



M 2019

**U. PORTO**  
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE DO PORTO

# **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DO FOIL E DAS CONDIÇÕES OPERATÓRIAS NO PROCESSO DE LAMINAÇÃO**

**ANA SOFIA MAIA DE SOUSA**  
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA  
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM  
ENGENHARIA QUÍMICA

---

# Mestrado Integrado em Engenharia Química

## *Estudo da influência das propriedades do foil e das condições operatórias no processo de laminação*

### Dissertação de Mestrado

de

Ana Sofia Maia de Sousa

Desenvolvida no âmbito da unidade curricular de Dissertação

realizado em

**IKEA Industry Portugal, Lda**



IKEA Industry  
Paços de Ferreira

Orientador na FEUP: Professora Luísa Hora de Carvalho

Coordenador na IKEA Industry Portugal: Engenheiro Luís Pedro Ribeiro



**Departamento de Engenharia Química**

agosto de 2019

---

## Agradecimentos

A realização deste trabalho é o culminar de uma das etapas mais importantes da minha vida. Uma etapa que resulta de um enorme esforço individual, mas muitas vezes, coletivo. Desta forma, gostava de agradecer, não só às pessoas que contribuíram para a elaboração deste projeto, mas também homenagear todos aqueles que me acompanharam ao longo deste caminho que aqui termina.

Em primeiro lugar, gostava de agradecer à Professora Doutora Luísa Hora de Carvalho, ao Doutor Jorge Martins e ao Engenheiro Luís Ribeiro, por toda a disponibilidade, apoio e orientação ao longo de todo o estágio, que permitiram a realização de um trabalho tão enriquecedor. Uma palavra de apreço a toda a equipa do laboratório DeMad/IPV, em especial à Margarida Almeida por todo o apoio que me deram.

Um agradecimento especial ao Engenheiro José Soares, por toda a confiança depositada em mim, por todo o apoio, orientação e partilha de conhecimento que foram essenciais para o meu crescimento como pessoa e profissional, ao longo deste projeto.

A toda a equipa do departamento de processos pela calorosa receção, pela forma amigável como sempre me trataram e por todo o apoio recebido ao longo destes meses. Um especial agradecimento ao João Tomé pela pessoa incrível que demonstrou ser e pela permanente disponibilidade para me ajudar. Foi um enorme prazer trabalhar com esta equipa incrível.

A todos os colaboradores da IKEA *Industry* Portugal que, de alguma forma me ajudaram. Em especial ao Rui Sousa, ao Joel Teixeira e à equipa de produção da *Complete Line* e *Pré-Coating*, por toda a disponibilidade e partilha de conhecimentos.

À incrível companheira desta aventura, Emanuela, pela amizade, companheirismo, pelo apoio e motivação ao longo deste trabalho.

A todos os meus amigos, em especial à Marta, que me acompanhou ao longo destes 5 anos. Sem vocês nada disto teria sido possível.

Ao Pedro pela longa amizade, paciência, apoio e incentivo ao longo desta jornada.

Por fim, às pessoas mais importantes da minha vida, à minha família. Aos meus pais pela educação que me proporcionaram, por todas as oportunidades e por me darem liberdade de escolha em todas as fases da minha vida. Obrigada por todo o amor e carinho, por me deixarem sonhar e lutar pelos meus objetivos. Aos meus irmãos, João e Afonso, por me acompanharem desde sempre, não há amor como o nosso.

A todos, o meu sincero obrigada.

---

Este trabalho foi financiado por: Unidade de Investigação UID/EQU/00511/2019 - Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia - LEPABE - financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

A Prof.<sup>a</sup> Luísa H. Carvalho, orientadora desta dissertação, é membro integrado do LEPABE - Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente Biotecnologia e Energia, financiado por: Unidade de Investigação UID/EQU/00511/2019 - Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia (LEPABE) e por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).





## Resumo

Este trabalho foi realizado no âmbito da unidade curricular Dissertação de Mestrado, em ambiente empresarial, na *IKEA Industry Portugal* e, teve como objetivo o estudo da influência das propriedades do *foil* e das condições operatórias no processo de laminação. A secção *Foil&Wrapping* é a maior responsável pela produção de sucata no fluxo *Foil*, sendo o problema de *foil* colado entre camadas e o aparecimento de bolhas na lateral dos painéis pontos críticos nesta secção.

O problema de *foil* colado entre camadas está diretamente relacionado com a interação do adesivo com a face do revestimento (superfície exterior) e ocorre apenas nos produtos *White Gloss 10* do fornecedor X. Para o estudo deste problema procedeu-se à avaliação da influência de variáveis como a temperatura, a pressão, o tempo de prensagem e a redução da gramagem e à análise do impacto da variação das propriedades das matérias-primas, como a energia livre de superfície e rugosidade. Pelos testes realizados foi possível concluir que a face exterior dos produtos do fornecedor X não apresenta características adequadas para um bom desempenho da função pretendida, uma vez que as propriedades desta face do *foil* são favoráveis à adesão do *hotmelt*. Visto que a *IKEA Industry Portugal* não tem capacidade para alterar quimicamente o revestimento, é importante a colaboração do fornecedor para proceder à alteração das características do produto, melhorando o seu desempenho.

O aparecimento de bolhas na lateral do painel é um problema crítico nos elementos de maior espessura e está associado à má colagem da lateral. Realizaram-se ensaios de DMA (Análise Mecânica Dinâmica) e DSC (Calorimetria Diferencial de Varrimento) que permitiram identificar possíveis anomalias nos adesivos que constituem a lateral do painel. Os testes realizados indicaram que a cola intermédia, quando adquire temperaturas inferiores a 130 °C, modifica a sua estrutura e, por consequência passa de um material cristalino a amorfo. Desta forma, é essencial garantir que a temperatura de equilíbrio na interface entre a cola intermédia e o *filler* seja superior a 130 °C. Além disso, o método DSC demonstrou que o calor específico da cola intermédia era significativamente superior ao do *filler*, sendo esta condição essencial para a obtenção de uma boa colagem. À escala industrial, comprovou-se que a colagem adequada da lateral do painel era conseguida através do aumento da temperatura do *filler* antes do contacto com a cola intermédia.

**Palavras-chave:** *foil*, *blocking*, adesivos, bolhas, laminação

---



## Abstract

This study was developed as part of the Master's Dissertation, in business environment, in IKEA Industry Portugal and the objective was to understand the influence of foil properties and operation conditions in the lamination process. The Foil&Wrapping section is the biggest responsible for the production of scrap in the foil flux, the problem is the blocking and the appearance of bubbles on the side of the panels, critical points in this section.

The blocking problem is directly involved with the interaction of the adhesive with the side of the decorative paper (outsider surface) and it happens only in the White Gloss 10 products of the X supplier. For this problem, it was important to study the influence of variables such as temperature, pressure, crushing time, glue amount and the impact of the raw material property such as surface free energy and roughness. With this tests, it was possible to conclude that the outsider surface of the products from the supplier X does not present the appropriate characteristics for a good performance, once that the properties of this side of the foil are favourable of the hotmelt. Since the IKEA Industry Portugal is not able to chemically change the coating, the collaboration from the supplier is important to change the product's characteristic, improving the performance.

The appearance of bubbles on the side is a critical problem with thicker products and is associated with bad gluing process on the side. The DMA (Dynamic Mechanical Analysis) and DSC (Differential Scanning Calorimetry) tests were made and allowed to identify possible problems with adhesives applied on the side of the panel. The tests showed that the intermediate glue, when is on temperatures below 130 °C, modifies its structure and, by consequence, the crystalline material becomes amorphous. This way, it is essential to guarantee that the temperature between the intermediate glue and the filler is superior to 130 °C. In addition, the DSC method showed that the specific heat of the intermediate glue was significantly superior to the filler, this condition is essential to achieve a good gluing process. On an industrial scale, it was possible to prove that the right gluing on the lateral of the panel was obtained through the heat increase of the filler before the contact with the intermediate glue.

**Key words:** foil, blocking, adhesive, bubbles and lamination

---





## 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.

---

# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1	<b>Enquadramento e Apresentação do Projeto .....</b>	<b>1</b>
1.1.1	Apresentação da empresa .....	1
1.1.2	Influência das propriedades do <i>foil</i> e das condições operatórias no processo de laminação	2
1.2	<b>Contributos do Trabalho.....</b>	<b>4</b>
1.3	<b>Organização da Tese .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Contexto e Estado da Arte .....</b>	<b>5</b>
2.1	<b>Processo produtivo BoF.....</b>	<b>5</b>
2.1.1	Fluxo <i>Foil</i> .....	5
2.2	<b>Processo produtivo secção <i>Foil&amp;Wrapping</i> .....</b>	<b>7</b>
2.2.1	<i>Pré-Coating</i> .....	7
2.2.2	<i>Complete Line</i> .....	8
2.3	<b>Matérias-primas .....</b>	<b>10</b>
2.3.1	Painéis sandwich .....	10
2.3.2	Folhas de acabamento de decoração .....	12
2.3.3	Adesivos <i>hotmelt</i> .....	13
<b>3</b>	<b>Materiais e Métodos .....</b>	<b>16</b>
3.1	<b><i>Foil</i> colado entre camadas .....</b>	<b>16</b>
3.1.1	Sistema de avaliação automático de colagem (ABES) .....	16
3.1.2	Determinação da rugosidade.....	17
3.1.3	Determinação da tensão superficial .....	19
3.2	<b>Bolhas na lateral do painel.....</b>	<b>22</b>
3.2.1	Análise Mecânica Dinâmica (DMA).....	22
3.2.2	Calorimetria Diferencial de Varrimento (DSC).....	23
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussão.....</b>	<b>25</b>
4.1	<b><i>Foil</i> colado entre camadas .....</b>	<b>25</b>
4.1.1	Avaliação da influência da temperatura .....	26
4.1.2	Avaliação da influência redução da gramagem de <i>hotmelt</i> aplicada.....	28

4.1.3	Avaliação da influência da pressão e do tempo de prensagem .....	30
4.1.4	Determinação da energia livre de superfície.....	34
<b>4.2</b>	<b>Bolhas na lateral do painel .....</b>	<b>38</b>
4.2.1	Análise Mecânica Dinâmica (DMA).....	38
4.2.2	Calorimetria Diferencial de Varrimento (DSC).....	43
<b>5</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>Avaliação do trabalho realizado.....</b>	<b>47</b>
6.1	Objetivos Realizados .....	47
6.2	Apreciação Final .....	47
	Referências .....	48
	Anexo A - <i>Layout</i> da secção <i>Foil&amp;Wrapping</i> .....	51
	Anexo B - ABES .....	52
	Anexo C - Avaliação da influência da temperatura.....	53
	Anexo D - Avaliação da influência da redução da gramagem.....	54
	Anexo E - Avaliação da influência da pressão e do tempo de prensagem.....	55
	Anexo F - Determinação da tensão superficial.....	57
	Anexo G - Calorimetria Diferencial de Varrimento.....	58

