aos HPL, desempenham a função de polímeros de impregnação de papel para o revestimento de painéis derivados de madeira (aglomerado e MDF) e laminados decorativos. A faixa de temperatura de cura efetiva das resinas MF começa em cerca de 100 °C e atinge o ótimo em aproximadamente 150 °C [9, 17].

Na produção de revestimentos de superfícies, as resinas melamina formaldeído apresentam propriedades únicas em termos de dureza, estabilidade química e transparência, fornecendo uma boa retenção de cor, aparência visual brilhante e elevada resistência ao desgaste, aos arranhões, à ebulição e à humidade. Por outro lado, estas resinas também apresentam algumas desvantagens, nomeadamente as inevitáveis emissões de formaldeído, baixa estabilidade de armazenamento devido à presença de grupos imina e metilol reativos em grande quantidade, baixa resistência à oxidação a longo prazo e suscetibilidade ao ataque de ácidos e bases fortes [9, 12, 17].

2.7 Formaldeído

Um dos principais obstáculos associado à viabilidade referente à incorporação dos resíduos da empresa nos painéis consiste na libertação de formaldeído, um composto cancerígeno, adverso à saúde humana. Neste sentido, um dos objetivos cruciais deste projeto

passou por minimizar ou até mesmo eliminar a libertação deste poluente. Desta forma, uma introdução a este composto, torna-se necessária.

O formaldeído, também designado por metanal pela IUPAC, apresenta a fórmula química CH_2O e é considerado um dos aldeídos mais simples que existe. Em condições normais de pressão e temperatura encontra-se no estado gasoso. É um gás incolor, inflamável e altamente reativo, que possui um odor característico, forte e muito irritante. Normalmente, o formaldeído é comercializado em solução aquosa a 30 - 50%, (em massa) estabilizada com metanol, conhecida como formalina [12, 18-20].

É produzido através da oxidação catalítica do metano e apresenta-se como um dos principais agentes de reticulação da indústria de sintéticos orgânicos, devido ao seu baixo custo, elevada disponibilidade e reatividade. O formaldeído é utilizado como intermediário no fabrico de produtos químicos industriais e atua como conservante de produtos de consumo, como champôs e cosméticos. Desde 1930 que tem sido um importante precursor para adesivos e compósitos à base de madeira (Salthammer *et al.*, 2010) [21]. Atualmente, a produção de resinas à base de formaldeído consome mais da metade da sua produção total [12, 17, 19, 20].

De acordo com a GHS e a sua implementação Europeia, CLP, o formaldeído é tóxico por ingestão, inalação ou em contacto com a pele. Pode ainda causar queimaduras na pele, lesões oculares graves e provocar reações alérgicas cutâneas [22].

Em meados da década de 1960 foram relatados os primeiros sintomas adversos relativos à exposição ao formaldeído devido a painéis aglomerados de partículas em casas pré-fabricadas (Salthammer *et al.*, 2010) [12, 17, 19-21]. Em 2004, com base em “*sufficient evidence of carcinogenicity in humans and in experimental animals*”, o formaldeído foi classificado como “cancerígeno para humanos (grupo 1)”, pela IARC [23, 24]. Como tal, têm sido feitos esforços desde então, no sentido de minimizar os valores limite de exposição ao poluente. Posteriormente, a ECHA adotou a regulamentação REACH, reclassificando o formaldeído como carcinogénio IB, sendo considerado “potencial agente causador de cancro para os humanos” e mutagénico (categoria 2) [12, 17-20]. Um dos marcos importantes na regulação das emissões deste composto surgiu com o regulamento final ATCM 93120, emitido pela CARB, que estabeleceu requisitos mais rigorosos, bem como uma certificação mais completa [20].

Em 2016, a EPA emitiu uma regra final para implementar “*Formaldehyde Standards for Composite Wood Products Act*” - um marco legislativo que acrescentou o Título VI à Lei de Controle de Substâncias Tóxicas (TSCA). Esta regra final, conforme alterada, inclui disposições relativas à redução das emissões de formaldeído das placas de derivados de madeira [12, 25].

No ano de 2018, a Alemanha anunciou uma nova legislação, introduzindo a norma “EN 16516:2017 - *Construction Products: Assessment of release of dangerous substances - Determination of emissions into indoor air*”. Entrou em vigor a 1 de janeiro de 2020, implementando novos limites de emissão de formaldeído de painéis derivados de madeira,

colocados no mercado alemão. As alterações deste novo método de referência presente na norma EN 16516 permite, no entanto, a utilização do método da câmara da norma EN 717-1:2004 desde que, nessas circunstâncias, o valor de emissão resultante seja multiplicado por 2 (fator de conversão), reduzindo pela metade o requisito de emissão necessário para cumprir a regulamentação alemã. Quer isto dizer na prática, que o limite de emissão de formaldeído da classe europeia E1 presente na EN 717-1:2004 de 0,1 ppm, será de 0,05 ppm para a EN 16515-2017 [17-19].

A Sveza, *The World Leader in Birch Plywood Production*, foi uma das poucas empresas que conseguiu atender aos requisitos mais rigorosos de emissão de formaldeído, de acordo com a EN 16515-2017, pois mesmo antes da introdução dos novos requisitos, o nível de emissão de formaldeído era significativamente menor do que os padrões harmonizados atuais. No entanto, os especialistas não descartam a possibilidade de requisitos mais rigorosos e preveem que até 2021, o nível permitido de emissão de formaldeído possa ser reduzido para 40 % ou até mesmo 20 % da classe E1 regulatória existente [26].

O Departamento de Habitação e Desenvolvimento Urbano, HUD, dos EUA emitiu uma regra final (FR 85 5562) para implementar a “*Formaldehyde Standards for Composite Wood Products Act*” com o intuito de agilizar e alinhar os requisitos de emissão de formaldeído no que diz respeito à utilização de produtos à base de madeira compósita em habitações. Esta regra final altera duas seções do Título 24 'Habitação e Desenvolvimento Urbano' e entrou em vigor a 2 de março de 2020 [27, 28].

A Diretiva 2019/983 do Parlamento Europeu e do Conselho de 5 de junho de 2019, que altera a Diretiva 2004/37/CE, tem por objetivo “proteger os trabalhadores contra os riscos para a sua saúde e segurança decorrentes da exposição a agentes cancerígenos ou mutagénicos no local de trabalho”. Desta forma, apresenta novos Valores-Limite de Exposição para o formaldeído [29]:

- Valor-limite Exposição - Longa duração (8 horas): 0,37 mg/ m³ ou de 0,03 ppm;
- Valor-limite Exposição - Curta duração: 0,74 mg/ m³ ou de 0,6 ppm.

Estes valores aplicam-se a todos os Estados Membros da União Europeia, apresentando-se igualmente na página da ECHA: “Limites de Exposição Ocupacionais (OELs)” [30].

As fontes de emissão do formaldeído podem ser divididas em: temporárias, intermitentes e permanentes (Salthammer *et al.*, 2019) [19]. No que diz respeito à produção e posterior utilização de painéis de derivados de madeira, de uma maneira geral, as emissões são provenientes principalmente de três fontes: formaldeído existente na composição da matéria prima da madeira; formaldeído livre residual presente na resina utilizada e o formaldeído libertado pela quebra das ligações da resina [12, 17, 19, 20].

A libertação do formaldeído dos painéis acabados depende de fatores internos e externos, que necessitam de ser levados em consideração na escolha dos métodos para a determinação das suas emissões, a fim de obter resultados confiáveis e reprodutíveis. Os fatores internos incluem o tipo de madeira e resina utilizada, os parâmetros e condições de operação e a idade do painel. Os externos consistem na temperatura, humidade, taxa de troca de ar e a área total exposta do painel em relação ao volume total de espaço no qual os painéis estão inseridos (Athanassiadou e Ohlmeyer, 2009) [17, 20].

Uma questão relevante que diz respeito à regulamentação dos limites de emissão é a seleção de um método de ensaio aprovado e adequado. Diferentes países e regiões apresentam os seus próprios métodos de ensaio padrão, sendo que os mais relevantes são: método da câmara, método do perforador, método de análise de gás, método do frasco e método do exsiccador. Nos EUA, existem três métodos de teste padrão para contabilizar as emissões de formaldeído: câmara grande, câmara pequena e método do exsiccador. Na UE, estes incluem o método do perforador (NP EN ISO 12460-3), da análise do gás (NP EN ISO 12460-3) e método da câmara (EN 717-1). Apesar deste último simular de forma mais precisa as condições reais das aplicações práticas, o tempo de ensaio é demasiado longo (o ensaio pode demorar até 28 dias). Desta forma, neste trabalho foi aplicado o método do perforador [14, 17-20].

Existem quatro abordagens principais no que diz respeito ao cumprimento de requisitos cada vez mais rigorosos no setor de painéis à base de madeira, com o intuito de minimizar a libertação deste poluente: a redução do teor de formaldeído na formulação da resina, tentando não comprometer o desempenho do painel; a adição de captadores à resina ou às partículas de madeira, com a desvantagem de se encontrar menos formaldeído disponível para a cura da resina; a implementação de tratamentos de superfície após a produção da placa e por último, o uso de resinas alternativas com redução ou nenhuma emissão de formaldeído (preferencialmente adesivos de base biológica), com impacto no custo e/ ou desempenho do produto [17].

Concomitantemente com os aspetos supramencionados, existem ainda duas variáveis-chave a ter em consideração, entre os quais (Dunky *et al.*, 2001): o teor de água das placas, pois quanto maior, mais elevadas as emissões, seja devido à retenção do formaldeído dissolvido, cura menos eficaz ou ainda maior taxa de hidrólise da resina; temperaturas e/ ou tempos de cura mais elevados, pois estes implicam maior extensão da reação e, portanto, menor quantidade de formaldeído livre residual, levando a um valor de emissões mais reduzido [17].

A criação de barreiras difusionais nas superfícies dos painéis de modo a manter o formaldeído confinado, tem vindo a ser também uma estratégia de estudo. Esta abordagem implica a aplicação de um laminado, *overlay* ou revestimento no painel recorrendo a tintas, vernizes, folheados, ou papéis impregnados, permitindo também obter uma aparência decorativa final, o que poderá servir de vantagem ao produto acabado. Neste contexto, existem

trabalhos na literatura que comparam a eficácia de diferentes materiais de barreira na redução destas emissões (Lee *et al.*, 2011; Barry *et al.*, 2006; *Composite Panel Association*, 2003; Myers, 1986) [31-34]. De notar que revestimentos em pó epóxi e com laminados geralmente implicam uma redução de acima de 90 % nos níveis de emissões. A utilização de revestimentos líquidos com aditivos eliminadores de formaldeído é também considerada uma solução a ter em conta relativamente à libertação deste poluente.

Xing *et al.* (2015) [35], concluíram que as emissões através dos bordos do painel eram o dobro relativamente às da superfície. Neste sentido, recorrer à vedação dos bordos pode efetivamente reduzir o formaldeído libertado, tal como foi possível concluir por Kim *et al.* (2006) [36] que, ao selarem amostras com um filme de parafina, cera de polietileno ou folha de alumínio conseguiram demonstrar que as emissões referentes aos painéis sem revestimento eram muito superiores quando em comparação com os painéis com revestimento minimizando efeitos adversos à saúde humana [37].

2.8 Aproveitamento de resíduos na indústria de HPL

Com o intuito de avaliar a existência de produtos similares no mercado, efetuou-se uma pesquisa extensiva da literatura, tanto a nível de artigos científicos, como patentes relacionadas com o tema em questão. No entanto, é de salientar a escassez de projetos na vertente de reutilização dos resíduos provenientes da indústria de produção de laminados decorativos. Os resultados desta pesquisa, que mais se assemelham com o presente trabalho, apresentam-se denotados de seguida.

Silva *et al.* (2012) [38] avaliaram a viabilidade técnica de incorporação de resíduos de papel impregnado como ligante na camada interna de MDF. Para o estudo, foram recolhidos os resíduos e misturados com as partículas de madeira com resina, em diferentes proporções (0 %, 4 %, 8 % e 12 %), com base na massa das partículas de madeira. Foram realizados testes físico-mecânicos, que permitiram concluir que a incorporação dos resíduos de papel impregnado na camada interna do painel não afetou as suas propriedades físico-mecânicas, quando em comparação com o produto convencional. Por fim, esta alternativa de valorização de resíduos contribui favoravelmente para uma utilização racional das matérias primas (nomeadamente, reduzindo o consumo de madeira) e para um maior nível de sustentabilidade ambiental da indústria.

Alpar e Tibor (2006) [39] estudaram a incorporação de resíduos provenientes da reciclagem de papel decorativo impregnado, resultantes do processo de impregnação, na produção de aglomerados e partículas de madeira. Com base nos resultados obtidos, verificou-se que a produção de aglomerados de partículas é possível mesmo sem o uso de resina (neste caso, ureia formaldeído), bastando adicionar à matéria prima 20% dos resíduos de papel decorativo impregnado. Contudo, se for necessário obter valores de resistência mais elevados,

a adição de 5 % de resina e 20 % de resíduos de papel decorativo impregnado é suficiente para atingir a resistência de um painel padrão com apenas 10 % de resina.

Estes dois últimos projetos apresentados distinguem-se do tema proposto nesta dissertação, por duas razões significativas: os resíduos utilizados não são da mesma natureza, pois não são provenientes de uma linha de produção de HPL e as percentagens exploradas de incorporação de resíduos no painel foram de, no máximo, 20 %, enquanto que no presente trabalho, todo o painel era composto por resíduos.

Çavdar *et al.* (2013) [40] exploraram algumas das propriedades de painéis de aglomerado de partículas longas e orientadas, fabricados com resíduos de papel impregnado de melamina. Com base nos resultados obtidos, foi possível concluir que as propriedades de flexão das amostras melhoraram com o aumento da quantidade de resíduos incorporada. Da mesma forma, o inchamento em espessura e as características de absorção de água das amostras mostraram-se inferiores em placas com resíduos incorporadas, quando em comparação com os painéis de controlo. Verificou-se ainda que é possível diminuir a quantidade de madeira e de resina (no estudo em questão, ureia formaldeído) utilizadas nos painéis, quando se incorporam os resíduos de papel impregnado. Em suma, a utilização destes resíduos apresentou um impacto positivo nas propriedades mecânicas e físicas do painel.

Este projeto distingue-se da presente dissertação, pois para além dos resíduos não serem provenientes de uma linha de HPL, de não se utilizarem os mesmos como um todo na produção dos painéis, Çavdar *et al.* (2013) [40] fabricaram painéis de aglomerado de partículas longas e orientadas e não aglomerados de partículas, como o pretendido.