# Índice de figuras

<i>Figura 1 - Layout das instalações da IKEA Industry Portugal (adaptado de Ikea Industry Portugal).</i>	.....2
<i>Figura 2 - Etapas dos fluxos Foil e Lacquering &amp; Print, do polo BoF.</i>	.....5
<i>Figura 3 - Exemplos de produtos do fluxo Foil (adaptado de Ikea Group).</i>	.....6
<i>Figura 4 - Etapas de construção dos painéis BoS (adaptado de Ikea Industry Portugal).</i>	.....6
<i>Figura 5 - Estrutura dos painéis BoS.</i>	.....6
<i>Figura 6- Rolo com problema de blocking.</i>	.....8
<i>Figura 7 - Ilustração das superfícies do foil.</i>	.....8
<i>Figura 8 - Peça com o defeito de bolhas na lateral.</i>	..... 10
<i>Figura 9 - Provetes utilizados nos ensaios do equipamento ABES.</i>	..... 16
<i>Figura 10-Rugosidade média aritmética (Gadelmawla, 2002).</i>	..... 18
<i>Figura 11-Média aritmética dos valores máximos no perfil de rugosidades, Rz (Gadelmawla, 2002).</i>	.. 19
<i>Figura 12 - Perfil de uma gota de líquido numa superfície sólida (adaptado de Pereira, 2017).</i>	..... 20
<i>Figura 13 - Medição da tensão superficial utilizando marcadores de teste, a) tensão superficial do foil superior à do marcador e b) tensão superficial do foil inferior à do marcador.</i>	..... 22
<i>Figura 14- Esquematização dos testes realizados no equipamento ABES.</i>	..... 26
<i>Figura 15 -Variação da força de rutura em função da temperatura, determinada no equipamento ABES.</i>	..... 26
<i>Figura 16 - Representação gráfica da variação da força de rutura em função da temperatura, para diferentes gramagens de hotmelt.</i>	..... 29
<i>Figura 17 - Variação da força de rutura em função do tempo de prensagem para diferentes pressões, determinada no ABES.</i>	..... 31
<i>Figura 18 - Pseudo constante cinética de envelhecimento.</i>	..... 32
<i>Figura 19 - Envelhecimento máximo dos revestimentos testados.</i>	..... 32
<i>Figura 20 - Papel indicador de pressão.</i>	..... 33
<i>Figura 21 - Papel indicador de temperatura.</i>	..... 33
<i>Figura 22 - Simulação no equipamento ABES das condições reais de pressão e temperatura na linha.</i>	.. 33
<i>Figura 23 - Variação do parâmetro Ra nas superfícies A e B dos foils testados.</i>	..... 34
<i>Figura 24 - Variação do parâmetro Rz nas superfícies A e B dos foils testados.</i>	..... 34
<i>Figura 25- Ilustração da constituição da lateral do painel.</i>	..... 38
<i>Figura 26 - Módulo de elasticidade (DMA) do filler utilizado na Complete Line.</i>	..... 39

<i>Figura 27 - Módulo de elasticidade (DMA) do hotmelt aplicado ao foil. ....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 28 - Módulo de elasticidade da cola intermédia utilizada no processo da Complete Line. ....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 29 - Ilustração do problema de aparecimento de bolhas na lateral do painel. ....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 30 - Variação do calor específico em função da temperatura (DSC) para o filler e para a cola intermédia. ....</i>	<i>43</i>
<i>Figura A. 1- Layout da secção Foil&amp;Wrapping. ....</i>	<i>51</i>
<i>Figura B. 1- Vista de frente do equipamento ABES. ....</i>	<i>52</i>
<i>Figura B. 2 - Vista de cima do equipamento ABES. ....</i>	<i>52</i>
<i>Figura G. 1 -Análise DSC realizada ao filler. ....</i>	<i>58</i>
<i>Figura G. 2 - Análise DSC realizada à cola intermédia. ....</i>	<i>58</i>

# Índice de tabelas

<i>Tabela 1- Principais características dos revestimentos utilizados no IKEA Industry Portugal.....</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 2- Registo dos valores padrão das variáveis do equipamento ABES. ....</i>	<i>17</i>
<i>Tabela 3- Registo dos valores de tensão superficial e respetivas componentes polar e dispersiva dos líquidos de teste. ....</i>	<i>21</i>
<i>Tabela 4-Principais características dos foils em teste.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 5 - Registo dos valores de pressão testados no equipamento ABES. ....</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 6 - Registo dos valores obtidos para a energia livre de superfície pelo método dos marcadores de teste.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 7 - Registo dos valores das componentes polar e dispersiva e da respetiva energia livre de superfície para os foils testados. ....</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 8 - Resultados obtidos no teste de produção na Complete Line. ....</i>	<i>42</i>
<i>Tabela C. 1 - Registo dos valores de força média de rutura obtidos para a colagem entre a superfície A e a superfície B com cola dos foils analisados. ....</i>	<i>53</i>
<i>Tabela C. 2 - Registo dos valores de força média de rutura obtidos para a colagem entre a superfície B sem cola e a superfície B com cola dos foils analisados. ....</i>	<i>53</i>
<i>Tabela D. 1-Registo dos valores médios de gramagem. ....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela D. 2 - Registo dos valores de força média de rutura obtidos nos ensaios realizados relativos à redução de gramagem para a colagem entre a superfície A e a superfície B com cola. ....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela D. 3 - Registo dos valores de força média de rutura obtidos nos ensaios realizados relativos à redução de gramagem para a colagem entre a superfície B sem cola e a superfície B com cola. ....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela E. 1-Registo dos valores de força média de rutura obtidos para os ensaios realizados à pressão de 2,5bar. ....</i>	<i>55</i>
<i>Tabela E. 2 -Registo dos valores de força média de rutura obtidos para os ensaios realizados à pressão de 1,25bar.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabela E. 3 -Registo dos valores obtidos nos ensaios realizados com as condições reais de pressão e temperatura. ....</i>	<i>56</i>
<i>Tabela F. 1 - Registo dos valores obtidos para o parâmetro Ra e os respetivos desvios padrões. ....</i>	<i>57</i>
<i>Tabela F. 2 - Registo dos valores obtidos para o parâmetro Rz e os respetivos desvios padrões.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabela F. 3 - Registo dos valores dos ângulos de contacto obtidos para a superfície A.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabela F. 4 - Registo dos valores dos ângulos de contacto obtidos para a superfície B. ....</i>	<i>57</i>

## Notação e Glossário

$A$	Área	mm
$Ra$	Rugosidade média aritmética	$\mu\text{m}$
$Rz$	Média aritmética dos valores máximos no perfil de rugosidades	$\mu\text{m}$
$lm$	Comprimento de amostragem	mm
$y$	Altura do perfil de rugosidades	$\mu\text{m}$
$x$	Coordenada na direção do movimento do rugosímetro	
$p_i$	Altura dos pontos máximos do perfil de rugosidades	$\mu\text{m}$
$v_i$	Altura dos pontos mínimos do perfil de rugosidades	$\mu\text{m}$
$E'$	Módulo de elasticidade	MPa
$E''$	Módulo de perda de energia	MPa
$T$	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
$C_p$	Calor específico	$\text{W}\cdot\text{g}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$
$k$	Pseudo constante cinética de envelhecimento	$\text{s}^{-1}$
$P$	Pressão	bar

### Letras gregas

$\theta$	Ângulo de contacto	$^{\circ}$
$\gamma$	Energia livre de superfície	$\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$
$\tan \delta$	Rácio entre o módulo de perda de energia e o módulo de elasticidade	

### Lista de Siglas

ABES	Automated Bonding Evaluation System
ARCP	Associação Rede de Competência em Polímeros
BoF	Board on Frame
BoS	Board on Style
CPL	Continuous Pressure Laminate
DMA	Dynamic Mechanical Analysis
DSC	Differential Scanning Calorimetry
EVA	Ethylene-Vinyl Acetate
FY18	Fiscal Year 2018
HDF	High Density Fiberboard
HPL	High Pressure Laminate
IIID	Industry Investment & Development
IKEA	Ingvar Kamprad Elmtaryd Agunnaryd
IPV	Instituto Politécnico de Viseu
LDF	Low Density Fiberboard
LEPABE	Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia
MDF	Medium Density Fiberboard
ORWK	Owens, Wendt, Rabel e Kaelbel
PB	Particleboard
PFF	Pigment Furniture Factory
PVAc	Polyvinyl-Acetate
TDS	Technical Data Sheet
WBP	Wood Based Panels
WSO	White Stained Oak



# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento e Apresentação do Projeto

O presente trabalho foi realizado no âmbito da unidade curricular de Dissertação de Mestrado, em ambiente empresarial, na IKEA *Industry* Portugal. Desenvolveu-se no departamento de processos do polo *Board on Frame* (BoF), no período compreendido entre fevereiro e junho de 2019.

### 1.1.1 Apresentação da empresa

O grupo IKEA fundado em 1943 por Ingvar Kamprad, em Almhult na Suécia, é um grupo multinacional propriedade de uma fundação holandesa, a *Stichting INGKA Foundation*. A visão IKEA passa por “criar um melhor dia a dia para a maioria das pessoas”. Desta forma, na base da sua criação assentam quatro valores fundamentais: as pessoas, a simplicidade, o baixo custo e o empreendedorismo, sendo o conceito de negócio do grupo “oferecer uma vasta gama de produtos funcionais e com um bom design a preços tão baixos que a maioria das pessoas possa comprá-los” (*Ikea group*).

Devido ao crescimento exponencial do negócio e à falta de capacidade de resposta, em 1991 houve a necessidade de criar o grupo *Swedwood*. A criação deste grupo paralelo ao grupo IKEA teve como objetivo garantir a capacidade de produção de mobiliário de madeira exclusivamente para a marca, reduzindo a dependência de aquisição de produtos de marcas externas e, aumentando a autossustentabilidade. No ano de 2013, nasce o Grupo IKEA *Industry* resultante da fusão da *Swedwood*, *Swedspan* e *IKEA Industry Investment & Development* (IIID). A fusão destes três grupos num só permitiu aumentar a eficiência e o crescimento da IKEA, sempre de acordo com o seu conceito tão característico (*Ikea Industry*).

No ano de 2018, o grupo IKEA possuía 422 lojas em mais de 50 mercados. Para o sucesso do seu crescimento, o grupo conta com mais de 19 000 colaboradores distribuídos por 44 unidades de produção. Do conjunto de países que representam o IKEA *Industry* fazem parte: Polónia, Portugal, Hungria, Lituânia, Letónia, França, China, Eslováquia, Rússia, Suécia e EUA (*Ikea group*).

A *Swedwood* Portugal, atualmente IKEA *Industry* Portugal, a laborar desde 2007 encontra-se sediada na freguesia de Seroa, concelho de Paços de Ferreira. Atualmente, conta com mais de 1500 colaboradores e engloba dois setores de negócio diferentes: o setor *Board on Frame* (BoF) onde são produzidas essencialmente peças de mobiliário de escritório e o setor *Pigment*

*Furniture Factory* (PFF) responsável pelo fabrico de móveis de cozinha. Na Figura 1 é apresentado o layout das instalações do *IKEA Industry Portugal* (*Ikea Industry Portugal*).

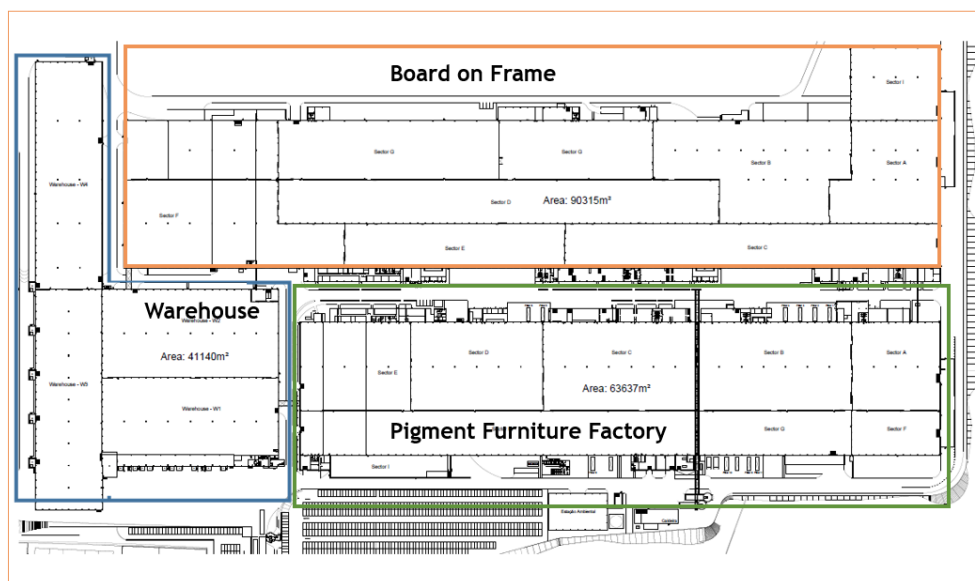


Figura 1 - Layout das instalações da *IKEA Industry Portugal* (adaptado de *Ikea Industry Portugal*).

Como é possível observar, a maior área ocupada corresponde ao edifício *Board on Frame* que ocupa 90315m<sup>2</sup>, o polo *Pigment Furniture Factory* tem uma área de 63637m<sup>2</sup> e o *Warehouse*, onde são armazenados os produtos de ambos os polos, apresenta uma área de 41140m<sup>2</sup> (*Ikea Industry Portugal*).

No ano fiscal 18 (FY18) o polo BoF da *IKEA Industry Portugal* produziu mais de 9 000 000 produtos, o que corresponde a um valor superior a 119 milhões de euros. Na totalidade, o *IKEA Industry Portugal* faturou mais do que 185 milhões de euros (*Ikea Industry Portugal*).

### 1.1.2 Influência das propriedades do *foil* e das condições operatórias no processo de laminação

O processo de laminação consiste na aplicação do elemento de acabamento final, o revestimento, ao painel. Esta é uma etapa importante, uma vez que permite melhorar o aspeto visual do painel, melhorando as propriedades mecânicas, físicas e óticas. A aplicação de um revestimento constituído por uma folha de papel decorativo designado por *foil* ao painel enriquece-o, tornando-o mais resistente à abrasão, ao calor, ao risco, à humidade e a alguns produtos químicos domésticos. Desta forma, é necessário que a sua aplicação seja realizada minuciosamente, uma vez que é o elemento final e se encontra em primeiro plano nas peças de mobiliário (Cicekler *et al.*, 2016).

O revestimento é aplicado ao painel na secção *Foil&Wrapping* da *IKEA Industry Portugal*. Esta secção pode ser dividida em duas etapas: *Pré-Coating* e processo de laminação. Na primeira etapa, o *foil* é preparado, de forma a adquirir as características necessárias para aderir ao painel. A matéria-prima é recebida sem qualquer tipo de tratamento e, na *Pré-Coating* é aplicado um adesivo termofusível (*hotmelt*) que permitirá criar ligações entre o painel e o *foil*. No processo de laminação, o *foil* é aplicado a painéis de aglomerados de partículas de madeira (*Particleboard*, PB) e painéis de aglomerados de fibras de madeira de alta densidade (*High Density Fiberboard*, HDF).

A secção *Foil&Wrapping* é a maior responsável pela produção de sucata no fluxo *Foil*. No período compreendido entre setembro de 2018 e fevereiro de 2019, esta área foi responsável por cerca de 70% da sucata produzida. Atualmente, o problema de *foil* colado entre camadas (*blocking*) e o aparecimento de bolhas na lateral dos painéis representam uma parte significativa desse valor.

O defeito do *foil* colado entre camadas, que está associado à dificuldade em desbobinar o rolo, após a aplicação do adesivo, sem causar a rutura do *foil*, ocorre entre a etapa *Pré-Coating* e o processo de laminação, após a aplicação do adesivo ao papel. As bolhas na lateral dos painéis, associadas à má colagem, começam a ser visíveis após a última etapa da secção *Foil&Wrapping*. Devido ao elevado desperdício, a *IKEA Industry Portugal* teve a necessidade de estudar estes problemas e procurar alternativas que permitissem a redução da sucata.

Desta forma, este trabalho teve como objetivo o estudo do processo da secção *Foil&Wrapping*, de modo a encontrar as causas dos problemas e perceber a influência das variáveis do processo na ocorrência de *blocking* e no aparecimento bolhas na lateral dos painéis. Conhecendo as causas do problema de *blocking*, existe a possibilidade de influenciar a alteração das características que permitam a eliminação deste problema junto dos fornecedores.

Para cumprir o objetivo proposto, foi definido um conjunto de tarefas a realizar pelo autor deste projeto. Em primeiro lugar, a adaptação ao ambiente fabril e familiarização com o processo produtivo que se demonstraram essenciais para a aquisição dos conhecimentos base. Para o estudo do problema do *foil* colado entre camadas procedeu-se à avaliação do impacto da variação das propriedades das matérias-primas (energia livre de superfície e rugosidade) no processo e à avaliação da influência de variáveis como temperatura, pressão, tempo de prensagem e gramagem de cola. Para o estudo da influência das variáveis referidas anteriormente foram utilizados vários métodos. A energia livre de superfície dos *foils* foi determinada através da medição de ângulos de contacto utilizando o método da gota (*sessile drop method*) e os marcadores de teste (*test inks*). O sistema de avaliação automático de colagem (ABES - *Automatic Bonding Evaluation System*) permitiu estudar o impacto de variáveis como a temperatura, a pressão, o tempo de prensagem e a gramagem de cola na ocorrência do

problema. Relativamente ao aparecimento de bolhas na lateral dos painéis, procedeu-se, em primeiro lugar, à identificação exata do local de falha e, posteriormente, ao estudo do comportamento dos adesivos *hotmelt* utilizados no processo através de uma Análise Mecânica Dinâmica (DMA). Por fim, para a determinação do calor específico dos adesivos aplicados à lateral dos painéis, realizou-se uma calorimetria diferencial de varrimento (DSC).

## 1.2 Contributos do Trabalho

Ao longo dos anos, a IKEA *Industry* Portugal tem trabalhado no sentido de melhorar os seus processos de fabrico, aumentando a eficiência de produção. Desta forma, a procura de soluções para a redução da sucata torna-se essencial. Sendo a secção *Foil&Wrapping* uma das maiores responsáveis pela produção de sucata, a realização deste trabalho permitiu aperfeiçoar os conhecimentos sobre o processo e estudar as causas dos problemas mais críticos nesta área, contribuindo assim para o aumento da eficiência do processo.

## 1.3 Organização da Tese

O presente trabalho encontra-se dividido em seis capítulos:

1. Enquadramento e apresentação do projeto, onde é apresentada a empresa na qual se realiza o projeto e os objetivos pretendidos com a realização do mesmo;
2. Contexto e Estado de Arte, onde é apresentada uma breve explicação sobre o processo produtivo da IKEA *Industry* Portugal e os conhecimentos essenciais sobre as matérias-primas relevantes para o presente trabalho;
3. Materiais e métodos, onde são apresentados todos os métodos utilizados para a realização dos estudos necessários à compreensão dos problemas propostos;
4. Apresentação e discussão dos resultados obtidos;
5. Apresentação das conclusões do trabalho realizado;
6. Avaliação do trabalho realizado.

## 2 Contexto e Estado da Arte

### 2.1 Processo produtivo BoF

O polo *Board on Frame* (BoF) da *IKEA Industry Portugal* distingue-se pela produção de painéis *sandwich*, podendo ser dividido em dois fluxos: *Foil* e *Lacquer&Print*. Na Figura 2, são apresentadas as etapas dos fluxos *Foil* e *Lacquer&Print* que constituem o polo BoF.

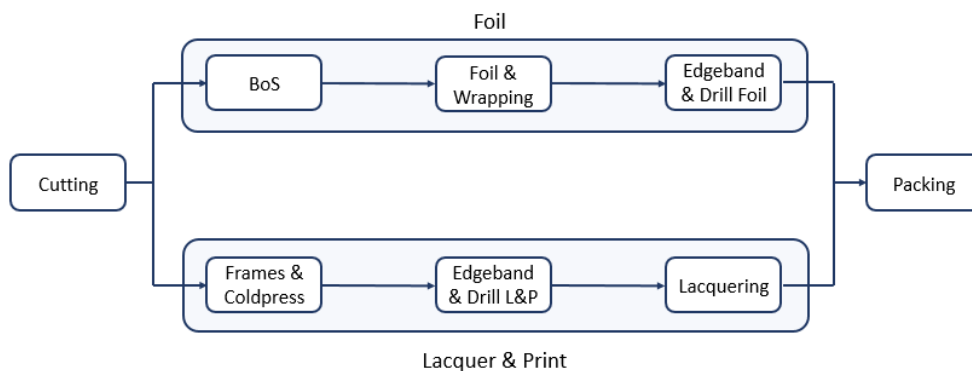


Figura 2 - Etapas dos fluxos *Foil* e *Lacquering & Print*, do polo BoF.

Como é possível observar, a primeira fase do processo, a secção de corte (*cutting*) e a área de embalagem (*packing*) são comuns aos dois fluxos. As etapas intermédias do processo diferem, uma vez que os elementos produzidos nos dois fluxos são diferentes. Os produtos *Foil* são produtos *Board on Style* (BoS), isto é, a estrutura interna dos painéis deste fluxo é formada por ripas laterais de *particleboard* e preenchida por *honeycomb*, sendo as camadas superior e inferior painéis aglomerados de fibras de madeira (HDF). Como o nome indica, o acabamento destes produtos consiste na aplicação de *foil* ao painel. Por outro lado, no fluxo *Lacquer&Print* os elementos produzidos são denominados *Board on Frame* (BoF). Neste caso, o processo de fabrico destes produtos tem maior componente manual, uma vez que os painéis têm como base uma estrutura retangular fechada constituída por *particleboard* e preenchida por *honeycomb*. O seu processo de construção é finalizado com a etapa de pintura.

#### 2.1.1 Fluxo *Foil*

Como referido anteriormente, o fluxo *Foil* é responsável pela produção de elementos *Board on Style*. São produzidas seis famílias de produtos: *Bestä*, *Stuva*, *Pax*, *Komplement*, *Platsa* e *Hjälpa*. Alguns exemplos destes produtos são apresentados na Figura 3.



Figura 3 - Exemplos de produtos do fluxo Foil (adaptado de Ikea Group).

A primeira etapa do fluxo Foil corresponde ao *cutting*, onde as placas mãe de HDF e *particleboard* são cortadas e agrupadas em lotes. Estes são encaminhados para a secção *Board on Style*, onde são produzidos os painéis *sandwich*. À placa de HDF inferior é aplicada uma camada uniforme de cola PVAc (*Polyvinyl-Acetate*) que nas zonas onde irão ser adicionadas as ripas de *particleboard* é retirada e substituída um adesivo *hotmelt*. Após a aplicação deste adesivo, as ripas são colocadas nas extremidades e no centro da placa de HDF e o restante espaço é preenchido por *honeycomb*. A esta estrutura é adicionada uma nova placa de HDF à qual também foi aplicada uma camada de cola PVAc. Na Figura 4 é possível observar as etapas principais da produção dos painéis *sandwich*.

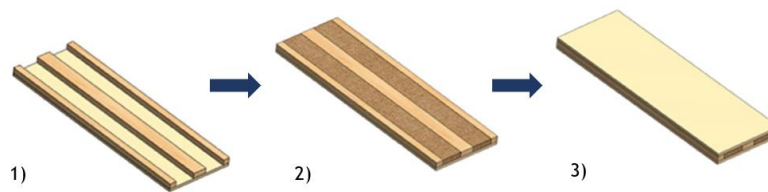


Figura 4 - Etapas de construção dos painéis BoS (adaptado de Ikea Industry Portugal).

Os painéis BoS dão entrada na secção *Foil&Wrapping*, onde é aplicado o revestimento nas faces superior e inferior e, quando necessário é preenchida a lateral com *foil*. No final desta etapa, sempre que se justificar, as peças são cortadas transversalmente e direcionadas para a secção *Edgeband&Drill Foil* onde é aplicada orla às laterais não preenchidas com *foil*. Por fim, as peças são encaminhadas para o *Packing* onde são embaladas juntamente com os acessórios e os elementos informativos necessários para a construção do produto final. Na Figura 5 são apresentados os elementos que constituem os painéis BoS.



Figura 5 - Estrutura dos painéis BoS.

## 2.2 Processo produtivo secção *Foil&Wrapping*

A secção *Foil&Wrapping*, onde foi desenvolvido este projeto, pode ser dividida em duas etapas: a *Pré-Coating*, onde é preparado o revestimento (*foil*) para que adquira as características necessárias a uma boa adesão e a *Complete Line* onde se procede à aplicação do *foil* ao painel. Apesar da *Complete Line* ser a principal linha de produção desta secção devido à sofisticação tecnológica que apresenta, é importante referir a existência de uma linha secundária, a *Laminator*. O processo de aplicação do revestimento ao painel é semelhante, no entanto na *Laminator* não é possível revestir as laterais dos painéis e executar o processo *inlay*, sendo esta a maior diferença entre as duas linhas de produção. O *layout* da secção *Foil&Wrapping* é apresentado na Figura A. 1 do anexo A.

### 2.2.1 *Pré-Coating*

Como foi referido anteriormente, é na área *Pré-Coating* que o revestimento é preparado, de forma a adquirir as características necessárias para uma boa adesão ao painel. O *IKEA Industry Portugal* recebe a matéria-prima sem qualquer tipo de adesivo e procede à sua impregnação nesta área. Este processo é realizado em ambiente controlado, de modo a evitar oscilações no mesmo. Parâmetros como a temperatura e a humidade são monitorizados, uma vez que influenciam significativamente o processo de aplicação do adesivo *hotmelt* ao *foil*.