Ayrılmaz (2012) [41] também estudou a incorporação de resíduos de papel decorativo impregnado com resina e papel de sobreposição, como aglutinante na fabricação de placas de MDF. Neste estudo, foi relatado que a estabilidade dimensional e as propriedades mecânicas dos painéis de MDF melhoraram com a adição destes resíduos. Fur *et al.* (2004) [42] demonstraram que os resíduos de papel impregnado de melamina podem ser reutilizados diretamente sob a forma de pó fino, como aglutinante para painéis e como substituto da melamina e preparação de resinas melamina-ureia-formaldeído líquidas, demonstrando a viabilidade dos projetos. Başboğa *et al.* (2018) [43] avaliaram a eficácia do resíduo de papel impregnado de melamina (MIP) como adesivo no fabrico de aglomerado de partículas e os efeitos do mesmo sobre algumas propriedades tecnológicas do aglomerado. Os últimos três estudos apresentados são análogos aos anteriores, na medida em que diferem do produto desenvolvido nesta dissertação relativamente à origem e constituição dos resíduos, dos materiais e métodos empregues, bem como relativamente à natureza do produto final.

3 Materiais e Métodos

3.1 Materiais utilizados

Os resíduos necessários à produção dos painéis foram fornecidos pela própria empresa, tendo sido avaliada a influência da distribuição de duas granulometrias distintas (1 mm e 2 mm). A cola Flexpur 805 da Flexpur (Anexo A) foi o ligante utilizado para promover a adesão dos resíduos. É um pré-polímero de poliuretano resultante da reação entre polióis e diisocianato de difenilmetano (MDI). Com um teor de NCO entre 8 e 10 % e um teor de sólidos > 98 %, apresenta-se como um líquido castanho, transparente e sem materiais em suspensão. De modo a auxiliar o processo de cura, foi adicionado 30 % de água em relação à quantidade de resina adequada, com a função de aumentar o número de grupos hidroxilos disponíveis para que os isocianatos comecem a reagir.

O papel *overlay*, o papel de barreira, os restantes reagentes e outros materiais que foram sendo necessários no decorrer do projeto, nomeadamente a máscara de filtros, provieram da SURFORMA.

3.2 Procedimentos

De modo a promover uma otimização consolidada do produto desenvolvido na presente dissertação, todas as etapas do processo produtivo foram alvo de estudo. Numa fase inicial, optou-se por analisar uma propriedade que serviu de base ao processo de melhoria das seguintes. Com o objetivo final de uma possível implementação industrial, as propriedades mais relevantes a otimizar foram a granulometria, a quantidade de resina e o tempo e temperatura de prensagem, sempre com o intuito de reduzir os custos associados.

O processo de produção dos painéis de resíduos divide-se em cinco etapas (Figura 3.1):

1. Preparação da matéria prima (destroçamento e peneiração);
2. Encolagem;
3. Formação de cargas;
4. Prensagem;
5. Acabamento.

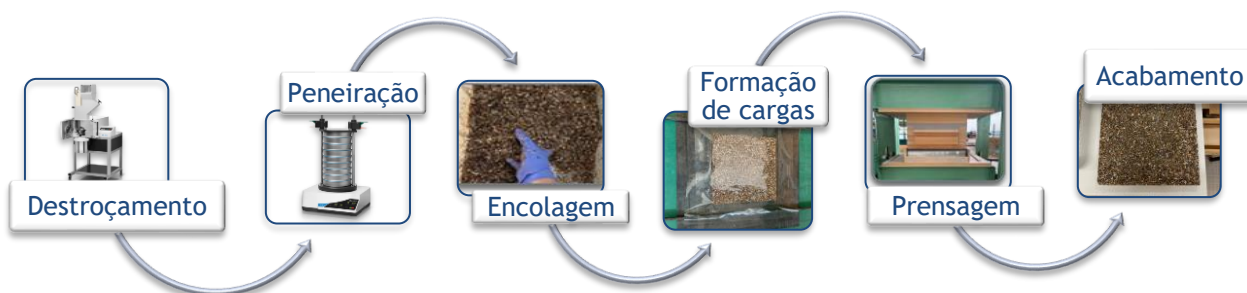


Figura 3.1 - Processo de produção dos painéis de resíduos.

3.2.1 Preparação da matéria prima

Para a produção dos painéis, a principal matéria prima utilizada são os resíduos provenientes da SURFORMA. A sua constituição engloba laminados, papel impregnado, papel seco e folhas de separativo. O estágio inicial de recolha dos mesmos ocorre através de um sistema de aspiração incorporado na indústria e posterior armazenamento.

Pelo facto dos resíduos apresentarem uma distribuição heterogénea de tamanhos, a primeira etapa consiste em preparar a matéria prima e divide-se em dois estágios: destroçamento e peneiração. Desta forma, torna-se possível separar e homogeneizar os resíduos pelas diferentes granulometrias presentes na sua constituição. Esta etapa ocorreu, na sua totalidade, no Departamento de Engenharia de Madeiras do Instituto Politécnico de Viseu (IPV), sob a supervisão do designer Nuno Ferreira e do Engenheiro Jorge Martins.

Para o destroçamento dos resíduos, utilizou-se o moinho de corte SM300 da Retsch, cujo princípio de fragmentação consiste na aplicação de forças de corte e cisalhamento. Este equipamento é adequado para o efeito pois processa, entre outros, materiais fibrosos no campo de aplicação das madeiras. Neste moinho de corte, é possível modificar 4 variáveis: a grelha a utilizar, a composição da alimentação (*Feed*), o tempo de destroçamento e a velocidade, obtendo diferentes distribuições de granulometrias. Na presente dissertação, avaliou-se o efeito da modificação da grelha utilizada e da velocidade de rotação do moinho, com o intuito de otimizar a distribuição de tamanhos obtida, minimizando a quantidade de resíduos desperdiçados. O procedimento efetuado encontra-se descrito mais à frente, ainda nesta secção. Após determinação das condições ótimas de funcionamento, o moinho de corte operou sempre à mesma velocidade de rotação, 1800 rpm com uma grelha de 10 mm, na etapa de destroçamento inicial.

Após destroçamento, procedeu-se à peneiração dos resíduos no Agitador de Peneiros AS 200 control da Retsch. Este equipamento efetua separação, fracionamento e determinação granulométrica através de um acionamento eletromagnético controlável que fornece adaptação perfeita a qualquer tipo de produto. Na presente dissertação, o agitador operou com um tempo de 3 minutos, amplitude de 1,5 mm e um intervalo de tempo de 10 segundos. Para o processo de peneiração, foram dispostos em simultâneo um prato e cinco peneiros granulométricos, com aberturas de 250 μm , 500 μm , 1 mm, 2 mm e 4 mm. Com o prato a servir de base, os peneiros foram empilhados uns sobre os outros por ordem crescente de abertura, desde a base até ao topo. Para a produção dos painéis, foram previamente estabelecidas as granulometrias a utilizar (resíduos retidos nos peneiros granulométricos de 1 mm e 2 mm). Esta escolha foi feita tendo em conta que, resíduos de granulometria inferior necessitariam de uma maior quantidade de resina e resíduos de granulometria superior a 4 mm deixariam a placa bastante porosa, o que iria afetar as propriedades mecânicas do material. De notar que, após peneiração, as partículas de granulometria superior a 4 mm não foram usadas, tendo sido novamente

submetidas ao processo de destorroamento e peneiração, mas desta vez com recurso a uma grelha de 4 mm e uma velocidade de rotação de 1800 rpm.

3.2.1.1 Otimização da etapa de preparação da matéria prima

Posto isto, com o intuito de otimizar a etapa anterior descrita, isto é, verificar quais as condições de destorroamento que minimizam a quantidade de resíduos desperdiçados e aumentam os resíduos úteis, estudou-se o efeito da modificação da grelha e da velocidade de rotação. Para tal, no que diz respeito à otimização da velocidade de rotação, manteve-se constante a grelha de 10 mm e efetuaram-se os seguintes passos, para 5 velocidades de rotação distintas (1500, 1800, 1900, 2100 e 2000 rpm):

1. Destorroamento dos resíduos;
2. Recolha dos resíduos destorroados e peneiração dos mesmos;
3. Verificação da distribuição de resíduos obtida, por granulometria;
4. Escolha da velocidade de rotação a utilizar de modo a obter o máximo de resíduos úteis para produção dos painéis (1 mm e 2 mm) e a menor quantidade de resíduos desperdiçados (250 μ m e 500 μ m).

De forma análoga aos passos acima descritos, para o estudo do efeito da grelha a utilizar, realizou-se novamente o procedimento supramencionado, mantendo desta vez constante a velocidade de rotação de 1800 rpm e fazendo variar a grelha (4 mm e 10 mm).

Todos os procedimentos aqui descritos, possibilitaram um maior aproveitamento dos resíduos para produção dos painéis. Na Figura 3.2 apresenta-se representado o moinho de corte utilizado, o peneirador e os resíduos de granulometria 1 e 2 mm.

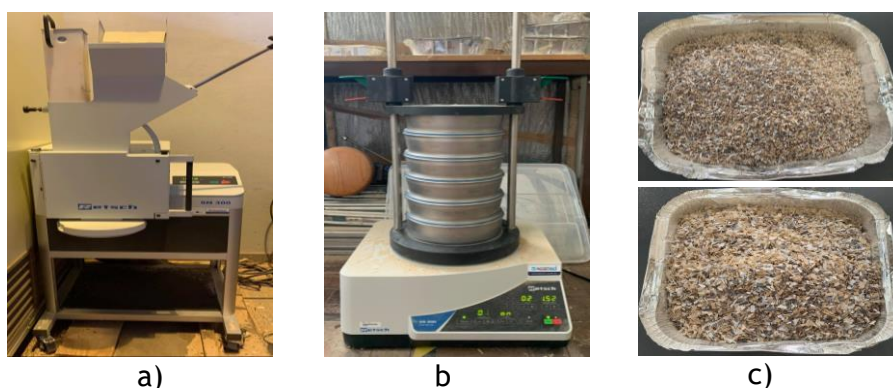


Figura 3.2 - a) Moinho de corte SM300 da Restsch; b) Agitador de peneiros AS 200 control da Retsch; c) Granulometria 1 e 2 mm.

3.2.2 Encolagem

Esta etapa consiste num processo manual de mistura dos reagentes a utilizar na produção dos painéis. Para tal, é necessário estabelecer inicialmente os parâmetros e especificações pretendidas, nomeadamente no que diz respeito à espessura, densidade,

quantidade de resíduos necessária de cada granulometria e correspondente percentagem de resina e outros aditivos.

De notar que esta etapa apresentou uma relevância extrema, pois foram realizados estudos nomeadamente no que corresponde à quantidade de resíduos a utilizar de cada granulometria e também à percentagem de resina. Desta forma, foi possível verificar quais as condições que visavam a otimização do painel relativamente à sua viabilidade de acordo com a normalização em vigor para as diferentes áreas de utilização.

A mistura dos reagentes necessários ocorre durante um intervalo de tempo previamente estipulado (4 minutos e 30 segundos), num recipiente apropriado. Na Figura 3.3 encontra-se esquematizado o processo de encolagem.



Figura 3.3 - Processo de encolagem.

3.2.3 Formação de cargas

Após o processo de encolagem, nesta etapa procede-se ao espalhamento da mistura dos resíduos com o sistema adesivo (resina e água) de forma homogênea. Para o efeito, utiliza-se um molde de madeira com as dimensões pretendidas, que facilita o processo de ligação da mistura. Posteriormente, efetua-se a preparação do painel antes da sua introdução na prensa, de acordo com o esquema indicado na Figura 3.4.

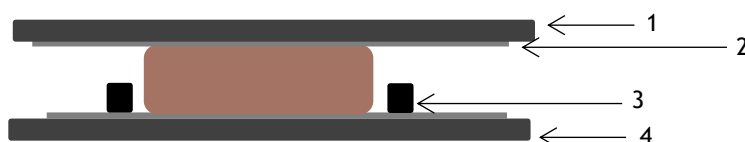


Figura 3.4 - Preparação do painel antes da sua introdução na prensa.

No processo de formação de cargas, a folha de polipropileno (2) apresenta a função de evitar a colagem dos resíduos aos pratos da prensa.

Esta etapa inicia com o posicionamento do molde de madeira sob a chapa de alimentação (4) e a folha de polipropileno o mais centrado possível. Distribuem-se os resíduos de forma uniforme no molde, pressionando-os. Retira-se posteriormente o molde de madeira e colocam-se ainda duas guias (3), que consistem em barras de aço com a função de permitir que a placa obtenha a espessura pretendida. No topo coloca-se ainda uma folha de polipropileno e uma chapa de proteção dos pratos da prensa (1). Uma vez completa a carga, coloca-se sobre o prato inferior da prensa para se proceder à prensagem propriamente dita.

Na Figura 3.5 encontra-se esquematizado o processo de formação de cargas.



Figura 3.5 - Processo de formação de cargas.

3.2.4 Prensagem

Para a realização da etapa de prensagem dos painéis, foi utilizada a prensa do Departamento de Engenharia de Madeiras do Instituto Politécnico de Viseu, sob a orientação do Designer Nuno Ferreira e do Prof. Jorge Martins.

Para iniciar a prensagem propriamente dita é necessário, *a priori*, estipular os requisitos necessários a cada ensaio, nomeadamente temperatura e tempo, tornando-se imprescindível garantir que a prensa se encontre à temperatura desejada. O controlo da pressão foi sempre efetuado por posição, através da utilização das guias esquematizadas na Figura 3.4; ou seja, não se fixou uma pressão, mas sim uma posição.

Após a prensagem, retira-se a carga, deixa-se arrefecer a placa à temperatura ambiente e por fim, realiza-se o acabamento. Na Figura 3.6 representa-se a preparação da placa para entrada na prensa, o processo de prensagem e a placa a arrefecer.

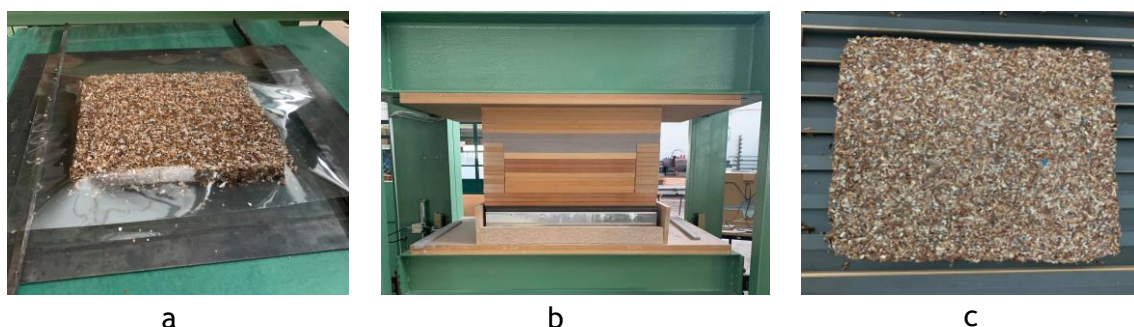


Figura 3. 6 - a) Carga formada; b) Prensagem; c) Placa após saída da prensa.

3.2.5 Acabamento

Esta é a etapa final de produção das placas e ocorre após o arrefecimento da placa (Figura 3.7) à temperatura ambiente. Nesta fase a placa é lixada, cortada em provetes de dimensões adequadas aos ensaios de caracterização e identificada com a designação pretendida para o tratamento de dados. Este processo ocorre no Departamento de Engenharia de Madeiras, do IPV, pelo Designer Nuno Ferreira, sob a supervisão do Prof. Jorge Martins.



Figura 3. 7 - Placa final.