A aplicação do adesivo ocorre a elevadas temperaturas, uma vez que se utiliza para o efeito um adesivo *hotmelt*. Este é ativado a 190°C por um sistema de aquecimento adequado, de modo a atingir as propriedades necessárias para a aplicação ao *foil*. Em simultâneo com o aquecimento do adesivo, os rolos são abastecidos ao equipamento e desbobinados. O *foil* passa através de uma placa de aquecimento para se tornar mais maleável e, em seguida é aplicado o adesivo na direção transversal ao *foil*. Esta etapa é realizada utilizando um *nozzle* com uma vareta que contém dois limitadores de aplicação. No final, existe um detetor de falhas que permite identificar possíveis irregularidades na quantidade de cola aplicada. No caso de se observarem rugas no *foil* ou falhas de cola é necessário reposicionar o *nozzle*, colocando-o mais afastado ou próximo, respetivamente. O *foil* já impregnado passa através de uma placa de arrefecimento, que se encontra a 0°C, e volta a ser enrolado. É estritamente necessário que a temperatura do papel neste momento não ultrapasse os 25°C.

Os rolos produzidos na *Pré-Coating* são armazenados numa zona com ambiente controlado até serem necessários na *Complete Line*. A gestão de stocks é baseada no princípio “*first in, first out*”, o que significa que os rolos armazenados em primeiro lugar devem ser os primeiros a

entrar na *Complete Line*. Por vezes, após várias semanas em armazém, os rolos de cor *White* de um dos fornecedores da *IKEA Industry Portugal* dão problemas quando utilizados no processo de laminação. O problema de *foil* colado entre camadas consiste na dificuldade de desenrolar os rolos devido ao facto de o adesivo aplicado na área *Pré-Coating* aderir à face exterior do *foil*. Quando esta adesão é suficientemente forte, a tensão aplicada para desenrolar o *foil* pode causar a sua rutura e o rolo é considerado sucata. Na Figura 6 é apresentado um rolo com o problema de *blocking*.



Figura 6- Rolo com problema de *blocking*.

Para uma melhor compreensão deste problema é apresentado o esquema da Figura 7.



Figura 7 - Ilustração das superfícies do *foil*.

Como é possível observar, o papel decorativo tem duas superfícies distintas. A superfície A é uma superfície com mais brilho, sendo esta a face visível após a aplicação do revestimento aos painéis. Por outro lado, a superfície B é uma superfície rugosa, sem brilho, que corresponde à face onde é aplicado o adesivo na etapa *Pré-Coating*. É esperado que as duas faces do papel apresentem comportamentos diferentes para que o adesivo apenas interaja com a superfície B. O que se observa quando ocorre o problema do *foil* colado entre camadas é que o adesivo presente na superfície B, depois do rolo ser novamente rebobinado após o processo da *Pré-Coating* cria ligações com a superfície A e impede que o *foil* seja novamente desenrolado no processo de laminação. Desta forma, é necessário estudar a ligação entre o adesivo e a superfície A, de modo a evitar a interação entre eles.

### 2.2.2 *Complete Line*

Na *Complete Line* ocorre o processo de laminação, isto é, a aplicação do revestimento aos painéis. O processo da *Complete Line* inclui a calibração dos painéis BoS, a aplicação do revestimento e o corte das peças produzidas.



Os painéis são abastecidos à *Complete Line* e, após a sua entrada na linha de produção realiza-se a calibração das faces superior e inferior utilizando um conjunto de quatro lixas com diferente grão. As lixas utilizadas têm grão de 80, 80, 100 e 120 e permitem uniformizar as superfícies e a espessura dos painéis ao longo de todo o comprimento. Na etapa seguinte, são retirados cerca de 4mm às laterais do painel, de forma a garantir o alinhamento das ripas com as placas de HDF e é aplicada uma camada de *filler* com o objetivo de preencher as irregularidades do *particleboard*, tornando-o mais uniforme. O *filler* é aplicado a 190°C e, após a sua aplicação a lateral da peça passa por um rolo espatulador que se encontra a 13°C e exerce uma determinada pressão que corresponde à posição 0,4mm no posicionador. Os painéis são encaminhados para o equipamento seguinte onde ocorre a aplicação do *foil* às faces superior e inferior através de dois conjuntos de calandras que se encontram a 190°C e exercem uma determinada pressão que corresponde à posição 0,8mm no posicionador. É importante referir que a camada de *foil* superior tem sempre maior largura que a camada inferior. A etapa seguinte corresponde ao processo *inlay*. Este processo consiste no corte de cerca de 12mm de *foil* na face inferior, em ambos os lados do painel, ao longo de todo o comprimento. Depois desta etapa, é aplicada uma segunda camada de *filler* na lateral do painel, numa quantidade 70% inferior à da primeira aplicação e, a lateral do painel passa novamente através de um rolo espatulador que se encontra a 13°C e exerce uma determinada pressão que corresponde à posição 0,4mm no posicionador. A etapa seguinte corresponde à aplicação de um adesivo *hotmelt* sobre o *filler*, sendo que este adesivo é ativado à temperatura de 195°C. As etapas seguintes são necessárias para a realização do processo de *wrapping*. De forma simplificada, este processo consiste no preenchimento da lateral com o excesso de *foil* da camada aplicada na face superior do painel. Para isso, existe um conjunto de lâmpadas de radiação infravermelha a operar a 80% e um soprador a 200°C que têm como função reativar o adesivo aplicado na etapa *Pré-Coating*. Após a reativação do adesivo, o *foil* é aplicado à lateral e, o excesso vai preencher os 12mm que foram retirados no processo *inlay*. Os painéis são cortados transversalmente e as peças resultantes são encaminhadas para a área seguinte, *Edgeband&Drill Foil*. Por vezes, nos produtos de maior espessura, algumas horas após o término da etapa *Foil&Wrapping* observa-se o aparecimento de bolhas nas laterais das peças onde foi aplicado *foil*. Na Figura 8 é apresentada uma peça com este problema.

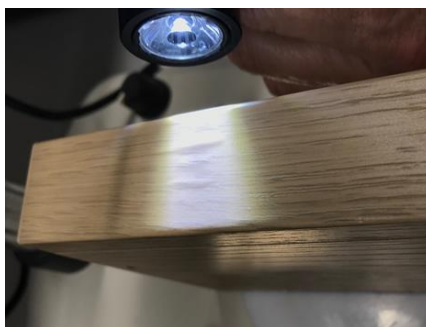


Figura 8 - Peça com o defeito de bolhas na lateral.

Através das ações realizadas no passado, com o intuito de tentar perceber qual a causa do problema, concluiu-se que este está relacionado com a má colagem do *foil* à lateral do painel.

## 2.3 Matérias-primas

Neste capítulo são apresentados os aspetos mais importantes das matérias-primas com maior relevância no processo da secção *Foil&Wrapping*.

### 2.3.1 Painéis sandwich

Como ilustrado na Figura 5, os painéis são constituídos por duas placas de HDF, ripas de *particleboard*, *honeycomb* e pelo revestimento final. Além disso, para promover a ligação destes elementos são utilizados adesivos. Como referido anteriormente, os painéis são construídos na secção BoS e seguem para a secção *Foil&Wrapping* onde se procede à aplicação do revestimento. Os elementos do painel sandwich que entram em contacto com o revestimento são o *particleboard* presente nas laterais e as placas de HDF que constituem as faces superior e inferior do painel. Desta forma, é necessário perceber as propriedades destes dois elementos para obter uma ligação adequada entre estes e o *foil*.

Devido ao aumento do custo da madeira houve a necessidade de procurar formas eficientes de utilizar este recurso natural. A melhor alternativa foram os painéis de derivados de madeira (*Wood Based Panels*), uma vez que podem ser construídos a partir de madeira de baixa qualidade, troncos curvados e torcidos e subprodutos da madeira. Além disso, aparas de madeira provenientes de outras indústrias podem ser recicladas e aproveitadas para a construção destes materiais (Irle *et al.*, 2010).

É sabido que a madeira maciça é um material com elevada variabilidade, sendo esta uma das suas maiores desvantagens. Os painéis de derivados de madeira possuem determinadas vantagens que os tornam uma boa alternativa à madeira maciça. Estes apresentam uma estrutura compacta e homogénea que se reflete numa superfície perfeitamente uniforme,

possuem boas propriedades mecânicas sobretudo boa coesão, resistência à flexão e resistência ao arranque de parafusos e, além disso apresentam excelente maquinabilidade e elevada estabilidade dimensional (Carvalho, 1999).

- Aglomerados de fibras de madeira obtidos por via seca (MDF)

Os aglomerados de fibras de madeira (*em inglês Medium Density Fiberboard, MDF*), são materiais construídos à base de madeira, a qual é sujeita a um processo que permite transformá-la em fibras. Tendo em conta o processo de fabrico dos aglomerados, estes podem ser classificados como aglomerados de fibras de madeira obtidos por via seca ou por via húmida. Segundo a norma NP EN 316, define-se aglomerados de fibras de madeira obtidos por via seca (MDF) como placas de derivados de madeira fabricadas a partir de fibras lenho celulósicas sob ação de calor e pressão, nas quais o teor da fibra, no estágio de formação, é inferior a 20%.

O MDF está disponível numa gama de espessuras compreendida entre 1,8 mm e 60 mm. A espessura da placa de aglomerados de fibras de madeira está, normalmente, associada à densidade do painel, sendo assim possível classificar o MDF de acordo com o valor de densidade que apresenta. Desta forma, no caso de a densidade do MDF ser inferior a 500 kg/m<sup>3</sup> este é designado por LDF (*Low Density Fiberboard*), se estiver compreendida entre 500 kg/m<sup>3</sup> e 800 kg/m<sup>3</sup> classifica-se como MDF (*Medium Density Fiberboard*) e, caso a densidade seja superior a 800 kg/m<sup>3</sup> é denominado por HDF (*High Density Fiberboard*) (Manufacturing of MDF, 2019).

Na IKEA *Industry* Portugal, para a construção dos painéis sandwich são utilizadas placas de HDF com espessura de 2,5 mm.

- Aglomerados de partículas de madeira (PB)

Os painéis aglomerados de partículas, como o próprio nome indica, são produtos fabricados com partículas de madeira unidas por ação de um adesivo sob o efeito de pressão e temperatura elevadas, por via seca (Irle, 2010; Forest Products Laboratory, 2010).

Existe uma grande variedade de formas e tamanhos de partículas, pelo que são as características destas que definem o tipo de aglomerado. Partículas muito pequenas ocupam uma área maior e, por isso há a necessidade de adicionar uma maior quantidade de resina. Por outro lado, partículas de grandes dimensões podem afetar a qualidade do produto final devido à existência de delaminações internas na estrutura. Desta forma, é necessário que o tamanho das partículas selecionadas para o fabrico dos aglomerados seja o mais uniforme possível (Irle, 2010; Forest Products Laboratory, 2010).

Relativamente ao processo de produção deste material é importante referir que a conversão da matéria lenho celulósica em partículas requer menor energia do que o processo de transformação em fibras, tornando o processo mais económico. Por outro lado, a resistência mecânica dos aglomerados de partículas de madeira é inferior à dos aglomerados de fibras de madeira, para a mesma espessura (Carvalho, 1999).

### 2.3.2 Folhas de acabamento de decoração

Os papeis decorativos começaram a ser utilizados na década de 1960 e, atualmente, são um dos revestimentos mais utilizados para o acabamento de produtos da indústria de mobiliário. Estes materiais podem ser classificados como: não impregnados, pré-impregnados e pós-impregnados. Esta classificação tem em conta a etapa em que o papel é impregnado. Os papeis não impregnados são fabricados sem que seja adicionada resina durante o processo. No caso de ser adicionada resina ao processo de fabricação do papel este é classificado como pré-impregnado. Por outro lado, caso a adição da resina seja realizada apenas após a conclusão do processo de produção dos papeis, então estes são denominados por pós-impregnados (Composite Panel Association, 2007).

A aplicação de um revestimento às peças de mobiliário permite melhorar a sua performance. Estes materiais conferem ao produto final maior resistência a manchas, à abrasão, ao risco, à humidade, a temperaturas elevadas e a produtos químicos domésticos, o que contribui para o aumento da sua durabilidade. Podem ser usados como revestimento de móveis, portas, paredes ou pisos (Nemli, 2007).