3.3 Caracterização físico-mecânica do produto

3.3.1 Comportamento em água em ebulição

Este teste, que se enquadra na norma interna da SIR EN 438-2 (EN 438-2 2005), avalia a variação da massa e espessura dos provetes, bem como alterações na aparência da superfície, quando sujeitos a condições extremas de temperatura e humidade.

Para efetuar o ensaio são necessários 3 provetes de 50 x 50 mm e o procedimento aplicado, apresenta-se de seguida:

1. Encher um gobelé com água e colocar a aquecer numa placa de aquecimento até a água entrar em ebulição;
2. Marcar quatro pontos distintos de referência em cada provete, com o auxílio do instrumento ilustrado na Figura 3.8 e medir a espessura dos provetes nos quatro pontos marcados com um micrómetro;
3. Pesar os provetes;
4. Colocar os provetes no interior do gobelé, durante 120 minutos (Nota: embora não fazendo parte do protocolo, mais ou menos a meio do tempo estipulado, verificou-se se existia alguma mudança no aspeto físico, cor, cheiro, etc.);
5. Retirar os provetes do gobelé e colocar a arrefecer em água fria, durante 15 minutos;
6. Enxaguar o excesso de água dos provetes com um papel;
7. Pesar e medir a espessura novamente, nos locais indicados e calcular a variação de massa e espessura (Equações 1 e 2).

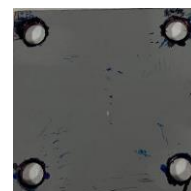


Figura 3. 8 - Instrumento auxiliar na medição de espessura.

A variação em massa, M , obtida em cada um dos provetes, é calculada segundo a Equação 1 (em %):

$$M(\%) = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

Onde m_i se refere à massa do provete antes da imersão e m_f à massa do provete após a imersão, ambas em gramas.

O inchamento em espessura, IE , de cada provete é calculado segundo a Equação 2 (em %):

$$IE(\%) = \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \times 100 \quad (2)$$

Onde ε_i se refere à espessura média do provete, antes da imersão em água e ε_f se refere à espessura média do provete, após a imersão em águas, ambas em milímetros.

Os provetes são ainda avaliados de acordo com a escala de avaliação que se encontra na Tabela 3.1.

Tabela 3. 1 - Escala de avaliação.

Grau	Descrição
1	Bolhas e/ ou delaminação
2	Alteração pronunciada de brilho e/ ou cor
3	Alteração moderada de brilho e/ ou cor
4	Alteração mínima de brilho e/ ou cor, apenas visível em certos ângulos
5	Sem alterações visíveis

3.3.2 Determinação do inchamento em espessura

Neste ensaio, que se enquadra na norma NP EN 317 2002, avalia-se de forma análoga ao ensaio de água em ebulição, a variação de espessura dos provetes em percentagem, mas em condições de temperatura e humidade diferentes.

Para efetuar o ensaio são necessários provetes de 50 x 50 mm e o procedimento aplicado, apresenta-se de seguida:

1. Medir a espessura de cada provete no ponto de interseção das diagonais das faces;
2. Imergir os provetes em água limpa, calma, com um pH de 7 ± 1 e uma temperatura de $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$;
3. Manter os provetes no recipiente com água durante 24 horas;
4. Enxaguar o excesso de água com um papel;
5. Medir a espessura de cada provete novamente, no local indicado;
6. Calcular o inchamento em espessura de cada provete.

Para este ensaio, o inchamento em espessura calcula-se através da Equação 2.

3.3.3 Determinação do teor de água

Este teste faz parte da norma NP EN 322 2002 e especifica um método para determinar o teor de água dos provetes de uma placa. Relativamente às dimensões do provete em análise, o único requisito aconselhável consiste no provete apresentar uma massa mínima inicial de 20 g. O procedimento efetuado divide-se em 3 etapas:

1. Pesagem antes da secagem;
2. Secagem numa estufa à temperatura de $(103 \pm 2) ^\circ\text{C}$, até obter uma massa constante;
3. Pesagem após secagem.

Para calcular o teor de água, H, de cada provete, em percentagem mássica, recorre-se à Equação 3.

$$H (\%) = \frac{m_a - m_b}{m_b} \times 100 \quad (3)$$

Onde m_a se refere à massa inicial do provete e m_b à massa final do provete, após secagem, ambos em gramas.

3.3.4 Determinação da massa volúmica

Este ensaio rege-se pela norma NP EN 323 2002 e é utilizado para estimar a massa volúmica de placas inteiras, através da determinação da massa volúmica como razão da massa pelo volume de cada provete, ambos medidos com o mesmo teor de água. Os provetes devem apresentar uma forma quadrada de 50 x 50 mm.

A massa volúmica, MV, de cada provete, expressa em kg/m³, é calculada através da Equação 4.

$$MV = \frac{m}{a \times b \times \varepsilon} \times 10^6 \quad (4)$$

Onde m se refere à massa do provete, em gramas, e a , b e ε correspondem nomeadamente ao comprimento, largura e espessura do provete, em milímetros.

3.3.5 Resistência à tração perpendicular ao plano

O ensaio de resistência à tração perpendicular ao plano, também conhecido como “*internal bond strength*” (IB) conforme as especificações da norma NP EN 319 2002, determina a resistência à tração perpendicular às faces de um provete, submetendo-o a uma solicitação de tração uniformemente repartida, até à rotura. Por fim, determina-se a resistência através da relação entre a carga máxima e a superfície do provete.

Os provetes a testar devem apresentar uma forma quadrada, com dimensões 50 x 50 mm, os ângulos devem ser de 90° e os bordos deverão apresentar-se direitos e limpos.

O procedimento a efetuar passa por:

1. Colar cada provete sobre o suporte do ensaio, utilizando uma cola adequada e retirar a cola em excesso, exsudada da união colada;
2. Deixar passar um período de tempo suficiente para que ocorra o endurecimento da cola, de maneira a evitar que a rotura se produza na união colada e a garantir uma distribuição homogénea de teor de água no provete;
3. Colocar o conjunto a ensaiar entre as garras de um equipamento, conectado a um computador que contém um programa adequado e aplicar um esforço de tração, até à rotura. Nesta etapa, o único parâmetro a ter em conta é a velocidade de aplicação da força, que deverá ser constante e regulada de forma a que a carga máxima seja atingida em (60 ± 30) s.

O ensaio termina quando o provete sofre rutura; no entanto, se a rotura total ou parcial ocorrer no plano de colagem suporte-provete, o ensaio deve ser rejeitado.

Para calcular o valor da resistência à tração perpendicular às faces de cada provete, IB, expressa em N·mm⁻², recorre-se à Equação 5:

$$IB = \frac{F_{m\acute{a}x}}{a \times b} \quad (5)$$

Onde $F_{m\acute{a}x}$ é a carga de rotura, em Newtons e a e b são, respetivamente, o comprimento e a largura do provete, em milímetros.

A resistência à tração perpendicular às faces de uma placa é a média aritmética dos resultados obtidos dos provetes retirados da mesma placa.

3.3.6 Método do Perforador

O método do perforador (NP EN ISO 12460-5:2017) permite determinar o teor de formaldeído de placas de derivados de madeira e não o seu nível de emissões. De uma maneira geral, é o procedimento mais utilizado para medição em painéis aglomerados e MDF na Europa e o mais requerido nas indústrias por ser mais rápido, ágil e ainda por apresentar um baixo custo de equipamento (Carvalho *et al.*, 2012) [17]. Por outro lado, apresenta o inconveniente de utilizar e consequentemente emitir elevadas quantidades de tolueno nos seus ensaios.



Figura 3. 9 - Método do perforador.

Posto isto, de acordo com a norma NP EN ISO 12460-5:2017, o teor de formaldeído é determinado recorrendo a um processo de extração com tolueno a elevadas temperaturas. Para o efeito, são necessários 110 gramas de provetes da placa submetida a teste, cortados nas dimensões 25 mm x 25 mm x espessura (mm) e colocados num balão de fundo redondo com 600 mL de tolueno em ebulição (por volta de 111 °C). Este, por sua vez, encontra-se conectado a um perforador que contém 1000 mL de água destilada. Pelo facto do formaldeído ser mais solúvel em água, este migra das pequenas gotículas de tolueno geradas na placa porosa para a fase aquosa. No total, a extração decorre durante 2 horas, iniciando-se a contagem após a passagem das primeiras bolhas pela placa de vidro poroso. Finalizada a extração, aguarda-se o arrefecimento do sistema à temperatura ambiente e separa-se a solução de água com formaldeído (mais densa) do tolueno (menos denso). A solução aquosa contida no corpo do extrator, assim como a água de lavagem e a água contida no balão do dispositivo de absorção de gases é colocada num balão de 2 L, perfazendo-se o volume com água destilada [17, 18].

O teor de formaldeído presente na solução aquosa é, por fim, determinado espectrofotometricamente pelo método da acetilacetona. Este método consiste na reação de Hantzsch, na qual o formaldeído em solução aquosa reage com os iões amónio e a acetilacetona, originando a diacetilidrolutidina (DDL). A determinação da absorvância pode ser realizada por espectroscopia UV/Vis (Ultravioleta/Visível) a 412 nm (DDL apresenta absorvância máxima a 412

nm). O teor de formaldeído (ou valor do perforador) é expresso em mg de formaldeído/ 100 g de placa seca anidra e determina-se através da Equação 6 [17, 18]:

$$\text{Valor do perforador} = \frac{(A_S - A_B) \times f \times (100 + H) \times V}{m_H} \quad (6)$$

Onde A_S é a absorvância da solução de extração analisada, A_B a absorvância de uma solução com água destilada, f é o declive da curva de calibração (mg/mL), V o volume do balão volumétrico (2000 mL), m_H a massa dos provetes e H o teor de água.

O teor de formaldeído de uma placa de madeira é o valor médio dos resultados de duas extrações que devem ser expressos com uma casa decimal.

O teor de água (H), como fração mássica da placa, é calculado pela Equação 3.

O teor de formaldeído deve ser obtido a partir de placas acondicionadas para um teor de água de referência (6,5 %). De acordo com as especificações da NP EN ISO 12460-5:2017 para aglomerado de partículas, OSB e MDF com diferentes teores de água ($3 \% \leq H \leq 10 \%$), o valor do perforador deverá ser corrigido através de um fator de correção, F , determinado pela Equação 7 [17, 18].

$$F = -0,133H + 1,86 \quad (7)$$

No caso de MDF com $4 \% \leq H \leq 9 \%$, o valor do perforador deverá ser multiplicado por um fator F , calculado pela Equação 8 [17, 18].

$$F = -0,133H + 1,86 \quad (8)$$

Para placas MDF com teores de água de $H < 4 \%$ e $H > 9 \%$, F é calculado pela Equação 9 [17, 18].

$$F = 0,636 + 3,12e^{(-0,346H)} \quad (9)$$

Este fator de correção é discutível, pois não depende apenas do teor de água das placas de derivados de madeira (Roffael e Johnsson, 2011; Carvalho *et al.*, 2012) [17, 44] e, para além disso, a sua precisão é mais reduzida quando o teor de formaldeído apresenta valores muito baixos (inferiores a 4 mg/100 g placa seca anidra).

A extração utilizada no método do perforador aumenta a velocidade de medição do teor de formaldeído das placas, mas não se pode esperar que se correlacione sempre com as emissões de formaldeído das mesmas. No entanto, o facto de que a sensibilidade do método do perforador diminui à medida que as emissões diminuem é conhecido desde a década de 1970 (Mayer, 1978; Roffael & Johnsson, 2012; Yu & Crump, 1999) [45-47].

3.3.7 Método da análise de gás

O método da análise de gás consiste num teste que permite determinar as emissões de formaldeído sob condições aceleradas, durante um período de 4 horas e uma temperatura de 60 °C. A ISO apresenta, como método de referência, a norma NP EN ISO 12460-3, onde o provete

com dimensões 400 mm x 50 mm x espessura da placa e bordos selados com folha de alumínio é colocado numa câmara de aço fechada a $(60 \pm 0,5)$ °C. A humidade relativa no interior da câmara é inferior a 3 %, o fluxo de ar presente é de (60 ± 3) L·h⁻¹ e a sobrepressão pode ir dos 1000 aos 1200 Pa. Para medir efetivamente o formaldeído contido nos provetes, este é transportado pela corrente de ar, passando por garrafas, onde ocorre a lavagem do gás. Estas garrafas contêm água destilada e a lavagem do gás consiste na absorção do formaldeído pela água, fazendo com que este permaneça em solução aquosa. Este processo ocorre durante uma hora e, decorrido esse intervalo de tempo, a corrente de ar dirige-se para o par de frascos de lavagem seguintes. Este processo ocorre até se perfazerem as 4h de teste necessárias. Após este período, o teste finaliza e as emissões de formaldeído são determinadas tendo em conta a concentração do formaldeído, o tempo de amostragem e a área exposta do corpo de prova. Assim como para os restantes métodos europeus, a concentração do formaldeído é determinada fotometricamente pelo método da acetilacetona.

No fim de cada hora de teste, o valor da análise de gás é determinado através da Equação 10, em [mg·m⁻²·h⁻¹]. O resultado final é obtido através da média de três dos valores. Considerando que na primeira hora o provete sofre aquecimento até atingir a temperatura de 60 °C, este resultado não deve constar no cálculo, salvo se este for superior aos precedentes.

$$\text{Valor da Análise de Gás} = \frac{(A_S - A_B) \times f \times V}{F} \quad (10)$$

Onde A_S representa a absorvância da solução dos frascos de lavagem, A_B a absorvância da água destilada, F a área total das superfícies de emissão (não seladas) e f o declive da curva de calibração para a solução padrão de formaldeído.

3.3.8 Resistência à flexão

Para o ensaio de resistência à flexão, de acordo com a norma NP EN 310:2002, são necessários provetes com comprimento 20 vezes superior à espessura nominal da placa (ε), acrescido de 50 mm e largura de 50 mm. Numa estufa, com humidade relativa de (65 ± 5) % e temperatura (20 ± 2) °C, acondicionam-se os provetes até obter massa constante. Após atingirem massa constante, são colocadas horizontalmente na máquina de ensaios e centradas sobre dois apoios. No centro dos provetes é aplicada uma força, a velocidade constante e a resistência à flexão é determinada, em N·mm⁻², através da Equação 11.

$$RF = \frac{3 \times F_{\text{máx}} \times l_1}{2 \times b \times \varepsilon^2} \quad (11)$$

Onde $F_{\text{máx}}$ é a carga de rotura, em Newtons, e l_1 corresponde a 20 vezes o valor da espessura.

4 Resultados e Discussão

Os objetivos cruciais da presente dissertação consistiram no desenvolvimento de soluções que permitiam otimizar as propriedades de um painel produzido através dos resíduos provenientes da SURFORMA e posterior *scale-up*. O processo de otimização efetuado teve sempre em conta, para além de outros aspetos, os interesses e necessidades por parte da fábrica, de modo a tornar viável a sua produção. Deste modo, todos os resultados obtidos visaram uma diminuição de custos e maior aproveitamento dos resíduos, verificando sempre se o produto cumpria com a normalização em vigor de acordo com as aplicações a que se destina.

4.1 Otimização das condições operatórias

Numa fase inicial de trabalho, optou-se por realizar um estudo que permitiria obter as condições de destroçamento e peneiração dos resíduos utilizados nos painéis. Consequentemente, tornar-se-ia possível proceder à otimização das mesmas, mais propriamente, escolher qual a velocidade de rotação e crivo a utilizar no destroçamento que permitiria minimizar a quantidade de resíduos desperdiçados e, consecutivamente, maximizar a quantidade de resíduos úteis à produção dos painéis. Desta forma, caso o produto se desenvolvesse até uma etapa de implementação industrial, as condições de operação estariam já afinadas.

A destroçadora em questão consegue operar a velocidades de rotação que variam entre os 1500 e os 3000 rpm e as grelhas disponíveis eram de 4 e 10 mm. Assim sendo, neste estudo foram testadas 4 velocidades distintas (1500, 1800, 2000 e 2100 rpm) e 2 grelhas (4 e 10 mm), segundo o procedimento descrito na secção anterior.

Na Figura 4.1 apresentam-se os resultados obtidos após destroçamento e peneiração dos resíduos a todas as condições de teste definidas, mantendo a grelha constante (10 mm), variando a velocidade de rotação; na Figura 4.2 apresentam-se os resultados obtidos para a velocidade de rotação otimizada (1800 rpm), fazendo variar a grelha utilizada.

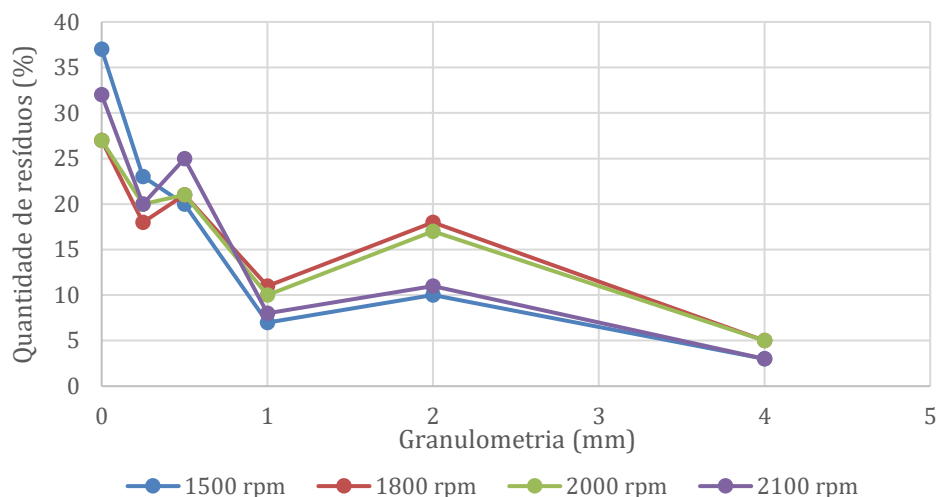


Figura 4.1 - Distribuição de resíduos, por granulometria, obtida para uma grelha constante de 10 mm.

Através da análise da Figura 4.1 é possível verificar que, operando a uma velocidade de rotação de 1800 rpm e recorrendo a uma grelha de 10 mm, a quantidade de resíduos úteis (1 e 2 mm) que se obtém, é superior. Nas mesmas condições de operação, a quantidade de resíduos desperdiçados (< 1 mm) obtida é, de uma maneira geral, inferior.

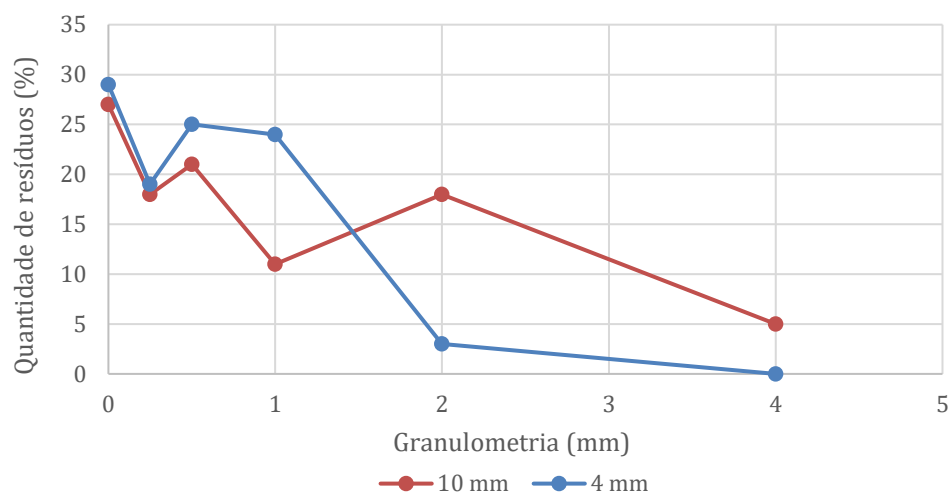


Figura 4.2 . Distribuição de resíduos, por granulometria, obtida para uma grelha constante de 10 mm.

Relativamente ao estudo do tipo de grelha utilizada, torna-se perceptível através da Figura 4.2 que, ao recorrer a uma grelha de 4 mm, a quantidade de resíduos desperdiçados é superior. Para além disso, embora se note um aumento relativamente à quantidade de resíduos de 1 mm obtida, o desfasamento entre os resíduos de 2 mm é muito significativo, produzindo-se maior quantidade quando se utiliza uma grelha de 10 mm.

Finalizado o estudo desenvolvido nesta fase inicial, foram eleitas as condições operatórias que permitiam minimizar o desperdício e maximizar os resíduos úteis para produção dos painéis, entre as quais uma velocidade de rotação de 1800 rpm e uma grelha de 10 mm.

4.2 Influência da granulometria

O estudo que se segue surge com o intuito de perceber qual a influência que diferentes distribuições de granulometria apresentam nas propriedades físicas e mecânicas do painel. Para a produção dos painéis, fixou-se uma massa volúmica de 1000 kg/m^3 , uma espessura de 16 mm e uma área de molde auxiliar de 400 cm^2 . Utilizou-se ainda 15 % de resina na composição de cada painel e 30 % de água em relação ao teor de sólidos da resina. Todos os exemplos de cálculo referentes às quantidades necessárias à produção dos painéis, de cada composto, encontram-se no Apêndice B. Os painéis foram prensados durante 20 minutos a 95°C . Foram então testadas 5 distribuições de granulometria distintas, descritas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Distribuições de granulometria das placas submetidas a teste.

ID Placa	Quantidade resíduos 1 mm (%)	Quantidade resíduos 2 mm (%)
CB - 01	50	50
CB - 02	25	75
CB - 03	75	25
CB - 04	40	60
CB - 05	60	40

Efetuaram-se cinco ensaios típicos de caracterização às placas descritas na Tabela 4.1: massa volúmica, teor de água, resistência à tração perpendicular ao plano, inchamento em espessura e resistência à água em ebulição. Dos ensaios realizados, apenas os primeiros quatro são típicos de caracterização a aglomerados de partículas, pois no ensaio de água em ebulição, os aglomerados, regra geral, têm tendência a desfazer. No entanto, no caso concreto da presente dissertação, os provetes não se desfizeram aquando deste teste, apenas se notou ao longo do ensaio o escurecer dos mesmos e um intenso cheiro a fenol. Os resultados obtidos encontram-se expressos no Apêndice C. De um modo geral, todos os painéis apresentaram um bom desempenho nos ensaios efetuados, cumprindo os requisitos mínimos da norma NP EN 312 para placas para fins não estruturais utilizadas em ambiente húmido (Tipo P3), tal como se consegue verificar através da Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Requisitos AP-P3 e propriedades das placas submetidas a teste de influência da granulometria.

Placa/ ID de provete	Espessura (mm)	IB (N/ mm ²)	Inchamento em espessura 24 h (%)
AP - P3	13-20	$\geq 0,45$	≤ 14
CB - 01	16	$0,71 \pm 0,10$	$7,9 \pm 0,7$
CB - 02	16	$0,65 \pm 0,02$	$7,9 \pm 0,1$
CB - 03	16	$0,68 \pm 0,13$	$7,1 \pm 1,0$
CB - 04	16	$0,67 \pm 0,13$	$7,5 \pm 0,4$
CB - 05	16	$0,61 \pm 0,02$	$7,4 \pm 0,1$

Ao longo da etapa de preparação da matéria prima, é notória a obtenção de quantidades superiores de resíduos de 2 mm em relação aos resíduos de 1 mm. Desta forma, nesta fase fez sentido averiguar se, em termos de consumo de matéria prima, seria mais rentável produzir painéis com maior quantidade de resíduos de 2 mm e menor de 1 mm. Sendo possível afirmar, com base nos resultados obtidos de caracterização das placas, que a distribuição granulométrica não influencia as propriedades do painel, considerou-se a hipótese de começar a produzir painéis com 60 % de resíduos de 2 mm e 40 % de resíduos de 1 mm. Verificou-se, posteriormente, que a distribuição do conjunto de resíduos úteis após peneiração é sempre, aproximadamente, 40 % 1 mm e 60 % 2 mm (Apêndice D). Desta forma, ao produzir painéis com esta distribuição, tornar-se-ia possível, na implementação industrial do produto, utilizar diretamente o material destrozado útil na produção das placas.

4.3 Redução do teor de formaldeído

Um dos fatores chave onde foi necessário atuar de modo a tornar possível a comercialização do produto, diz respeito à redução do formaldeído emitido pelas placas, com origem nas resinas melamínica e fenólica presentes nos resíduos da SURFORMA. *À priori*, não é possível afirmar diretamente qual/quais os fatores que contribuem para a libertação do formaldeído ao longo do processo de prensagem pelo que, na presente dissertação, foram consideradas possíveis abordagens capazes de atuar nesse sentido: aumento da temperatura de prensagem, aumento do tempo de prensagem e diminuição da massa volúmica dos painéis. Teve-se em consideração tais abordagens, pois como o formaldeído apresenta afinidade com a água [18], aumentando a temperatura de prensagem, promove-se a desgaseificação (libertação da água e do formaldeído); com o aumento do tempo de prensagem, da mesma forma, aumenta o tempo de desgaseificação, expulsando maiores quantidades deste gás e permitindo uma cura mais completa das resinas presentes nos resíduos; minimizando a massa volúmica, aumenta a porosidade do painel, facilitando o caminho livre para libertação da água e do formaldeído.

Até então, as placas eram prensadas a 95 °C, temperatura suficiente para garantir a cura do poliuretano [3]. No estudo da influência do aumento da temperatura de prensagem das

placas, foram produzidos inicialmente dois painéis, mantendo uma massa volúmica constante de 1000 kg/m^3 , uma área de 900 cm^2 , uma espessura de 16 mm, 15 % de resina e 30 % de água em relação ao teor de sólidos da resina. As restantes condições encontram-se descritas na Tabela 4.3. A placa CB-06 constitui uma réplica da CB-05.

Tabela 4.3 - Condições das placas produzidas no sentido de avaliar o aumento da temperatura de prensagem na redução do formaldeído.

ID Placa	Quantidade resíduos	Quantidade resíduos	Tempo (min)	Temperatura (°C)
	1 mm (%)	2 mm (%)		
CB - 06	40	60	20	95
CB - 07	40	60	20	120



Figura 4. 4 - Provete fratura pela linha de cola.

Para caracterização das placas realizaram-se os ensaios típicos, à semelhança do estudo anterior. Para além disso, analisou-se ainda o teor de formaldeído de ambas as placas. Os resultados obtidos encontram-se no Apêndice E. Os provetes apresentaram, de uma maneira geral, um bom desempenho, satisfazendo os requisitos mínimos segundo a normalização em vigor para placas para fins não estruturais utilizadas em ambiente húmido (Tipo P3) - Norma NP EN 312 (Tabela 4.4). No entanto, as placas apresentaram-se bastante densas no fim da prensagem, facto que se confirmou no ensaio de avaliação da resistência à tração perpendicular ao plano, em que os valores de IB obtidos foram elevados e o provete fraturou pela linha de cola entre o provete e o suporte (Figura 4.4). Relativamente ao ensaio do método do perforador, na fase imediatamente anterior à determinação espectrofotométrica do respetivo teor de formaldeído, foi possível verificar visualmente, que as amostras apresentavam uma cor muito intensa (Figura 4.3), o que poderia indicar a presença de uma quantidade ainda elevada de formaldeído nas placas. Tendo em conta a escassez de tempo e a situação pandémica vivida, surgiu a necessidade de mudar um pouco o rumo do estudo em questão. Isto é, após se verificar visualmente a cor intensa das amostras (Figura 4.3), optou-se por produzir placas onde seria possível avaliar, não apenas a influência de temperaturas mais elevadas na redução do teor de formaldeído, mas também de massas volúmicas mais baixas e tempos de prensagem superiores. Assim sendo, foram então produzidos de seguida mais dois painéis, mantendo constante o teor de resina, água e ainda a área e espessura anteriormente definidas. As restantes condições encontram-se descritas na Tabela 4.4.



Figura 4. 3 - Amostras teor de formaldeído.

Tabela 4.4 - Condições das restantes placas produzidas no estudo de redução do teor de formaldeído.

ID Placa	Quantidade resíduos 1 mm (%)	Quantidade resíduos 2 mm (%)	Tempo (min)	Temperatura (°C)	Massa volúmica (kg/m ³)
CB - 08	40	60	30	140	700
CB - 09	40	60	30	160	700

Ambas as placas foram sujeitas, da mesma forma, a todos os testes que se efetuam de caracterização, apresentando um bom desempenho (Apêndice E) segundo a Norma NP EN 312 para placas para fins não estruturais utilizadas em ambiente húmido (tipo P3). É de salientar, no entanto, os resultados referentes ao teor de formaldeído de todas as placas produzidas nesta fase de estudo, remetendo à Figura 4.5.

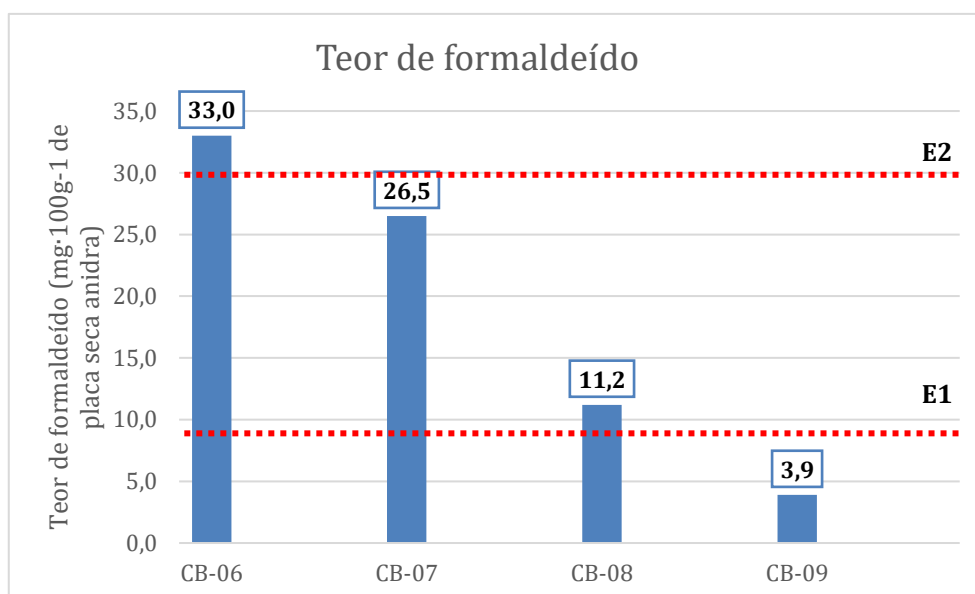


Figura 4. 5 - Teor de formaldeído das placas e comparação com os limites atualmente em vigor das classes de aglomerados E1 e E2.