Atualmente, existem vários tipos de revestimentos decorativos: laminados de alta pressão (*High Pressure Laminate, HPL*), laminados contínuos de baixa pressão (*Continuous Pressure Laminate, CPL*), folheados de madeira e folhas de acabamento (*finish foil*).

Os fornecedores de *foil* da *IKEA Industry Portugal* adquirem o papel base sem qualquer tipo de tratamento e adicionam-lhe aditivos e outros componentes, de forma a que o *foil* adquira as propriedades necessárias para o processo da *Pré-Coating*. Atualmente, a *IKEA Industry Portugal* recebe revestimentos de 4 fornecedores diferentes. De acordo com o fornecedor, estas matérias-primas podem diferir não só na cor, mas também no valor de gramagem. Na Tabela 1 são apresentados os revestimentos utilizados e as suas principais características.

Tabela 1- Principais características dos revestimentos utilizados no *IKEA Industry Portugal*.

Fornecedor	Cor	Gramagem (g·m <sup>-2</sup> )
X	<i>White gloss 10</i>	85
Y	<i>White gloss 25</i>	70
Y	<i>White gloss 10</i>	70
Z	<i>WSO</i>	45

W	Black brown	69
---	-------------	----

Estes produtos, quando rececionados na IKEA *Industry* Portugal são sujeitos a um controlo visual onde são verificadas as condições de armazenamento em palete, o estado de conservação da palete onde o produto é recebido, a cor e a identificação do produto. A nível dimensional é controlada a largura do rolo, de modo a verificar se o produto possui as medidas especificadas e utiliza-se um brilómetro para verificar se o *foil* tem o brilho correto. Em laboratório é realizado o teste de opacidade e é medida a tensão superficial utilizando para o efeito os marcadores de teste.

### 2.3.3 Adesivos *hotmelt*

Os adesivos são definidos como substâncias capazes de unir fortemente duas superfícies, de modo permanente (Muller, 2018).

Os adesivos *hotmelt* são compostos termoplásticos constituídos na sua totalidade por sólidos. Estes adesivos são aplicados, no seu estado fundido, a elevadas temperaturas que após o arrefecimento adquirem as propriedades pretendidas. São várias as razões que tornam a utilização deste tipo de adesivos vantajosa: são de fácil aplicação, flexíveis e resistentes, apresentam baixos tempos de abertura, permitindo que sejam utilizados em processos de colagem contínuos a velocidade elevada, têm a capacidade de formar juntas fortes e permanentes em poucos segundos de aplicação e, além disso não apresentam perigo para o meio ambiente pelo facto de serem compostos isentos de solventes. Contudo, os adesivos *hotmelt* também apresentam algumas limitações na sua utilização como: a baixa resistência a elevadas temperaturas, resultando na perda de aderência, a degradação a elevadas temperaturas modificando as suas propriedades ao nível da viscosidade e da cor e a incapacidade de alguns substratos para suportar as elevadas temperaturas de aplicação destes adesivos (Heinrich *et al.*, 2002; Schultz, 2003).

A constituição versátil dos adesivos *hotmelt* permite a adaptação das suas características às necessidades pretendidas. Estes materiais são compostos pelos seguintes elementos (Heinrich *et al.*, 2002; Schultz, 2003):

- **Polímero/elastómero** - é o principal componente e, tem como função fortalecer o adesivo, aumentar a coesão e melhorar as suas propriedades mecânicas, as características reológicas e a viscosidade.
- **Resina** - uma percentagem de resina compreendida entre 8% e 25% é normalmente adicionada à formulação do adesivo. Este componente permite não só tornar o adesivo mais fluído, mas também melhorar as características de adesão a quente, as características de molhabilidade e o tempo aberto.

- **Cargas** - a adição de cargas provoca a diminuição das propriedades de adesão e reforça a coesão. No entanto, a sua adição é importante do ponto de vista económico, uma vez que permite reduzir o custo do material.
- **Antioxidantes** - estes compostos são adicionados para proteger os compostos orgânicos, em especial as resinas, de sofrerem oxidação quando sujeitas a elevadas temperaturas.
- **Outros componentes** - componentes como pigmentos, plastificantes e estabilizantes podem ser adicionados à composição dos adesivos *hotmelt*. Os plastificantes permitem diminuir a viscosidade e a resistência ao calor. Os estabilizantes permitem retardar a degradação térmica e aumentar a resistência ao envelhecimento.

Como referido anteriormente, os adesivos *hotmelt* têm como principal constituinte um polímero. O copolímero de acetato de vinilo-etileno (em inglês *Ethylene-Vinyl Acetate*, EVA) é um dos polímeros mais utilizados devido à sua gama alargada de índices de fusão, ao facto de ter boa adesão a uma grande variedade de materiais e devido ao seu baixo custo. Além destes materiais também é comum a utilização poliamidas e poli alfa olefinas (Park *et al.*, 2006).

Os adesivos *hotmelt* são muito utilizados como matéria-prima de indústrias de construção para o fabrico de painéis laminados de madeira, nas indústrias de embalagem e indústrias de calçado. As suas propriedades mais importantes são a viscosidade, a estabilidade térmica, a resistência inicial, a molhabilidade, a densidade e o ponto de amolecimento (Park *et al.*, 2006; Malysheva *et al.* 2010).

Na IKEA *Industry* Portugal, são utilizados vários adesivos *hotmelt*, no entanto, para a realização deste projeto os mais relevantes são os utilizados nas duas etapas da secção *Foil&Wrapping*. O TECHNOMELT CHS 700, fornecido pela Henkel na forma de granulado, foi formulado especificamente para o processo da *Pré-Coating*. Este material tem como polímero base o polipropileno, é um adesivo não reativo pelo que é apenas responsável por estabelecer ligações entre o *foil* e as superfícies do painel, sem que nenhum dos seus componentes reaja. Na folha de descrição técnica (*Technical Data Sheet*, TDS) são referidas algumas propriedades do produto, indicando que este possui baixo tempo aberto, elevada resistência ao calor, elevada resistência de adesão, uma junta de cola muito dura e que é especialmente indicado para aplicação com *nozzles* da marca NORDSON (Henkel, 2017).

A marca Henkel é também a fornecedora dos dois adesivos utilizados no processo da *Complete Line*. O DORUS CS 383-22, utilizado como *filler* para preencher as irregularidades do *particleboard* na lateral do painel, é um adesivo não reativo que tem como base Etileno-vinil acetato (EVA). Segundo a folha de descrição técnica este adesivo é pouco viscoso, apresenta boas características de escoamento e uma gama de temperaturas alargada. O adesivo DORUS US 276/3 também aplicado na lateral do painel durante o processo da *Complete Line* é um

adesivo não reativo com boas características de escoamento e apresenta uma gama de temperaturas alargada (Henkel, 2011).

## 3 Materiais e Métodos

### 3.1 *Foil* colado entre camadas

#### 3.1.1 Sistema de avaliação automático de colagem (ABES)

O equipamento ABES (*Automated Bonding Evaluation System, Ahesive Evaluation Systems Inc., Corvallis*) foi desenvolvido por Philip Humphrey com o intuito de caracterizar a ligação entre a madeira e diversos adesivos industriais (Humphrey). Este método permite caracterizar a afinidade de diferentes catalisadores e adesivos com a madeira, determinar as suas características de cura a diferentes temperaturas e tempos de prensagem e a respetiva tensão de rutura (Almeida, 2013). A rapidez e fiabilidade tornam o ABES um equipamento muito útil para avaliar a formação de ligações entre os adesivos e o substrato. Além disso, é uma técnica excelente para a análise da evolução da ligação entre o adesivo e o substrato, uma vez que fornece informações sobre as propriedades mecânicas da interação destes dois materiais. A maior desvantagem apontada a este método é o facto de ser um teste destrutivo (Irle, 2010).

Apesar deste método ter sido desenvolvido para estudar a interação entre os adesivos e a madeira, no presente trabalho o ABES foi utilizado para caracterizar a interação entre as superfícies A e B do *foil* e o adesivo *hotmelt* aplicado na etapa *Pré-Coating*. A adaptação do método à realização deste estudo torna-o menos preciso. O equipamento utilizado encontra-se no laboratório de tecnologia e indústrias de madeira (DEMad/IPV) que pertence ao Instituto Politécnico de Viseu. Na Figura B. 1 e na Figura B. 2 do anexo B são apresentadas duas fotografias do exemplar utilizado para a realização dos ensaios.

Para a realização deste estudo, os provetes foram construídos utilizando duas lamelas de folha de madeira (*faia*) com medidas padrão, às quais foram coladas tiras de *foil* com fita-cola. Na Figura 9, é apresentado um exemplo de uma amostra usada na realização do teste no ABES.



Figura 9 - Provetes utilizados nos ensaios do equipamento ABES.

Inicialmente, definiu-se um conjunto de parâmetros que incluiu a temperatura de operação, o tempo de prensagem, o tempo de arrefecimento e a pressão a que as amostras são sujeitas. Os provetes foram colocados no equipamento, presos por duas garras e, centrados e alinhados com os pratos de prensagem. As superfícies de *foil* colocadas na extremidade de cada uma das



amostras são sobrepostas e sujeitas a uma determinada pressão, durante um certo período de tempo. Após este período a secção de contacto das amostras é arrefecida e sujeita a um ensaio de tração, onde é medida a força de rutura. Foram realizados vários estudos utilizando este método e que permitiram avaliar a influência da temperatura, da redução da gramagem, do tempo de prensagem e da pressão. Os valores padrão das variáveis que o ABES permite manipular na realização dos ensaios são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2- Registo dos valores padrão das variáveis do equipamento ABES.

tp (s)	20
ta (s)	20
P <sub>gás</sub> (bar)	2,5

Onde  $t_p$  representa o tempo de prensagem,  $t_a$  o tempo de arrefecimento da junta e  $P_{gás}$  a pressão do sistema pneumático quando as amostras estão em contacto. É importante referir que, conforme o objetivo dos testes a realizar, os valores apresentados na Tabela 2 podem ser alterados. No caso de se pretender alterar a pressão do ensaio é necessário recorrer à equação 1 para determinar a pressão efetiva a partir da pressão do sistema pneumático e das áreas do êmbolo e de contacto.

$$P_{efetiva} = \frac{A_{embolo}}{A_{contcto}} \times P_{gás} \quad (1)$$

Sendo que  $P_{efetiva}$  representa a pressão efetiva,  $P_{gás}$  corresponde à pressão equivalente de alimentação no sistema pneumático do equipamento ABES,  $A_{embolo}$  corresponde à área interna do êmbolo e tem o valor de 1338mm<sup>2</sup> e  $A_{contacto}$  representa a área de contacto entre as duas superfícies do *foil* (sobreposição), sendo o valor desta variável de 100mm<sup>2</sup>.

### 3.1.2 Determinação da rugosidade

O acabamento da superfície de um material deve ser realizado de acordo com o fim a que este se destina. As irregularidades observadas nas superfícies podem distinguir-se pelo tipo de desvio apresentado. Desvios de retitude, de planeza e ondulações são classificados como desvios macrogeométricos. A rugosidade é classificada como um desvio microgeométrico (Tavares, 2012).

Ao longo dos tempos têm sido desenvolvidas várias técnicas que permitem quantificar a rugosidade das superfícies. Existem dois tipos de rugosímetros, os de contacto como por exemplo os pneumáticos, de emissão acústica e por palpação e, os sem contacto, os óticos. (Lemaster e Dornfed, 1995; Coelho, 2005). Atualmente, o método mais utilizado para a medição deste parâmetro é o rugosímetro por palpação, por ser prático, preciso e permitir calcular corretamente os parâmetros de quantificação da rugosidade. Para a utilização desta técnica de

forma precisa, é necessário considerar variáveis como o raio da ponta do *stylus*, a força produzida por este na superfície e o comprimento *cut-off* do perfil (Hiziroglo e Kosonkorn 2006).

A rugosidade tem elevada importância no que diz respeito ao estado das superfícies dos materiais, tendo influência na qualidade da aderência dos revestimentos, na resistência à corrosão e ao desgaste, no aspeto visual entre outras funcionalidades (Tavares, 2012).