Na Figura 4.5 encontram-se, então, representados os valores obtidos para o teor de formaldeído das placas e a comparação com os limites atualmente em vigor das classes de aglomerado E1 e E2 (Tabela F.1 do Anexo F).

É presumível, por análise da Figura 4.5, que para as placas que apresentam um mesmo valor de densidade e de tempo de prensagem, quanto maior a temperatura, maior a desgaseificação das mesmas (libertação do vapor de água que transporta o formaldeído). Da mesma forma e de uma maneira geral, quanto maior a temperatura, maior o tempo e menor a massa volúmica das placas, menor o teor de formaldeído. Tal seria de esperar, pois nestas circunstâncias, existe maior caminho livre para libertação do gás, temperaturas mais elevadas para promover a desgaseificação e maior tempo de prensagem que, consecutivamente, promove o aumento da libertação do formaldeído.

Posto isto retira-se, tal como seria de prever, que a placa que apresenta um teor de formaldeído ideal consoante a normalização em vigor, se produziu nas condições de temperatura mais elevada (160 °C), maior tempo de prensagem (30 min) e menor massa volúmica (700 kg/m³). As restantes propriedades mais cruciais de caracterização desta placa encontram-se descritas na Tabela 4.5, podendo afirmar que o produto desenvolvido nesta fase, para além de satisfazer todos os requisitos de AP - P3, segundo a norma NP EN 312, obedece também à normalização referente ao teor de formaldeído para as classes E1 e E2 (NP EN 312 e NP EN 13986+A1).

Tabela 4.5 - Propriedades das placas resultantes do estudo de redução do teor de formaldeído.

ID Placa	Espessura (mm)	IB (N/mm ²)	Inchamento em espessura 24 h (%)	TF (mg·100 g ⁻¹ de placa seca anidra)
AP - P3	13-20	≥ 0,45	≤ 14	-
CB - 06	16	1,46 ± 0,19	2,4 ± 1,34	33,0
CB - 07	16	1,17 ± 0,22	1,2 ± 0,28	26,5
CB - 08	16	0,61 ± 0,04	6,2 ± 0,49	11,2
CB - 09	16	0,64 ± 0,03	4,8 ± 0,35	3,90

4.4 Diminuição de custos associados

Agora que o produto já se encontra desenvolvido ao ponto de satisfazer a normalização em vigor, o passo seguinte consiste em diminuir os seus custos associados, na medida do possível. Isto é, sem comprometer o seu bom desempenho e características. Como tal, na prática, fez sentido avaliar a influência da diminuição do tempo de prensagem, do teor de resina e ainda da massa volúmica, nas propriedades do painel. Este estudo apresenta um particular interesse para a empresa, pois visa a possibilidade de desenvolver um produto que, para além de promover a economia circular e alargar o portefólio de produtos, apresenta o menor custo possível associado a matérias primas e parâmetros do processo.

4.4.1 Tempo de prensagem

A placa que serviu de ponto de partida para o estudo aqui descrito foi a CB - 09 por, como já foi referido, até então satisfazer a normalização em vigor. As características dos restantes painéis produzidos para avaliar a influência da diminuição do tempo de prensagem, encontram-se descritas na Tabela 4.6. Manteve-se constante o teor de resina, de água, a área de molde utilizado e o tempo de prensagem de 30 minutos.

Tabela 4.6 - Condições das placas produzidas no sentido de avaliar a diminuição do tempo de prensagem na redução de custos do produto final.

ID Placa	Quantidade resíduos 1 mm (%)	Quantidade resíduos 2 mm (%)	Tempo (min)	Temperatura (°C)	Massa volumica (kg/m ³)
CB - 10	40	60	25	160	700
CB - 11	40	60	20	160	700
CB - 12	40	60	15	160	700
CB - 13	40	60	10	160	700

Todas as placas supramencionadas foram sujeitas aos testes de caracterização normalmente efetuados. Os resultados obtidos encontram-se representados no Apêndice G. De uma maneira geral, todas as placas apresentaram um bom desempenho para placas AP - P3. Ao avaliar a diminuição do tempo de prensagem, é necessário enfatizar o comportamento das placas no que diz respeito à libertação do formaldeído e se, de alguma forma, este estudo influencia negativamente a resistência mecânica dos painéis. Assim sendo, na Figura 4.6 e 4.7 apresentam-se os resultados que apresentam crucial importância neste estudo, referentes ao IB e ao teor de formaldeído, respetivamente.

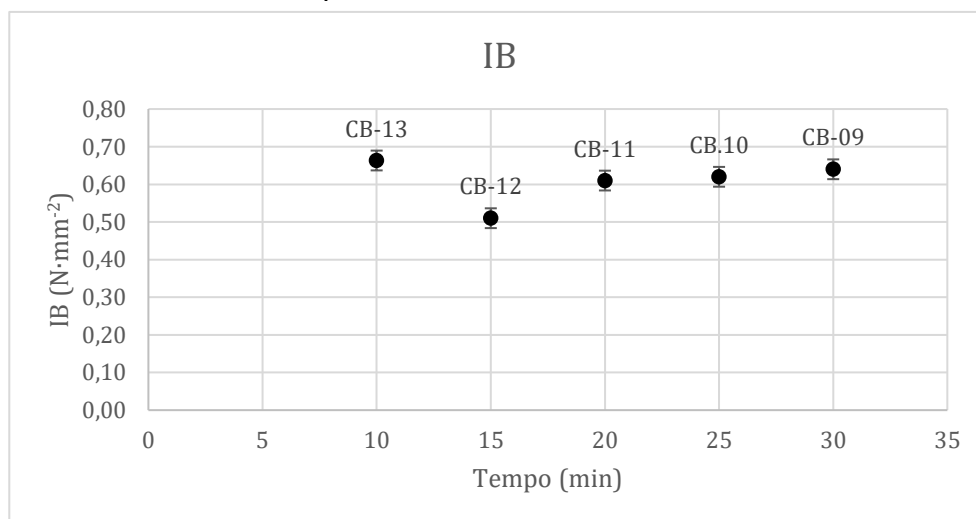


Figura 4. 6 - Resultados de IB em função do tempo de prensagem das placas.

O IB avalia a coesão interna da placa, ou seja, a ligação entre o sistema adesivo e os resíduos. Por interpretação da Figura 4.6, é plausível afirmar que os valores de IB se mantêm aproximadamente constantes com o aumento do tempo de prensagem. Poderá ainda afirmar-se, à partida, que 10 minutos será o tempo suficiente para garantir a cura da resina PU; no entanto, maiores tempos de prensagem, poderiam eventualmente promover uma maior cura das resinas presentes nos resíduos. Tal poderá efetivamente ter acontecido, uma vez que o

teor de formaldeído diminuiu nitidamente (Figura 4.7). O facto do IB não apresentar influência direta relativamente ao aumento do tempo de prensagem poderá ainda estar relacionado com a natureza flexível da resina PU. O distanciamento entre o resultado de IB da placa CB-12 e das restantes deverá justificar-se por possíveis erros ocorridos na etapa de encolagem.

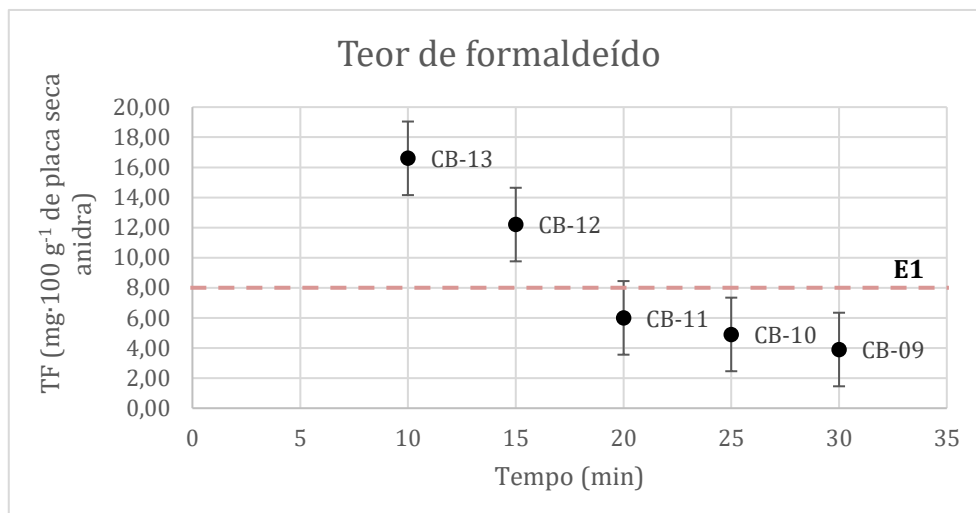


Figura 4. 7 - Resultados do teor de formaldeído em função do tempo de prensagem das placas.

Ao que tudo indica segundo a análise da Figura 4.7, o aumento do tempo de prensagem induz o aumento da ocorrência de desgaseificação, ou seja, libertação da água e do formaldeído da placa. Logo, torna-se possível inferir que o aumento do tempo de prensagem leva à diminuição do teor de formaldeído das placas. Comparando com os limites atualmente em vigor das classes de aglomerados E1 e E2, as placas CB-09, CB-10 e CB-11 são as únicas que cumprem com as especificações da classe E1 e E2. Demonstra-se assim, com este estudo, que existe possibilidade de produzir placas com menor tempo de prensagem, entre 20 e 30 min, mantendo-se o valor ótimo nos 30 minutos de prensagem.

4.4.2 Teor de resina

Até então, todas as placas tinham sido produzidas com um teor de 15 % de resina. Considerando como referência a placa CB-09 e com o intuito de analisar a influência da diminuição da resina nas propriedades do produto, foram produzidas duas placas com os teores de resina apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Condições das placas produzidas no sentido de avaliar a diminuição do teor de resina na redução de custos do produto final.

ID Provete	Quantidade resíduos 1 mm (%)	Quantidade resíduos 2 mm (%)	Teor de resina (%)	Temperatura (°C)	Massa volúmica (kg/ m³)
CB - 14	40	60	10	160	700
CB - 15	40	60	5	160	700

Das placas referidas na Tabela 4.7, a CB-15 não se apresentou coesa nem compacta, desfazendo-se manualmente, como se consegue verificar através da Figura 4.8. Esta apenas conseguiu ser sujeita ao teste de resistência perpendicular ao plano enquanto que a CB-14 foi sujeita aos testes de caracterização comumente efetuados. Os resultados obtidos encontram-se nas Tabelas H.1 e H.2 do Apêndice H.



Figura 4. 8 - Placa CB-15.

De forma análoga ao estudo referente à diminuição do tempo de prensagem, torna-se necessário averiguar o comportamento da placa relativamente ao teor de formaldeído e, principalmente, de que forma afeta a resistência mecânica da mesma. Assim sendo, nas Figuras 4.9 e 4.10 encontram-se os resultados referentes ao IB e teor de formaldeído, respetivamente, para o estudo em questão.

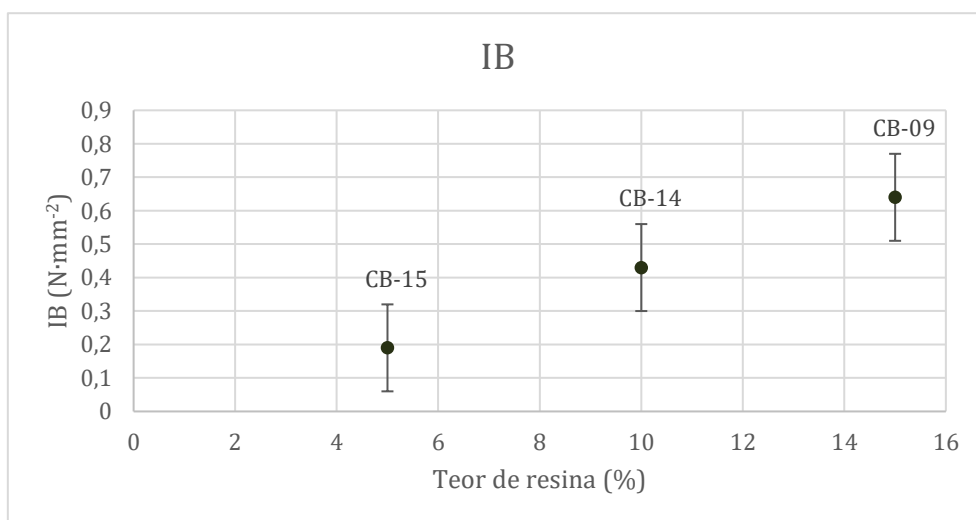


Figura 4. 9 - Resultados de IB em função do teor de resina das placas.

Da Figura 4.9, é possível inferir que à medida que se aumenta o teor de resina utilizado na produção das placas, maior é o valor de IB, o que seria de esperar, pois quanto maior o teor de resina, maior a adesão entre os resíduos e o sistema adesivo. A placa CB-14, apesar de não satisfazer os requisitos para placas para fins não estruturais utilizadas em ambiente húmido (Tipo P3), é possível afirmar que o seu valor de IB obedece aos requisitos para placas para aplicações interiores (incluindo mobiliário) utilizadas em ambiente seco (Tipo P2) - Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Requisitos e propriedades das placas resultantes do estudo de redução do teor de resina.

ID Placa	Espessura (mm)	IB (N/ mm ²)
AP - P2	13-20	≥ 0,35
CB - 14	16	0,43 ± 0,04

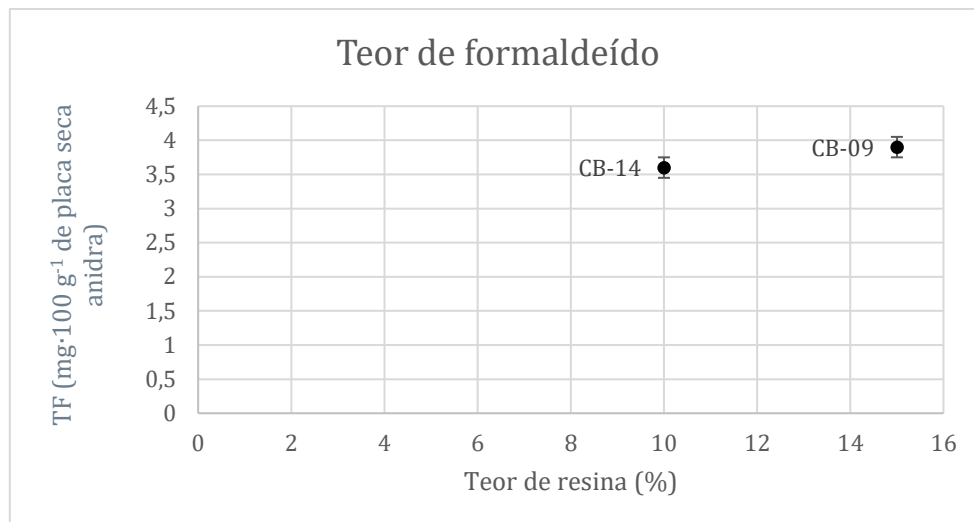


Figura 4. 10 - Resultados do teor de formaldeído em função do tempo de prensagem das placas.