A quantificação da rugosidade é realizada tendo em conta um conjunto de parâmetros, sendo os de amplitude os mais importantes na caracterização da topografia da superfície de um material. Destes parâmetros destacam-se o  $Ra$  e o  $Rz$  que se encontram especificados na norma ISO 4287:2011, onde são definidos como:

- Rugosidade média aritmética,  $Ra$

Este parâmetro é definido como a média aritmética dos valores absolutos da rugosidade em relação à linha média no comprimento de amostragem ( $lm$ ), como é possível observar na Figura 10.

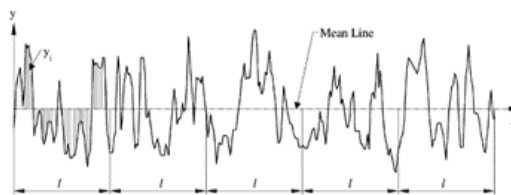


Figura 10-Rugosidade média aritmética (Gadelmawla, 2002).

Considerando que a função  $y(x)$  representa a distância entre cada ponto do perfil de rugosidade e a linha média no comprimento de amostragem, é possível calcular o parâmetro  $Ra$  através das equações 2 e 3 (Gadelmawla, 2002).

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (2)$$

$$Ra = \frac{1}{lm} \int_0^{lm} |y(x)| dx \quad (3)$$

Onde  $lm$  corresponde ao comprimento de amostragem,  $y$  à altura do perfil de rugosidade e  $x$  à coordenada na direção do movimento do rugosímetro (Martins, 2008).

A rugosidade média aritmética é frequentemente utilizada para a medição da rugosidade superficial, devido à simplicidade da sua definição, à insensibilidade a valores acidentais de amplitude máxima e ao facto da maioria dos equipamentos serem capazes de fornecer esta medida (Martins, 2008).

- Média aritmética dos valores máximos no perfil de rugosidades,  $R_z$

De acordo com o especificado na legislação, este parâmetro é definido como a média da diferença de alturas entre os cinco pontos máximos e os cinco pontos mínimos ao longo do comprimento de amostragem, como é ilustrado na Figura 11 (Gadelmawla, 2002).

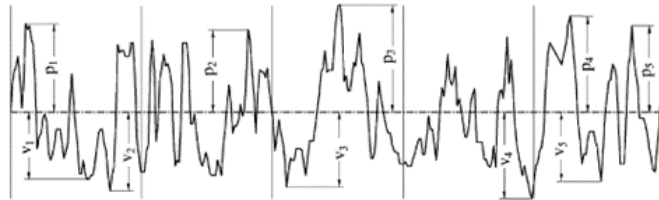


Figura 11-Média aritmética dos valores máximos no perfil de rugosidades,  $R_z$  (Gadelmawla, 2002).

O valor de  $R_z$  pode ser calculado através da equação 4.

$$R_z = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n p_i - \sum_{i=1}^n v_i) \quad (4)$$

Onde  $p_i$  representa a altura dos pontos máximos e  $v_i$  a altura dos pontos mínimos, ambos em relação à linha média.

Neste trabalho foi medida a rugosidade dos *foils* nas superfícies A e B, com o objetivo de perceber as diferenças entre as duas faces e a sua influência na adesão do *hotmelt* a cada uma delas. Além disso este parâmetro tem influência na medição da tensão superficial, pelo que o seu conhecimento se demonstrou essencial. Os ensaios foram realizados na direção longitudinal, uma vez que esta corresponde à direção de aplicação da cola. Para o teste utilizou-se o equipamento SJ-410 da marca Mitutoyo disponível no laboratório da Associação Rede de Competência em Polímeros (ARCP).

### 3.1.3 Determinação da tensão superficial

As interações entre o adesivo *hotmelt* e a face e contra face do *foil* influenciam a ocorrência de *blocking*. Desta forma, é necessário estudar as propriedades das matérias-primas com o objetivo de avaliar qual a afinidade que as faces do papel têm para interagir com o adesivo.

A tensão superficial é um parâmetro importante para a realização deste estudo, uma vez que fornece informações importantes sobre a interface sólido/líquido.

Materiais que possam ser sujeitos a processos de impressão ou que se destinem a ser usados como revestimento sofrem determinados tratamentos, de forma a preparar as suas superfícies para estas funções. Estes tratamentos de superfície e os tratamentos de limpeza para a remoção de partículas hidrofóbicas permitem aumentar a energia livre de superfície e,

consequentemente melhorar a molhabilidade e a adesão. A molhabilidade corresponde à tendência que um líquido tem para molhar um sólido (Kruss, 2014).

Para a realização deste trabalho, a tensão superficial foi determinada por dois métodos: por intermédio da medição dos ângulos de contacto e por medição direta utilizando os marcadores de teste. O primeiro método é um método mais preciso, no entanto, o método de marcadores de teste é o utilizado no controlo de receção do *foil* no *IKEA Industry Portugal* por ser um método expedito, pelo que o estudo dos dois métodos é importante.

### 3.1.3.1 Determinação dos ângulos de contacto

A molhabilidade é um fenómeno que está relacionado com as manifestações macroscópicas de interações moleculares entre líquidos e sólidos em contacto e pode ser caracterizado através de parâmetros termodinâmicos como os ângulos de contacto, a energia livre de superfície e o trabalho de adesão (Berg, 1993).

O ângulo de contacto ( $\theta$ ) é definido como o ângulo entre a tangente à superfície da gota e a interface sólido/líquido, como é representado na Figura 12.

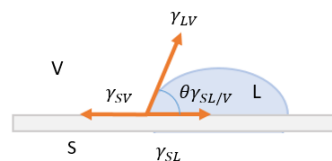


Figura 12 - Perfil de uma gota de líquido numa superfície sólida (adaptado de Pereira, 2017).

A fração da superfície que é molhada é delimitada por uma linha circular que se designa linha de contacto e, na qual ocorre o contacto entre três fases, nomeadamente a fase líquida, L, a fase gasosa, V, e a fase sólida, S (Pereira, 2017).

O método da gota (*sessile drop method*) permite determinar os ângulos de contacto numa superfície. Conhecendo o valor do ângulo de contacto é possível tirar conclusões sobre a tendência que o líquido tem para molhar o sólido. Se o ângulo medido for igual ou inferior a  $90^\circ$  o líquido penetra no sólido e vai preencher os espaços vazios, conduzindo à formação duma interface que pertence ao sólido, mas também ao líquido. No caso de o valor do ângulo ser superior a  $90^\circ$  significa que o líquido não tem tendência a molhar o sólido e, consequentemente não existe uma interface comum ao líquido e ao sólido (Cruz, 2006).

De acordo com a equação de Young, existe uma relação entre o ângulo de contacto e a energia livre de superfície do sólido ( $\gamma_{SV}$ ), a tensão superficial do líquido ( $\gamma_{LV}$ ) e a tensão interfacial entre o sólido e o líquido ( $\gamma_{SL}$ ) e que pode ser dada pela equação 5 (Cruz, 2006).

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos(\theta) \quad (5)$$

Para a realização desta análise, foram realizados ensaios no laboratório da Associação Rede de Competência em Polímeros (ARCP), utilizando o método da gota (*sessile drop method*). Os ângulos de contacto foram medidos nas superfícies A e B dos *foils*, onde foram utilizados três líquidos para a realização dos ensaios: água, etilenoglicol e n-hexadecano. Na Tabela 3 são apresentados os valores de tensão superficial e as correspondentes componentes polar e dispersiva destes líquidos.

*Tabela 3- Registo dos valores de tensão superficial e respetivas componentes polar e dispersiva dos líquidos de teste.*

Líquido	Tensão superficial (mJ·m <sup>-2</sup> )	Componente polar (mJ·m <sup>-2</sup> )	Componente dispersiva (mJ·m <sup>-2</sup> )
Água	72.8	50.2	22.6
Etilenoglicol	48.8	32.8	16
n-hexadecano	27.5	27.5	0

A energia livre de superfície de um sólido depende da componente polar ( $\gamma_{SV}^p$ ) e da componente dispersiva ( $\gamma_{SV}^d$ ), como é possível observar na equação 6.

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SV}^p + \gamma_{SV}^d \quad (6)$$

Através dos ângulos de contacto medidos e dos valores das componentes polar e dispersiva dos três líquidos de teste registados na Tabela 3 foi possível calcular as componentes polar e dispersiva dos *foils*. A equação 7, baseada no método de ORWK (Owens, Wendt, Rabel e Kaelbel) traduz a relação linear que permite calcular estes parâmetros (Figueiredo *et al.*, 2011).

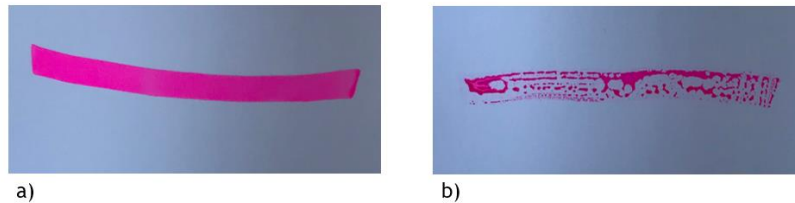
$$\frac{1+\cos(\theta)}{2} \frac{\gamma_{LV}}{\sqrt{\gamma_{LV}^d}} = \sqrt{\gamma_{SV}^p} \sqrt{\frac{\gamma_{LV}^p}{\gamma_{LV}^d}} + \sqrt{\gamma_{SV}^d} \quad (7)$$

Representando graficamente  $\frac{1+\cos(\theta)}{2}$  em função de  $\sqrt{\frac{\gamma_{LV}^p}{\gamma_{LV}^d}}$  é possível obter as componentes polar e dispersiva da superfície sólida.

### 3.1.3.2 Marcadores de teste

Os marcadores de teste são marcadores que contêm um fluido com uma tensão superficial definida e que permitem a medição rápida deste parâmetro (Arcotest). A tensão superficial de um determinado material pode ser determinada simplesmente fazendo um risco com o marcador na superfície em estudo. Dependendo da forma como a tinta reage com a superfície,

é possível determinar o intervalo de valores onde está compreendida a tensão superficial do material em estudo. Na medição deste parâmetro utilizando o método dos marcadores de teste existem dois resultados possíveis. Na Figura 13, é apresentado um exemplo.



*Figura 13 - Medição da tensão superficial utilizando marcadores de teste, a) tensão superficial do foil superior à do marcador e b) tensão superficial do foil inferior à do marcador.*

Como é possível observar na Figura 13, na imagem a) a linha do marcador é perfeitamente contínua, o mesmo não acontece na imagem b) onde se verifica que tinta do marcador vai desaparecendo à medida que se realiza o teste. Estes são os dois resultados possíveis quando se realiza a medição da tensão superficial utilizando este método. Quando o resultado do teste é uma linha contínua significa que a tensão superficial do *foil* é superior ao valor da tensão superficial do marcador. Por outro lado, quando a tinta do marcador começa a desaparecer indica que a tensão superficial do material é inferior à do marcador utilizado.

O método dos marcadores é vantajoso para a determinação da tensão superficial, em ambiente industrial, uma vez que possibilita uma medição rápida com elevada precisão e um baixo consumo do fluido de teste, além disso, é de fácil transporte, não derrama e tem um longo tempo de vida quando devidamente utilizado (Arcotest).

Na IKEA *Industry* Portugal, a tensão superficial dos *foil* é medida à entrada utilizando este método. A empresa exige ao fornecedor que os produtos apresentem uma tensão superficial inferior a  $32\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$  na superfície A (face exterior) e superior a  $38\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$  na superfície B (face onde a *hotmelt* é aplicada).

## 3.2 Bolhas na lateral do painel

### 3.2.1 Análise Mecânica Dinâmica (DMA)

O equipamento DMA (*Dynamic Mechanical Analysis*) é cada vez mais utilizado como ferramenta para a caracterização da resistência dos adesivos, à escala laboratorial, tendo-se tornado muito importante na área da reologia. A reologia é a ciência responsável pelo estudo da deformação e escoamentos de matéria (Menard, 1999).