Relativamente ao teor de formaldeído das placas, é possível inferir através da Figura 4.10, que os valores de ambas são bastante semelhantes. Tal seria de esperar, pois a desgaseificação da placa ao longo do processo de prensagem é independente da quantidade de resina utilizada, tendo em conta que esta não contém formaldeído na sua constituição.

Demonstra-se assim que existe possibilidade de produzir placas que cumprem com a normalização em vigor e satisfazem os requisitos mínimos de AP para aplicações interiores (incluindo mobiliário) utilizadas em ambiente seco (Tipo P2), utilizando um teor de resina inferior (10 %).

4.4.3 Massa Volúmica

De modo a estudar a possibilidade de diminuir a massa volúmica das placas, produziram-se duas placas com as condições operatórias descritas na Tabela 4.9. Manteve-se constante a quantidade de água, a área de molde utilizado e o tempo de prensagem.

Tabela 4.9 - Condições das placas produzidas no sentido de avaliar a diminuição da massa volúmica na redução de custos do produto final.

ID Placa	Quantidade resíduos 1 mm (%)	Quantidade resíduos 2 mm (%)	Teor de resina (%)	Temperatura (°C)	Massa volúmica (kg/ m ³)
CB - 16	40	60	15	160	500
CB - 17	40	60	15	160	300

Após prensagem das placas CB-16 e CB-17, verificou-se que estas não se apresentavam coesas, nem resistentes, apresentando-se maleáveis e deformáveis manualmente, conforme se verifica na Figura 4.11. Desta forma, não foi possível desenvolver provetes para submeter as placas aos testes de caracterização necessários.



Figura 4. 11 - Aspeto das placas CB-16 e CB-17.

4.5 Estudos adicionais

Ao longo do desenvolvimento prático da presente dissertação, foram surgindo algumas ideias de possíveis variantes às placas produzidas, duas das quais foram efetivamente executadas: a colocação de um papel *overlay* numa das faces da placa e a utilização de 30 % de resíduos de granulometria entre 500 μm e 1 mm.

4.5.1 Papel *overlay*

Uma das questões pertinentes relativamente ao aspeto físico da placa diz respeito à sua superfície rugosa que por vezes pode ferir o utilizador, ao ser manuseada. Foi então testada a colocação de um papel *overlay*, transparente, aquando da produção das placas CB-11, CB-12 e CB-13. O aspeto visual das placas, após a prensagem, encontra-se representado na Figura 4.12. Foi possível verificar, após finalizada a produção dos painéis, que apesar do aspeto estético não ser tão apelativo, o objetivo de suavizar a face da placa foi cumprido.



Figura 4. 12 - Aspeto das placas com papel *overlay*.

4.5.2 Implementação de resíduos de granulometria inferior

Analizou-se ainda a possibilidade de produzir uma placa com uma quantidade significativa de resíduos de granulometria entre 500 μm e 1 mm, considerando que seria uma boa opção, visto que estes resíduos se produzem em grande quantidade. Manteve-se constante a quantidade de água, a área de molde utilizado e o tempo de prensagem para a produção deste painel. As restantes condições operatórias encontram-se descritas na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Condições operatórias da placa CB-18.

ID Placa	Quantidade resíduos 1 mm (%)	Quantidade resíduos 2 mm (%)	Quantidade resíduos entre 500 μ m e 1 mm (%)	Temperatura (°C)	Massa volúmica (kg/ m ³)
CB - 18	28	42	30	160	700

A Figura 4.13 demonstra o aspeto físico da placa produzida. Foi possível verificar, após prensagem, que a placa se apresentava compacta, pouco porosa e sem rugosidade nas suas faces, não correndo risco de ferir aquando do seu manuseamento. Não foram efetuados testes de caracterização a este painel; no entanto, é possível afirmar que este produto não se apresenta tão resistente mecanicamente, dada a natureza e composição da nova granulometria de resíduos utilizada. Com esta nova variante produzida, comprova-se que existe possibilidade de obter um produto com um aspeto visual um pouco diferente, adequado para situações de menor exigência mecânica, desenvolvendo-se assim um produto de menor custo associado.



Figura 4. 13 - Aspeto visual da placa CB-18.

4.6 Scale-up

Após determinação das condições operatórias ideais para produção de uma placa que satisfaz os requisitos de aglomerados de partículas para fins não estruturais utilizadas em ambiente húmido (Tipo P3), que simultaneamente obedece à normalização em vigor para classes de aglomerados E1 e E2 relativamente ao teor de formaldeído, torna-se possível passar à fase de desenvolvimento industrial piloto da placa. A partir desta etapa, o produto passou a denominar-se ECODECOR. As condições operatórias das placas produzidas a nível piloto encontram-se representadas na Tabela 4.11, à exceção da área do molde utilizado que corresponde a 2500 cm².

Tabela 4.11 - Condições operatórias das placas produzidas na etapa de desenvolvimento industrial.

Painel	Quantidade resíduos 1 mm (%)	Quantidade resíduos 2 mm (%)	Teor de resina (%)	Temperatura (°C)	MV (kg/m ³)	Tempo de prensagem (min)
DI-01	40	60	15	160	700	30

Após a etapa de preparação da matéria prima, incluindo destroçamento e peneiração para obtenção dos resíduos, o *scale-up* divide-se em 4 estágios (Figura 4.14):

1. Encolagem;
2. Formação de cargas;
3. Prensagem;
4. Acabamento.

A linha piloto utilizada no *scale-up* do produto desta dissertação faz parte do projeto Victor - Desenvolvimento de compactos reciclados (POCI-01-0247-FEDER-045250).

Na fase inicial de desenvolvimento piloto da placa, colocam-se os resíduos e o sistema adesivo na betoneira a misturar durante 4 minutos e 30 segundos. Posteriormente, procede-se à formação do colchão que consiste em colocar a mistura, da forma mais homogênea possível, no molde de metal.

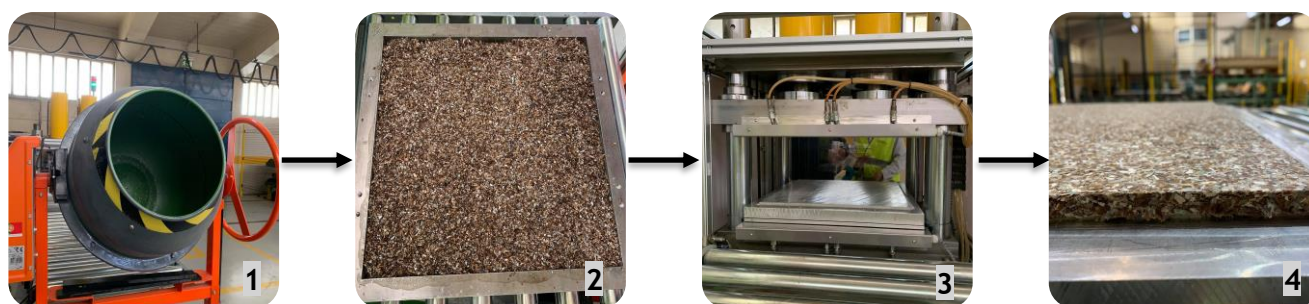


Figura 4. 14 - Estágios de produção das placas na fase de desenvolvimento industrial.

Fecha-se o molde, colocando-o de seguida no interior da prensa, que se encontra previamente à temperatura indicada, para proceder à prensagem propriamente dita. De notar que, até então, a pressão no processo de produção das placas era controlada por posição, através do auxílio de guias de aço; porém, à escala piloto, foi necessário selecionar a pressão requerida no sistema hidráulico, sendo esta de 50 bar. Passados 30 minutos, retira-se o painel da prensa e do molde. Já se torna possível, nesta fase, efetuar o acabamento.

Ao longo das primeiras 3 etapas de produção da placa a nível piloto, de um modo geral, não surgiram complicações, simplificando até o processo de mistura do sistema adesivo com os resíduos, pois este deixa de ser manual e passa a ser efetuado na betoneira. Industrialmente foi possível verificar, no final da produção das placas, que estas se apresentavam bastante compactas, pouco porosas, com ambas as faces lisas, sem risco de ferir o utilizador, que se apresenta como uma grande vantagem relativamente ao produto desenvolvido a pequena escala. Por outro lado, em todos os painéis foi notória a formação de espuma, que se libertava do molde, proveniente do possível excesso de resina que reagiu com a água presente, indicando desta forma que poderá ser efetuada uma otimização relativamente à quantidade de resina necessária e suficiente à produção dos painéis futuramente. No total foram produzidas 11 placas e foram efetuados os seguintes testes de caracterização (de modo a verificar de que

forma é que a placa se comporta em grande escala e onde será necessário atuar futuramente de modo a otimizar o produto): resistência à tração perpendicular ao plano, inchamento em espessura, massa volúmica, teor de água, água em ebulição, teor de formaldeído, teor e emissão de formaldeído e ainda resistência à flexão. Os resultados referentes à norma NP EN 312 para placas para fins não estruturais utilizadas em ambiente húmido, os de teor e de emissão de formaldeído encontram-se expressos nas Tabelas 4.12 e 4.13. Os restantes encontram-se no Apêndice I.

Tabela 4.12 - Resultados referentes à norma EN 312 para placas para fins não estruturais utilizadas em ambiente húmido.

Placa/ ID de provete	Espessura (mm)	IB (N/ mm ²)	Inchamento em espessura 24 h (%)	Resistência à flexão (N/ mm ²)
AP - P3	6-13	≥ 0,45	≤ 14	≥ 17
DI - 01	10	1,34 ± 0,17	1	13

Tabela 4.13 . Resultados referentes ao teor e emissão de formaldeído.

Placa/ ID de provete	TF (mg·100 g ⁻¹ de placa seca anidra)	Emissão de formaldeído (mg·m ⁻² ·h ⁻¹)
Método do perforador/ Análise de gás	E2: 8 < mg·100 g ⁻¹ de placa seca anidra ≤ 30 E1: ≤ 8 mg·100 g ⁻¹ de placa seca anidra	E2: 3,5 < mg·m ⁻² ·h ⁻¹ ≤ 8 E1: ≤ 3,5 mg·m ⁻² ·h ⁻¹
DI - 01	6,4	5,04

Verifica-se desta forma que, em termos industriais, no geral, a placa apresenta um bom desempenho. No entanto, o valor de IB foi elevado mas o produto não obedece às especificações da norma NP EN 312 no que se refere à resistência à flexão, como também à da classe E1 para o método de análise de gás, referente às emissões de formaldeído. Assim sendo, o passo seguinte será então proceder à otimização do produto à escala industrial.



Figura 4. 15 - Aspeto das placas desenvolvidas industrialmente.

5 Conclusões

Ao longo da presente dissertação, foram desenvolvidas soluções de otimização das propriedades de um painel produzido através de resíduos de provenientes da SURFORMA. Deste modo, tornou-se possível, para a empresa, alargar o portefólio de produtos, modificar o paradigma vigente de economia linear e promover a valorização sustentável dos seus resíduos. O produto final, denominado de ECODECOR, de um modo geral, respeitou os critérios necessários à sua comercialização.

O primeiro passo consistiu na afinação das condições operatórias das etapas de destroçamento e peneiração, responsáveis pela obtenção dos resíduos úteis à produção dos painéis. Por conseguinte, concluiu-se que as condições operatórias que minimizavam o desperdício e, consequentemente, maximizavam os resíduos úteis, são uma velocidade de rotação de 1800 rpm e uma grelha de 10 mm.

No que diz respeito à produção das placas, definiu-se que a espessura pretendida seria de 16 mm, assim como a quantidade de água presente na formulação (30 % da quantidade de resina). A resina utilizada foi um pré-polímero de poliuretano, maioritariamente por também ser utilizada numa linha piloto recente instalada na empresa.

Com o intuito de avaliar a influência de diferentes distribuições granulométricas nas propriedades do painel, foram produzidas 5 placas com distribuições granulométricas distintas (50 % 1 mm/ 50 % 2 mm, 25 % 1 mm/ 75 % 2 mm, 75 % 1 mm/ 25 % 2 mm, 40 % 1 mm/ 60 % 2 mm e 60 % 1 mm/ 40 % 2 mm). Utilizou-se 15 % de resina, fixando uma densidade de 1000 kg/m³. O tempo de prensagem foi de 20 minutos e a temperatura de 95 °C. Após realizados os testes de caracterização necessários (água em ebulição, MV, IB, IE e TA), foi possível concluir que a distribuição granulométrica não influencia as propriedades do painel, pois todas as placas apresentaram um bom desempenho, cumprindo os requisitos da norma NP EN 312 - placas para fins não estruturais utilizadas em ambiente húmido (Tipo P3). No entanto, como na etapa de preparação da matéria prima a quantidade de resíduos de 2 mm obtida é superior à de 1 mm, considerou-se mais rentável, a partir daqui, que a distribuição granulométrica dos resíduos fosse de 60 % 2 mm e 40 % 1 mm.

Devido às resinas melamínica e fenólica presentes nos resíduos libertarem quantidades de formaldeído elevados, tornou-se necessário arranjar alternativas à redução deste poluente, de modo a tornar viável a comercialização do produto. Para tal, foram produzidos dois painéis com uma densidade alvo de 1000 kg/m³, 15 % de resina e 20 minutos de prensagem, variando a temperatura de prensagem (95 °C e 120 °C), de modo a facilitar a desgaseificação do painel (libertação da água e do formaldeído). Foram ainda produzidas mais duas placas, desta vez aumentando o tempo de prensagem (30 minutos), diminuindo a densidade alvo (700 kg/ m³) e variando a temperatura (140 °C e 160 °C). Com este estudo, concluiu-se que quanto maior a

temperatura e o tempo de prensagem e menor a massa volúmica, menor o teor de formaldeído. Desta forma, a placa que apresentou um teor de formaldeído ideal consoante a normalização em vigor ($3,9 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de placa seca anidra) foi prensada a 160°C , durante 30 minutos, com uma densidade de 816 kg/ m^3 . A partir deste ponto, esta placa foi considerada como referência.

Seguidamente, com o intuito de diminuir os custos do produto, sem comprometer o seu bom desempenho e características, foram consideradas três abordagens: diminuição do tempo de prensagem, do teor de resina e da massa volúmica.