Os polímeros são materiais viscoelásticos que, em termos mecânicos, apresentam características de líquidos e sólidos. Para a caracterização das propriedades viscoelásticas, o DMA é um dos equipamentos mais utilizados, uma vez que é apto para a caracterização de sólidos poliméricos e líquidos. Este método consiste na aplicação de uma força oscilatória à amostra do material em estudo, com o objetivo de analisar a sua resposta a essa mesma força. Permite caracterizar as propriedades de um material em função da temperatura, do tempo, da frequência ou de uma combinação destes parâmetros (PerkinElmer).

A partir desta análise é possível determinar parâmetros que permitem perceber a tendência que um material tem para ganhar ou perder energia e avaliar a sua capacidade de recuperação depois de ser sujeito a um processo de deformação. A partir da resposta do material à onda sinusoidal, o equipamento calcula o módulo de elasticidade,  $E'$ , e a tangente de delta ( $\tan \delta$ ). O módulo de elasticidade indica a capacidade de um material para armazenar energia e está relacionado com a rigidez do mesmo. A tangente de delta corresponde ao rácio entre o módulo de perda de energia,  $E''$ , e o módulo de elasticidade, como é possível observar através da equação 8. Como o nome indica, o módulo de perda de energia representa o calor dissipado pela amostra como resultado de movimentos moleculares, traduzindo a sua capacidade de amortecimento (Menard, 1999).

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (8)$$

Neste trabalho, este estudo foi realizado para perceber o comportamento dos adesivos usados na lateral do painel no processo da *Complete Line* quando sujeitos a variações de temperatura significativas. As amostras foram sujeitas a dois períodos de aquecimento e arrefecimento consecutivos, ou seja, a amostra foi aquecida de 34°C até 240°C e depois arrefecida até à temperatura inicial, depois deste arrefecimento é novamente aquecida e arrefecida nas mesmas condições. Este método permite estudar a evolução do módulo de elasticidade com o aumento ou diminuição da temperatura e verificar se os adesivos sofrem alguma alteração nas suas características quando sujeitos a estes ensaios. O equipamento utilizado encontra-se no Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia (LEPABE) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

### 3.2.2 Calorimetria Diferencial de Varrimento (DSC)

A Calorimetria Diferencial de Varrimento (DSC), criada no ano de 1963, é uma das técnicas mais utilizadas para a realização de análises térmicas. Este equipamento mede a diferença entre a energia absorvida ou cedida por uma substância e a energia absorvida ou cedida por uma substância de referência, em função da temperatura. De notar que, para a realização destes

ensaios a amostra em estudo e a amostra de referência devem encontrar-se nas mesmas condições.

O DSC é um método muito versátil, uma vez que pode ser aplicado a várias indústrias como a indústria de polímeros, farmacêutica e alimentar e a áreas relacionadas com química orgânica e inorgânica. É uma técnica muito utilizada devido à facilidade e rapidez que possui para determinar parâmetros como a temperatura de transição vítrea, o calor de fusão, entre outros. Além disso, para a realização dos ensaios são necessárias quantidades mínimas de amostra, pelo que a aplicação deste método é vantajosa em situações em que a disponibilidade da substância que se pretende analisar é limitada (Menczel, 2009).

Este estudo teve como objetivo avaliar a tendência que os adesivos têm para ganhar ou perder energia e identificar transições de fase ou eventualmente reações químicas que causam variações de entalpia nos adesivos utilizados. Desta forma, o equipamento DSC foi utilizado para determinar o calor específico ( $C_p$ ) de dois dos adesivos aplicados na lateral do painel durante o processo na *Complete Line*. O calor específico de um material é definido como a variação térmica que este sofre quando recebe uma determinada quantidade de calor.

Para a realização dos ensaios foi utilizado o equipamento que se encontra no Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia (LEPABE) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. As amostras em estudo foram sujeitas a um processo de aquecimento até 250°C seguido de um arrefecimento até 25°C e, por fim a um novo aquecimento até 250°C.



## 4 Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados dos testes realizados com o intuito de minimizar ou se possível resolver os problemas do processo de laminação. O capítulo será dividido em duas secções, de forma a distinguir os resultados obtidos para o estudo dos dois problemas propostos.

### 4.1 *Foil* colado entre camadas

Como referido no capítulo 2, o problema do *foil* colado entre camadas é um dos problemas mais críticos da secção *Foil&Wrapping*. Desta forma, procedeu-se ao estudo de variáveis como a temperatura, a redução da gramagem de *hotmelt*, a pressão, o tempo de prensagem e a tensão superficial. Os resultados obtidos para os testes realizados são apresentados ao longo deste capítulo.

Para a realização deste estudo foram utilizados quatro tipos de *foil* de dois fornecedores diferentes. Na Tabela 4 são apresentadas as características mais importantes destas matérias-primas.

Tabela 4-Principais características dos foils em teste.

Fornecedor	Cor	Sigla	Gramagem (g·m <sup>-2</sup> )
X	<i>White gloss 10</i>	X1	85
X	<i>White (2) gloss 10</i>	X2	85
Y	<i>White gloss 25</i>	Y1	70
Y	<i>White gloss 10</i>	Y2	70

Atualmente, em produção, na IKEA *Industry* Portugal apenas são utilizados os *foils* X1 do fornecedor X e o Y1 do fornecedor Y. No entanto, realizaram-se testes também com o *foil* Y2 do fornecedor Y que poderá servir como produto substituto do *foil* do fornecedor X, visto que apenas o *foil* deste fornecedor dá problemas de *blocking*. Além disso, o fornecedor X, tem vindo a trabalhar juntamente com a IKEA *Industry* Portugal com o objetivo de resolver este problema, pelo que realizou alterações no seu processo e modificou o seu produto. O *foil* X2 foi o produto resultante destas modificações e, por isso foi testado com o objetivo de perceber a influência das alterações do processo do fornecedor na ocorrência do problema de *foil* colado entre camadas.

#### 4.1.1 Avaliação da influência da temperatura

O equipamento ABES foi utilizado para estudar a influência da temperatura na resistência da colagem entre as superfícies do *foil*. Na realização deste estudo, as superfícies A e B foram combinadas de duas formas diferentes. Para uma melhor compreensão são apresentadas, na Figura 14, as combinações utilizadas.

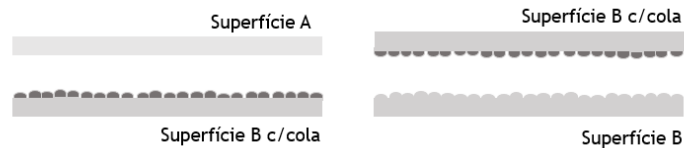


Figura 14- Esquematização dos testes realizados no equipamento ABES.

Como é possível observar, para cada um dos produtos em teste, foi avaliada a resistência da colagem entre a superfície A e a superfície B com cola e a interação entre a superfície B com cola e a mesma superfície sem cola. A combinação entre a superfície B com cola e a superfície B sem cola serviu como termo de comparação, uma vez que era esperado que a colagem destas duas superfícies fosse muito mais resistente.

Realizaram-se ensaios, para cada um dos *foils* em teste, onde foi medida a força de rutura fazendo variar a temperatura numa gama compreendida entre 25°C e 85°C. Na Figura 15 são apresentados os resultados obtidos, que correspondem aos valores médios das três réplicas efetuadas para cada ensaio. Todos os valores obtidos são apresentados na Tabela C. 1 e na Tabela C. 2 do anexo C.

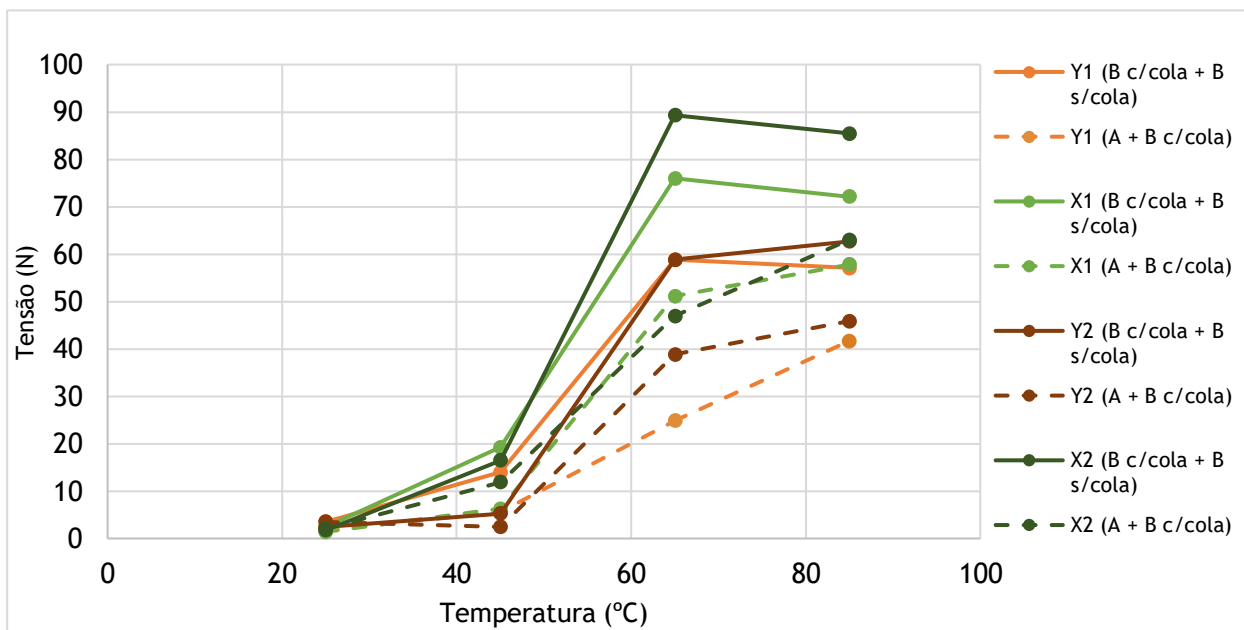


Figura 15 -Variação da força de rutura em função da temperatura, determinada no equipamento ABES.

Analisando a Figura 15, verifica-se que à temperatura de 25 °C os *foils* apresentam um comportamento semelhante. No entanto, à medida que a temperatura aumenta o comportamento dos produtos começa a variar, começando esta diferença a ser visível a partir dos 45 °C. É importante referir que esta pode não ser a temperatura mínima à qual os comportamentos dos papeis se começam a diferenciar. A tensão de rutura aumenta à medida que a temperatura aumenta, o que significa que a colagem das duas faces do *foil* é favorecida para valores de temperatura elevados.

Os *foils* do fornecedor X são os que apresentam maiores valores de tensão de rutura tanto na colagem da superfície A com a superfície B com cola como na colagem da superfície B sem cola com a superfície B com cola. Como foi referido anteriormente, apenas o *foil* deste fornecedor apresenta problemas de *blocking*, o que está de acordo com os resultados obtidos. Este problema está relacionado com a interação do adesivo com a superfície A que quando é suficientemente forte impede que o *foil* seja desbobinado e utilizado no processo de laminação. Comparando os resultados obtidos para os dois fornecedores verifica-se que o valor de força de rutura obtido no teste realizado para a colagem da superfície A com a superfície B dos *foils* do fornecedor X é muito semelhante ao obtido no teste de colagem entre a superfície B com cola com a superfície B sem cola dos produtos do fornecedor Y. Era esperado que a interação do adesivo com a superfície B do *foil* fosse muito mais forte do que a interação do adesivo com a superfície A, no entanto, os resultados indicam que as características de adesão da superfície A do fornecedor X são semelhantes às da superfície B do fornecedor Y. Desta forma, através do teste realizado, é possível concluir que as características do *foil* do fornecedor X não são as mais adequadas para a função pretendida para este produto. Por outro lado, através da análise da Figura 15, é possível observar que a maior diferença entre os valores força de rutura do teste de colagem da superfície B com cola com superfície B sem cola e os valores da colagem entre a superfície A e a superfície B com cola é observada nos produtos do fornecedor X, nomeadamente no produto X2. A diferença entre estes valores deve ser a maior possível, de forma a indicar que a força da ligação entre o adesivo e a superfície B é significativamente superior à da interação do adesivo com a superfície A. O facto de os produtos do fornecedor X apresentarem uma grande diferença entre estes valores é vantajosa, no entanto, o ideal seria que esta diferença se mantivesse, mas numa gama de valores de força média de rutura mais baixa. Isto porque como foi referido anteriormente, as superfícies A e B das matérias-primas provenientes do fornecedor X aderem ambas fortemente ao *hotmelt* e a diminuição da força de rutura é sinónimo do enfraquecimento da força de ligação entre estes materiais, sendo vantajoso para evitar o problema de *foil* colado entre camadas.