De modo a avaliar a influência referente à diminuição do tempo de prensagem, foram produzidas quatro placas partindo das condições operatórias da placa de referência, variando apenas o tempo de prensagem (10, 15, 20 e 25 min). Todas apresentaram um bom desempenho segundo a norma NP EN 312 (Tipo P3). No entanto, no que diz respeito ao teor de formaldeído, apenas as placas com tempos de prensagem entre os 20 e os 30 minutos obedeceram aos limites atualmente em vigor das classes de aglomerados E1 e E2 mantendo-se, ainda assim, o valor ótimo na placa prensada durante 30 minutos.

Relativamente ao teor de resina das placas, foram produzidas duas placas com as condições operatórias de referência, variando o teor de resina (10 % e 5 %). Concluiu-se, com este estudo, que com 5 % de resina não é possível obter uma placa coesa nem compacta e que, com 10 % de resina, a placa apenas obedece aos requisitos para placas para aplicações interiores (incluindo mobiliário) - Tipo P2, segundo a norma EN 312.

Na tentativa de diminuir a massa volúmica dos painéis, foram produzidas duas placas nas condições referência, variando a massa volúmica (300 kg/ m^3 e 500 kg/ m^3). Verificou-se que, para estes valores de massa volúmica, não é possível obter placas coesas, nem resistentes mecanicamente.

Na presente dissertação, verificou-se ainda que existe a possibilidade de colocar papel *overlay* nas faces dos painéis, com o intuito de suavizar, permitindo que o utilizador não se magoe, aquando do manuseamento das placas. Por outro lado, concluiu-se também que é possível implementar 30 % de resíduos de granulometria entre $500 \mu\text{m}$ e 1 mm na formulação dos painéis, desenvolvendo um produto para situações que exijam menor esforço mecânico, de menor custo associado e com um aspeto estético diferente.

Por fim, após obtenção de um produto de menor custo associado possível, que cumpre com os requisitos de aglomerados das classes E1 e E2 e com a normalização em vigor para fins não estruturais utilizadas em ambiente húmido (norma EN 312 - Tipo P3), o produto passou a denominar-se ECODECOR e a ser produzido à escala piloto. Os resultados de caracterização destas placas permitiram concluir que o valor de IB aumentou e que, embora no geral estas apresentem um bom desempenho, o produto não obedece à norma referente à resistência à flexão nem à classe de aglomerados E1 para o método de análise de gás, referente às emissões de formaldeído.

6 Avaliação do trabalho realizado

6.1 Objetivos Realizados

Os objetivos propostos no início da dissertação foram atingidos com sucesso, uma vez que foram colmatadas todas as limitações encontradas inicialmente (Pedro Ramos, 2020). Foi efetuada a otimização do produto, permitindo a entrada da SURFORMA em mercados nos quais ainda não opera, alargando o seu portefólio. Efetuou-se ainda a validação do produto no que diz respeito às normas e requisitos necessários, devido à sua caracterização através de testes efetuados. Adicionalmente, o produto foi ainda desenvolvido à escala piloto, permitindo a compatibilização entre o método de produção laboratorial e o processo piloto realizado na empresa.

6.2 Limitações e Trabalho futuro

A principal limitação encontrada prende-se pela pandemia que se atravessa atualmente que, na maior parte das vezes, gerava incerteza em torno do tempo disponível para realização dos objetivos propostos. Contudo, foi possível aprofundar as questões mais relevantes, de modo a garantir a viabilidade do produto. Outra questão relaciona-se com o facto do projeto se ter desenvolvido numa prensa que apenas simulava o processo piloto, surgindo discrepâncias quando se comparam certos resultados laboratoriais com os obtidos na prensa piloto, assim como o teor de formaldeído das placas. Tal poderá dever-se, entre outros aspetos, ao facto da prensa laboratorial não efetuar arrefecimento, sendo a placa retirada à temperatura de prensagem e arrefecida à temperatura ambiente. Como perspetiva futura, considera-se importante dar início a um estudo de otimização do produto à escala industrial, no sentido de colmatar erros que surgiram quando o produto passou para a fase piloto. É necessário dar ênfase à quantidade de resina e água necessárias, de modo a não se formar espuma, e ainda desenvolver metodologias que permitam a melhoria dos resultados referentes à resistência à flexão e aos valores associados ao método de análise de gás. Sugere-se ainda a verificação da reprodutibilidade de resultados obtidos e o estudo das características do painel produzido com resíduos de granulometria inferior, de modo a garantir a viabilidade do produto.

6.3 Apreciação Final

Todo o trabalho desenvolvido se considera uma experiência bastante positiva, tanto a nível profissional, como pessoal. Permitiu estabelecer contacto direto com a indústria e ambiente empresarial, apelando sempre ao sentido de responsabilidade e gosto pelo desafio. Propiciou o desenvolvimento do sentido crítico e sem dúvida que demonstrou que a resiliência é o fator chave no que diz respeito ao desenvolvimento de novos projetos. Por ser um produto pioneiro, fazer parte de todo o processo até à sua implementação à escala piloto, tornou-se uma experiência marcante que alicerçou um percurso profissional e pessoal vindouros.

7 Referências

- [1] Sonae Indústria, SA. “História.” 2020. Disponível em: <https://www.sonaeindustria.com/pt/sonae-industria/historia> (acedido a 24 de setembro de 2020)
- [2] SURFORMA, Collections. Disponível em: <https://www.surforma.com/pt/colecoes/> (acedido a 24 de setembro de 2020)
- [3] Ramos, P., 2020. Desenvolvimento De Soluções Para Valorização De Desperdícios Industriais. Dissertação de Mestrado. FEUP.
- [4] Gonçalves, L., 2018. Otimização De Compactos HPL Usando Borracha Reciclada. Dissertação de Mestrado. FEUP.
- [5] Market Key Insight and COVID-19 IMPACT ANALYSIS. *Decorative Laminates Market*. Disponível em: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/decorative-laminates-market-2363> (acedido a 26 de setembro de 2020)
- [6] Global Industrial Analysts, Inc. *Decorative Laminates*. Disponível em: <https://www.strategyr.com/market-report-decorative-laminates-forecasts-global-industry-analysts-inc.asp> (acedido a 26 de setembro de 2020)
- [7] Atualidade Parlamento Europeu. *Economia circular: definição, importância e benefícios*. Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/economy/20151201ST005603/economia-circular-definicao-importancia-e-beneficios> (acedido a 27 de setembro de 2020)
- [8] Eco.nomia. *O que é a economia circular?* Disponível em: <https://eco.nomia.pt/pt/economia-circular/estrategias> (acedido a 27 de setembro de 2020)
- [9] Henriques, A., Coelho, C., Ferra, J., Martins, J., Magalhães, F. and Carvalho, L. 2017 “Chapter 1 - Introduction of advanced functionalities in laminates for wood-based panels: surface quality evaluation. In J. Paulo Davim, Alfredo Aguilera (Eds.), *Wood Composites: Materials Manufacturing and Engineering*, pp. 1-32, Berlin: Walter de Gruyter (ISBN 978-3-11-041607-7).
- [10] Carvalho, L. H. Derivados De Madeira Para Aplicação Em Mobiliário E Construção. Slides da UC de Tecnologia dos Materiais compósitos do curso de Tecnologia e Design de Mobiliário, Instituto Politécnico de Viseu.
- [11] Thoemen, H., Irle, M., Sernek, M., 2010. *Wood-Based Panels - An Introduction For Specialists*. Londres: COST Office (ISBN 978-1-902316-82-6).
- [12] Costa, N., 2013. *Adhesive Systems For Low Formaldehyde Emission Wood-Based Panels*. Tese de Doutoramento em Engenharia Química. FEUP.

- [13] Prisacariu, C., 2011. *Polyurethane Elastomers: From Morphology to Mechanical Aspects*. NewYork: SpringerWienNewYork (ISBN 978-3-7091-0513-9)
- [14] Sharmin, E., Zafar, F., 2012. *Polyurethane*. Croatia: InTech (ISBN 978-953-51-0726-2)
- [15] The Essential Chemical Industry - online. *Polyurethanes*. Disponível em: <https://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polyurethane.html> (acedido a 9 de outubro de 2020)
- [16] American Chemistry Council. *What is Polyurethane?* Disponível em: <https://polyurethane.americanchemistry.com/What-is-Polyurethane/> (acedido a 9 de Outubro de 2020)
- [17] Carvalho, L., Magalhães, F., Ferra, J. (2012). Formaldehyde Emissions from Wood-Based Panels -Testing Methods and Industrial Perspectives. In C. B. Cheng and F. H. Ln (Eds), *Formaldehyde: Chemistry, Applications and Role in Polymerization* (pp. 73-107). Hauppauge, NY: Nova Science Publishers (ISBN 978-1-62257-228-1)
- [18] Martins, D., 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.
- [19] Hemmila, V., 2019. *Towards Low-Emitting And Sustainable Particle - And Fibreboards - Formaldehyde Emission Test Methods And Adhesives From Biorefinary Lignins*. Doctoral Dissertation, Forestry and Wood Technology, Linnaeus University, Växjö.
- [20] Popovic, M., et al. (2020). "New Standards and regulations on formaldehyde emission from wood-based composite panels". *Zastita Materijala*, 61 (2), 152-160
- [21] Salthammer, T., Mentese, S., & Marutzky, R.. (2010). "Formaldehyde in the indoor environment". *Chemical Reviews*, 110(4), 2536-2572
- [22] ECHA. *Formaldehyde*. Disponível em: <https://echa.europa.eu/pt/brief-profile/-/briefprofile/100.000.002> (acedido a 10 de outubro de 2020)
- [23] Salem, M. Z. M., Bohm, M., Barčík, S., Beránková, J. (2011). "Formaldehyde Emission from Wood-Based Panels Bonded with Different Formaldehyde-Based Resins". *DRVNA INDUSTRIJA*, 62 (3) 177-183
- [24] IARC/WHO. *IARC MONOGRAPHS ON THE IDENTIFICATION OF CARCINOGENIC HAZARDS TO HUMANS*. Disponível em: <https://monographs.iarc.fr/agentes-classificados-pelo-iacr/> (acedido a 18 de outubro de 2020)
- [25] EPA. *Formaldehyde Emission Standards for Composite Wood Products*. Disponível em: <https://www.epa.gov/formaldehyde/formaldehyde-emission-standards-composite-wood-products> (acedido a 17 de outubro de 2020)

- [26] SVEZA. *According to Stringent Standard*. Disponível em: <https://www.sveza.com/press/news/according-to-stringent-standard/> (acedido a 10 de dezembro de 2020)
- [27] SGS. *US HUD ALIGNS FORMALDEHYDE EMISSIONS FROM COMPOSITE WOOD PRODUCTS WITH EPA*. Disponível em: <https://www.sgs.com/en/news/2020/02/safeguards-02220-us-hud--aligns-formaldehyde-emissions-from-composite-wood-products-with-epa> (acedido a 18 de outubro de 2020)
- [28] FEDERAL REGISTER, 2020. *Streamlining And Aligning Formaldehyde Emission Control Standards For Certain Wood Products In Manufactured Home Construction With Title VI Of The Toxic Substance Control Act*. Washington, DC: Housing and Urban Development Department.
- [29] Directiva (UE) 2019/983, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 5 de junho de 2019, Jornal Oficial das Comunidades Europeias, L 164/23, 2019.
- [30] ECHA. *Substance Information*. Disponível em: https://echa.europa.eu/pt/substance-information/-/substanceinfo/100.000.002#REGULATORY_NAMEScontainer (acedido a 15 de outubro de 2020)
- [31] Lee, J., Kim, J., Kim, S. (2011). "Formaldehyde emission and burning behaviors from wood-based panels according to various surface finishing methods" *Proceedings of 5th International Symposium on Sustainable Healthy Buildings*, 327-334
- [32] Barry, A. Corneau, D. (2006). "Effectiveness of barriers to minimize VOC emissions including formaldehyde" *Forest Prod J*, 56(9), 38-42
- [33] Composite Panel Association, Technical Bulletin - *VOC Emission Barrier Effects of Laminates, Overlays and Coatings for Particleboard, Medium Density Fiberboard (MDF) and Hardboard* 2003
- [34] Myers, G. E. (1986). Effects of post-manufacture board treatments on formaldehyde emission: a literature review (1960-1984). *Forest Products Journal*, 36(6), 41-51
- [35] Xing, F., Lu, Z., Zhang, S. (2015) "Study on the characteristics of formaldehyde emission from MDF". *Journal of Building Materials* no.4, 688-691.
- [36] Kim, S., Kim, J., Kim, H., Lee, H., Yoon, D. (2006). "The effects of edge sealing treatment applied to wood-based composites on formaldehyde emission by desiccator test method". *Polymer Testing*, Vol. 25, 904-911
- [37] Zhang, J., Song, F., Tao, J., Zhang, Z. and Shi, S., (2018). Research Progress on Formaldehyde Emission of Wood-Based Panel. *International Journal of Polymer Science*, Vol. 2018, 1-8.
- [38] Lahr, F., Silva, D., Varanda, L. and Christoforo, A., (2012). Addition of impregnated paper residue to produce MDP wood panel: example of solid waste recycling. *International Journal of Materials Engineering*, 2(6): 75-79.

- [39] Alpár, T. and Winkler, A., (2006). Recycling of Impregnated Décor Paper in Particleboard. *Acta Silv. Lign Hung. Vol.2*, 113-116.
- [40] Çavdar, A., Yel, H., Kalaycioglu, H. and Hiziroglu, S., (2013). Effect of waste melamine impregnated paper on properties of oriented strand board. *Materials & Design*, 51, 751-755.
- [41] Ayırmis, N., (2012). Enhancement of dimensional stability and mechanical properties of light MDF by adding melamine resin impregnated paper waste. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 33, 45-49.
- [42] Fur, X., Galhac, M., Zanetti, M. and Pizzi, A., (2004). Recycling melamine-impregnated paper waste as board adhesives. *Holz als Roh - und Werkstoff*, 62(6), 419-423.
- [43] Basboga, I., Bozkurt, F., Atar, İ. and Mengeloglu, F., (2017). Different Types of Waste Melamine Impregnated Paper (MIP) in Particleboard Manufacturing. *ProLigno*, 13(1), 27-31.
- [44] Roffael, E., Johnsson, B. (2011). The perforator value in balance, Proceedings of the International Panel Products Symposium, *Llandudno*, Wales, U.K.
- [45] Mayer, J. (1978). Chemische Aspekte bei der Entwicklung formaldehydarker Klebstoffe für die Holzwerkstoffindustrie In: *Spanplatten heute und morgen*, DRW-Verlag, Stuttgart, pp.102-111
- [46] Roffael, E., & Johnsson, B. (2012). Perforator method in balance. *International Wood Products Journal*, 3, 43-50
- [47] Yu, C. W. F., & Crump, D. R. (1999). Testing for Formaldehyde Emission from Wood-Based Products - A Review. *Indoor and Built Environment*, 8, 280-286.
- [48] Gonçalves, F., Lelis, R.C., Carvalho, L.H., Souza, N., Teodoro, Â. (2017). Capítulo 6 - Emissão de Formaldeído e de Compostos Orgânicos Voláteis nas Indústrias. In Fabricio Gonçalves, Roberto Lelis, Wendel Andrade (Eds) *Engenharia Madeireira: pesquisa e produção*, Rio de Janeiro: Editora da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (ISBN 978-85-8067- 089-9)

Anexo A - Ficha Técnica Flexpur 805

Flexpur 805



FICHA TÉCNICA

DATA: JANEIRO 2014

REVISÃO: 00

DESCRIÇÃO

O Flexpur 805 é um pré-polímero de poliuretano resultante da reacção entre polióis e diisocianato de difenilmetano (MDI). Apresenta-se como um líquido castanho, transparente e sem materiais em suspensão.

APLICAÇÕES

O Flexpur 805 é destinado à produção de placas de aglomerado de borracha pelo processo de moldação.

Para a produção dos aglomerados, recomenda-se a utilização de 6 a 10 kg de Flexpur 805 por 100 kg de borracha, dependendo do tamanho e qualidade do granulado.

Para facilitar o processo de secagem da cola, pode-se adicionar água sob a forma de spray ao granulado ou proceder à injeção de vapor no interior do molde.

A temperatura do produto influencia significativamente a sua viscosidade pelo que, no momento da utilização, deverá situar-se entre 20 e 30°C, para que a mistura com o granulado seja eficiente.

ESPECIFICAÇÕES

Parâmetro	Valor
Viscosidade a 25°C [cP]	800 – 1050
Teor em NCO [%]	8,0 – 10,0

CARACTERÍSTICAS TÍPICAS

Parâmetro	Valor
Teor em sólidos [%]	> 98

Flexpur 805



FICHA TÉCNICA

DATA: JANEIRO 2014

REVISÃO: 00

ARMAZENAMENTO

O Flexpur 805 deve ser armazenado nos recipientes originais ao abrigo de humidade e da luz solar directa. Sob condições de armazenamento adequadas e quando conservado nas embalagens originais seladas, a qualidade do produto é assegurada por um período de 6 meses. A temperatura de armazenamento deverá ser mantida entre os 15 e os 30°C. Sob temperaturas muito baixas, a viscosidade aumenta significativamente, o que poderá provocar dificuldades de processamento.

Consultar a ficha de dados de segurança para informação detalhada acerca do manuseamento, armazenamento e eliminação do produto.

MANUSEAMENTO

Manusear o produto em locais com boas condições de ventilação e/ou com extracção de ar, principalmente quando usado a temperaturas elevadas. Respeitar sempre as boas práticas relativas à Higiene e Segurança durante o manuseamento de produtos químicos. Evitar o contacto com os olhos e a inalação de vapores. Evitar o contacto prolongado ou repetido com a pele.

Antes de utilizar o produto, consultar a ficha de segurança para informação detalhada sobre Higiene, Segurança e Saúde relacionada com o Flexpur 805.

EMBALAGEM

O Flexpur 805 pode ser fornecido em tambores de 225kg ou em contentores plásticos de 1000 kg.

Apêndice B - Exemplos de cálculo referentes às quantidades necessárias, de cada composto, na produção dos painéis.

1. Inicialmente define-se a massa volúmica, espessura e a área pretendidas do painel.

Exemplo:

- $MV = 1000 \text{ kg/ m}^3 = 1 \times 10^{-3} \text{ g/ mm}^3$;

- $\varepsilon = 16 \text{ mm}$;

- $\text{Área} = 40000 \text{ mm}^2$

2. Determinação da quantidade de resíduos necessária, de cada granulometria.

- Massa de resíduos total necessária (g) = $MV \times \varepsilon \times \text{Área}$

- Massa de resíduos total necessária (g) = $1 \times 10^{-3} \times 16 \times 40000 = 640 \text{ g}$

Considerando que a distribuição é 50 %/ 50 %:

- Massa de resíduos de 2 mm (g) = $0,5 \times 640 = 320 \text{ g}$

- Massa de resíduos de 2 mm (g) = $0,5 \times 640 = 320 \text{ g}$

3. Determinação da quantidade de resina necessária à formulação do painel (% m/m)
(Considerando teor de sólidos da resina de 100 %).

Supondo que se utiliza 15 % de resina (massa de sólidos de resina por massa de resíduos secos) na formulação do painel:

- Quantidade de resina necessária (g) = $0,15 \times 640 = 96 \text{ g}$

4. Determinação da quantidade de água necessária à formulação do painel (% m/m).

Supondo que se utiliza 30 % de água (em relação ao teor de sólidos da resina) na formulação do painel:

- Quantidade de água necessária (g) = $0,30 \times 96 = 28,8 \text{ g}$

Apêndice C - Resultados obtidos nos ensaios de caracterização do estudo de avaliação da influência de granulometria.

Tabela C. 1 - Resultados obtidos no ensaio de água em ebulição referente ao estudo de avaliação da influência da granulometria.

ID Placa	ID Provetes	Varição em massa (%)	Média (%)	Varição em espessura (%)	Média (%)
CB - 01	1.1	27,7	29,2 ± 1,44	10,6	10,3 ± 0,550
	1.2	29,3		10,3	
	1.3	30,6		9,90	
CB - 02	2.1	28,0	29,3 ± 1,30	10,4	9,79 ± 1,06
	2.2	29,5		10,4	
	2.3	30,6		8,60	
CB - 03	3.1	27,7	30,1 ± 2,28	9,50	9,61 ± 0,250
	3.2	32,2		9,90	
	3.3	30,6		9,50	
CB - 04	4.1	27,7	29,0 ± 1,14	10,9	10,5 ± 0,320
	4.2	29,5		10,4	
	4.3	29,9		10,3	
CB - 05	5.1	31,3	30,8 ± 1,83	10,7	10,6 ± 0,320
	5.2	32,4		10,3	
	5.3	28,8		10,9	

Tabela C. 2 - Resultados obtidos nos ensaios de IB, MV, IE e TA referente ao estudo de avaliação da influência da granulometria.

ID Placa	ID Provetes	IB (N/mm ²)	Média IB (N/mm ²)	MV (kg/m ³)	Média MV (kg/m ³)	IE (%)	Média IE (%)	TA (%)
CB - 01	1.1	0,60	0,71 ± 0,10	871	834 ± 52,7	8,0	7,9 ± 0,70	10,7
	1.2	0,75		797		7,9		
	1.3	0,78		-		-		
CB - 02	2.1	0,67	0,65 ± 0,020	834	820 ± 20,5	7,8	7,9 ± 0,10	10,9
	2.2	0,63		805		7,9		
	2.3	0,66		-		-		
CB - 03	3.1	0,76	0,68 ± 0,13	786	786 ± 0,71	6,4	7,1 ± 1,0	10,9
	3.2	0,75		785		7,8		
	3.3	0,53		-		-		
CB - 04	4.1	0,80	0,67 ± 0,13	803	807 ± 5,66	7,2	7,5 ± 0,40	10,9
	4.2	0,67		811		7,7		
	4.3	0,55		-		-		
CB - 05	5.1	0,62	0,61 ± 0,020	804	791 ± 18,4	7,4	7,4 ± 0,10	10,6
	5.2	0,63		778		7,3		
	5.3	0,59		-		-		

Apêndice D - Distribuição obtida dos resíduos úteis na etapa de preparação da matéria prima.

Tabela D. 1 - Distribuição obtida dos resíduos úteis na etapa de preparação da matéria prima.

ID Ensaio	Granulometria 2 mm (%)	Granulometria 1 mm (%)
1.1	59	41
1.2	61	39
1.3	59	41
1.4	60	40
2.1	62	38
2.2	65	35
2.3	62	38
2.4	63	37
3.1	59	41
3.2	57	43
3.3	57	43
3.4	63	37
4.1	65	35
4.2	61	39
4.3	60	40

Apêndice E - Resultados obtidos nos ensaios de caracterização do estudo de redução do formaldeído.

Tabela E. 1 - Resultados obtidos no ensaio de água em ebulição referente ao estudo de redução do formaldeído.

ID Placa	ID Provetes	Variação em massa (%)	Média (%)	Variação em espessura (%)	Média (%)
CB - 06	6.1	26,8	25,8 ± 0,860	12,8	12,0 ± 0,950
	6.2	25,5		11,5	
	6.3	25,1		11,8	
CB - 07	7.1	27,4	25,9 ± 2,93	11,9	11,7 ± 0,630
	7.2	27,8		12,1	
	7.3	22,6		11,0	
CB - 08	8.1	27,1	26,8 ± 0,294	8,53	8,09 ± 0,480
	8.2	26,6		7,56	
	8.3	26,7		8,17	
CB - 09	9.1	25,6	26,1 ± 0,548	6,35	6,02 ± 0,180
	9.2	25,9		5,93	
	9.3	26,7		5,77	

Tabela E. 2 - Resultados obtidos nos ensaios de IB, MV, IE, TA e TF referente ao estudo de avaliação da influência da granulometria referentes ao estudo de redução do formaldeído.

ID Placa	ID Provetes	IB (N/mm ²)	Média IB (N/mm ²)	MV (kg/m ³)	Média MV (kg/m ³)	IE (%)	Média IE (%)	TA (%)	TF (mg·100g ⁻¹ de placa seca anidra)
CB - 06	6.1	1,33	1,46 ± 0,192	1162	1144 ± 26,16	1,4	2,4 ± 1,3	10,2	33,0
	6.2	1,37		1125		3,3			
	6.3	1,68		-		-			
CB - 07	7.1	1,00	1,17 ± 0,221	1176	1174 ± 3,536	1,0	1,2 ± 0,3	7,3	26,5
	7.2	1,09		1171		1,4			
	7.3	1,42		-		-			
CB - 08	8.1	0,59	0,61 ± 0,038	802	801 ± 1,41	6,5	6,2 ± 0,5	5,5	11,2
	8.2	0,65		800		5,8			
	8.3	0,58		-		-			
CB - 09	9.1	0,67	0,64 ± 0,030	812	816 ± 4,95	4,5	4,8 ± 0,4	4,5	3,90
	9.2	0,61		819		5,0			
	9.3	0,64		-		-			

Anexo F - Limites atualmente em vigor para as emissões de formaldeído.

Tabela F. 1 - Valores limite de emissão de formaldeído e teor de formaldeído, consoante o método de ensaio aplicado.

Região	Norma Padrão	Método de ensaio	Classe da Placa	Tipo de Placa	Valor Limite
Europa	EN13986	Perforador NP EN ISO 12460-5	E2	PB, OSB e MDF (não revestido)	$8 < \text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de placa seca ≤ 30
		Análise de Gás NP EN ISO 12460-3		PW, SWP e LVL (não revestido) PW, PB, OSB, MDF, LVL (e outros) revestido	$3,5 < \text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \leq 8$
		Perforador NP EN ISO 12460-5	E1	PB, OSB e MDF (não revestido)	$\leq 8 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de placa seca
		Análise de Gás NP EN ISO 12460-3		PW, SWP e LVL (não revestido) PW, PB, OSB, MDF, LVL (e outros) revestido	$\leq 3,5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$

Apêndice G - Resultados obtidos nos ensaios de caracterização do estudo da influência da diminuição do tempo de prensagem.

Tabela G. 1 - Resultados obtidos no ensaio de água em ebulição referente ao estudo de diminuição do tempo de prensagem.

ID Placa	ID Provetes	Variação em massa (%)	Média (%)	Variação em espessura (%)	Média (%)
CB - 10	10.1	32,7	30,9 ± 1,65	7,03	6,31 ± 0,693
	10.2	29,5		6,26	
	10.3	30,4		5,64	
CB - 11	11.1	28,2	29,6 ± 1,61	5,60	6,00 ± 0,378
	11.2	31,4		6,35	
	11.3	29,3		6,06	
CB - 12	12.1	38,0	38,3 ± 0,742	8,78	8,55 ± 1,02
	12.2	37,7		9,44	
	12.3	39,1		7,44	
CB - 13	13.1	35,5	35,2 ± 0,314	9,47	9,80 ± 0,435
	13.2	34,9		9,64	
	13.3	35,3		10,3	

Tabela G. 2 - Resultados obtidos nos ensaios de IB, MV, IE, TA e TF referente ao estudo da diminuição do tempo de prensagem.

ID Placa	ID Provetes	IB (N/mm ²)	Média IB (N/mm ²)	MV (kg/m ³)	Média MV (kg/m ³)	IE (%)	Média IE (%)	TA (%)	TF (mg·100g ⁻¹ de placa seca anidra)
CB - 10	10.1	0,53	0,61 ± 0,080	822	809 ± 18,4	5,1	5,0 ± 0,10	5,3	6,00
	10.2	0,69		796		4,9			
	10.3	0,61							
CB - 11	11.1	0,55	0,62 ± 0,060	812	799 ± 18,4	4,1	4,1	4,5	4,90
	11.2	0,65		786		4,1			
	11.3	0,66							
CB - 12	12.1	0,52	0,51 ± 0,017	787	772 ± 21,2	7,2	6,5 ± 1,0	5,5	12,2
	12.2	0,49		757		5,8			
	12.3	0,52							
CB - 13	13.1	0,71	0,66 ± 0,057	823	828 ± 6,36	6,9	6,9	6,2	16,6
	13.2	0,60		832		6,9			
	13.3	0,68							

Apêndice H - Resultados obtidos nos ensaios de caracterização do estudo da influência da diminuição do teor de resina.

Tabela H. 1 - Resultados obtidos no ensaio de água em ebulição referente ao estudo de diminuição do teor de resina.

ID Placa	ID Provetes	Variação em massa (%)	Média (%)	Variação em espessura (%)	Média (%)
CB - 14	14.1	23,4	23,2 ± 0,660	5,78	5,16 ± 0,660
	14.2	23,8		4,46	
	14.3	22,4		5,26	

Tabela H. 2 - Resultados obtidos nos ensaios de IB, MV, IE, TA e TF referente ao estudo da diminuição do teor de resina.

ID Placa	ID Provetes	IB (N/mm ²)	Média IB (N/mm ²)	MV (kg/m ³)	Média MV (kg/m ³)	IE (%)	Média IE (%)	TA (%)	TF (mg·100g ⁻¹ de placa seca anidra)
CB - 14	14.1	0,39	0,43 ± 0,035	735	686 ± 70,0	4,3	4,2 ± 0,20	4,2	3,6
	14.2	0,45		636		4			
	14.3	0,45		-		-			
CB - 15	15.1	0,2	0,19 ± 0,021	-	-	-	-	-	-
	15.2	0,21		-		-			
	15.3	0,17		-		-			

Apêndice I - Resultados obtidos nos ensaios de caracterização da placa proveniente do *scale-up*.

Tabela I. 1 - Resultados obtidos no ensaio de água em ebulição referente ao *scale-up* do produto.

ID Placa	ID Provetes	Variação em massa (%)	Média (%)	Variação em espessura (%)	Média (%)
DI - 01	1.1	23,7	21,9 ± 1,12	8,72	7,80 ± 1,58
	1.2	11,6		6,43	
	1.3	28,7		8,46	
	1.4	26,9		8,65	
	1.5	18,8		6,73	

Tabela I. 2 - Resultados obtidos nos ensaios de MV e TA referente ao *scale-up* do produto.

ID Placa	ID Provetes	MV (kg/ m ³)	Média MV (kg/ m ³)	TA (%)
DI - 01	1.1	1266	1275 ± 11,45	6,8
	1.2	1284		
	1.3	1285		