Analisando os *foils* do fornecedor X, os quais foram submetidos a tratamentos diferentes durante o seu fabrico, é possível observar que o comportamento dos dois produtos não variou

de forma significativa. Relativamente ao teste de colagem entre a superfície B com cola e a mesma superfície sem cola, verifica-se através da Figura 15, que o desempenho desta face do *foil* X1 que já era suficientemente boa, foi melhorada com a alteração do processo, resultando num aumento da tensão de rutura no *foil* X2. No entanto, a interação do adesivo com a superfície A, que devia enfraquecer, manteve-se aproximadamente semelhante nos *foils* X1 e X2, o que sustenta a ideia de que este produto não apresenta propriedades favoráveis à não ocorrência do problema de *foil* colado entre camadas.

#### 4.1.2 Avaliação da influência redução da gramagem de *hotmelt* aplicada

No estudo da influência da temperatura na ocorrência do problema de *foil* colado entre camadas concluiu-se que os *foils* do fornecedor X apresentavam uma maior diferença entre os valores de força de rutura do teste de colagem entre a superfície B com cola com essa mesma superfície sem cola e os valores do teste da superfície A com a superfície B com cola. No entanto, a interação do adesivo com as duas superfícies dos *foils* do fornecedor X é suficientemente forte, o que implica valores de tensão de rutura elevados em ambos os testes realizados. Desta forma, para evitar a ocorrência de *blocking*, o ideal seria manter a diferença de comportamento observada para as superfícies A e B dos *foils* do fornecedor X, mas transportar os valores de tensão de rutura para a gama de tensões obtida nos testes com os produtos do fornecedor Y. Para isso procedeu-se ao estudo da influência da redução da gramagem de *hotmelt* nos valores de tensão de rutura, utilizando o equipamento ABES.

Atualmente, em condições de produção normal, o IKEA *Industry* Portugal aplica  $22\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  do adesivo *hotmelt* em todos os *foils* utilizados no processo de laminação. Neste estudo foram testados três valores de gramagem diferentes, sendo eles  $16\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ,  $18\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  e  $20\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ , com o objetivo de perceber a influência da variação deste parâmetro na diminuição da força de rutura obtida nos ensaios do equipamento ABES. Este estudo foi efetuado no *foil* X1, uma vez que este é o único produto do fornecedor X utilizado, atualmente, em produção na secção *Foil&Wrapping*. Os resultados são apresentados na Figura 16. Todos os valores obtidos na realização deste teste, assim como os valores médios de gramagem de cada ensaio são apresentados no anexo D. De notar que, os valores apresentados no gráfico correspondem aos valores médios das três réplicas realizadas para cada ensaio.

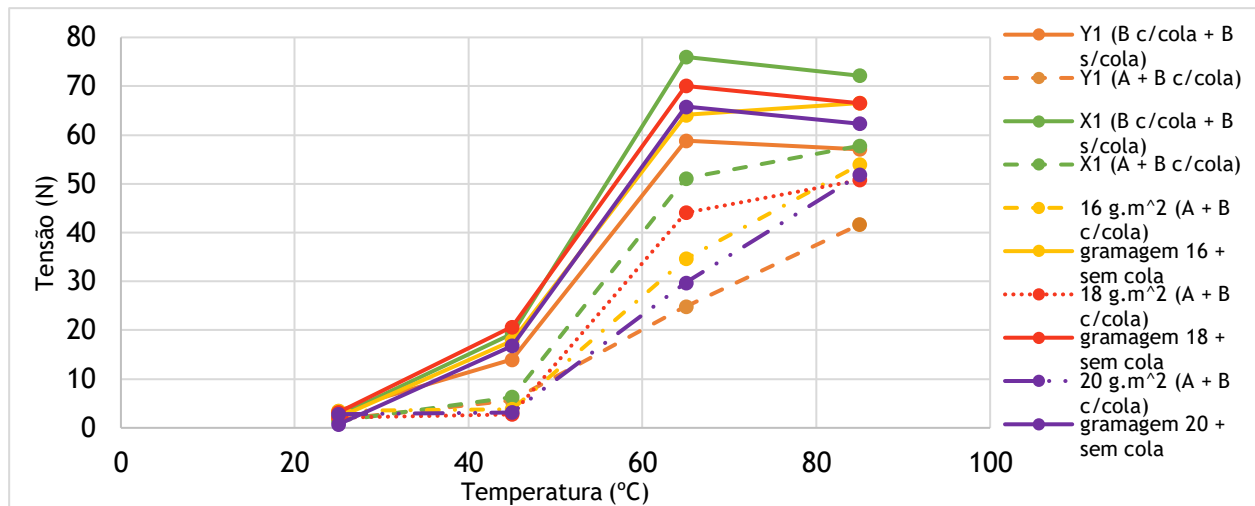


Figura 16 - Representação gráfica da variação da força de rutura em função da temperatura, para diferentes gramagens de hotmelt.

Observando a Figura 16, verifica-se que tanto no teste realizado entre a superfície A com a superfície B com cola como no teste entre a superfície B com cola e a superfície B sem cola a redução da quantidade de adesivo aplicada permitiu diminuir os valores de tensão de rutura do *foil* X1. No entanto, esta diminuição não é significativa. Além disso, quando comparados os ensaios realizados para os três valores de gramagens testados, verifica-se que a força de rutura obtida é muito semelhante, independentemente da quantidade de adesivo aplicada.

Tendo em conta os resultados obtidos nos ensaios realizados com os *foils* X1 e Y1 com a gramagem de  $22\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  e, comparando com os ensaios realizados com quantidades de adesivo menores verifica-se que, apesar de haver uma diminuição da força de rutura, os valores obtidos no teste entre a superfície A e a superfície B com cola se encontram muito próximos dos valores do teste entre a superfície B com cola e essa mesma superfície sem cola do fornecedor Y. Este resultado indica que a interação do *hotmelt* com a superfície A dos produtos do fornecedor X continua suficientemente forte, apesar da redução da quantidade de adesivo aplicada. O ideal seria que a força de rutura obtida nos ensaios realizados com redução de gramagem para a interação entre a superfície A e a superfície B com cola fosse o mais próxima possível da força de rutura obtida, para este mesmo teste, no *foil* Y1. No entanto, a diminuição da gramagem de adesivo aplicada no processo da *Pré-Coating* deve ser realizada de forma minuciosa, visto que é necessário garantir que a quantidade de *hotmelt* presente no revestimento é suficiente para obter uma boa adesão entre este e o painel. Desta forma e, visto que se conseguiu, de certa forma, realizar o objetivo pretendido para este estudo, ou seja, diminuir os valores de tensão de rutura do produto X1, foi necessário avaliar se a quantidade de adesivo presente no revestimento era suficiente para a adesão deste ao painel. Foi sugerida a realização de um teste, onde o objetivo seria perceber se o *foil* com gramagem de  $16\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  apresentava uma quantidade de adesivo suficiente para aderir ao painel. Foi escolhido este valor de gramagem,

de forma a estudar a situação limite de manipulação desta variável. O teste será realizado no período após o término deste projeto e será acompanhado pelo autor deste trabalho. No caso de se comprovar que a quantidade de adesivo aplicada ao revestimento é suficiente para que este adira ao painel será realizado um segundo teste que terá como objetivo perceber a influência da diminuição da gramagem na ocorrência de *blocking*, em situação de produção normal. Assim sendo, será colocado em armazém, um rolo de *foil* do fornecedor X com gramagem de  $16\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  durante várias semanas, com o objetivo de perceber se após um longo período de armazenamento é possível utilizar este produto na *Complete Line* sem que ocorra o problema de *blocking*.

#### 4.1.3 Avaliação da influência da pressão e do tempo de prensagem

O estudo da influência do tempo de prensagem e da pressão foram realizados em simultâneo no equipamento ABES. Para este teste apenas foi avaliada a colagem entre a superfície A e a superfície B do *foil*, uma vez que é a interação destas duas faces que está relacionada com o *blocking*. Foram realizados ensaios a duas pressões diferentes, nos quais foi medida a força de rutura para diferentes tempos de prensagem. O estudo da influência da pressão teve como objetivo simular e perceber o efeito da força exercida pelas camadas superiores de *foil* nas camadas internas do rolo, após o processo da *Pré-Coating*, na ocorrência do problema de *foil* colado entre camadas. Na Tabela 5 são apresentados os valores de pressão testados no equipamento ABES.

Tabela 5 - Registo dos valores de pressão testados no equipamento ABES.

P <sub>gás</sub> (bar)	P <sub>efetiva</sub> (bar)	P <sub>efetiva</sub> (MPa)
2,5	33,45	3,28
1,25	16,73	1,64

Os ensaios foram realizados para um intervalo de tempos de prensagem compreendido entre 20 s e 420s, à temperatura de 45°C, uma vez que é a partir deste valor que o comportamento dos *foils* se começa a diferenciar. Os resultados obtidos foram ajustados a um modelo de primeira ordem através da equação 9.

$$Y = Y_A [1 - (1 - \beta) \exp(kt)] \quad (9)$$

Onde  $Y$  corresponde à força de rutura,  $Y_A$  representa a tensão de rutura máxima do material,  $\beta$  é o envelhecimento e  $k$  a pseudo constante cinética de envelhecimento. Na Figura 17 é apresentado o ajuste dos resultados, sendo todos os valores medidos apresentados na Tabela E. 1 e na Tabela E. 2 do anexo E.

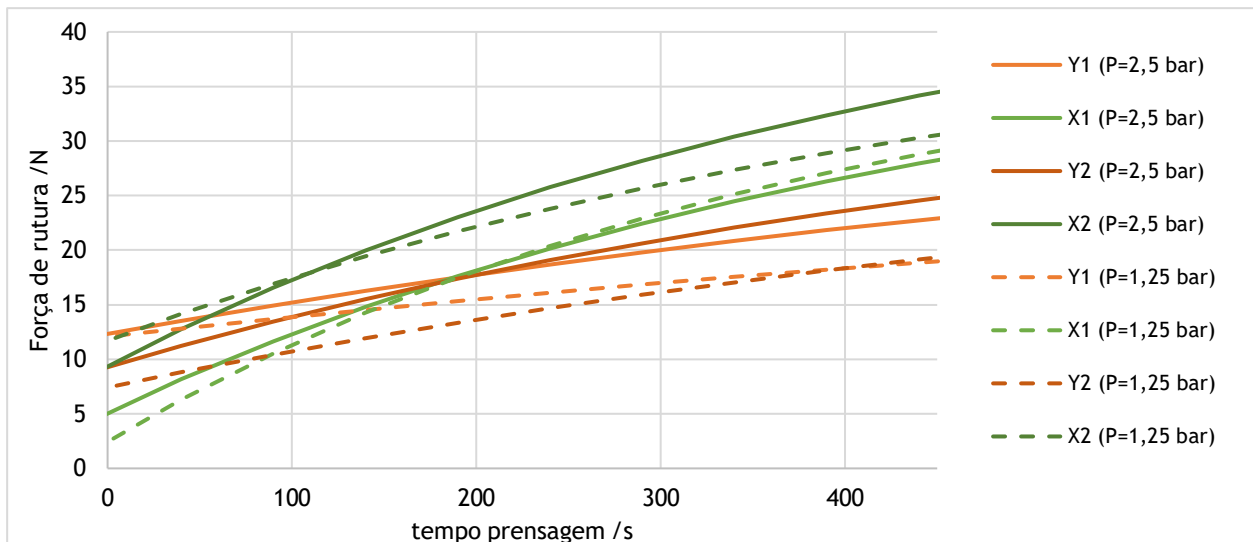


Figura 17 - Variação da força de rutura em função do tempo de prensagem para diferentes pressões, determinada no ABES.

Analisando a Figura 17, verifica-se que para todos os produtos em teste, a força de rutura aumenta com o aumento do tempo de prensagem. À semelhança dos resultados obtidos no estudo da influência da temperatura, também neste teste os *foils* do fornecedor X são os que apresentam maiores valores de tensão de rutura, para as duas pressões testadas. Além disso, o comportamento dos produtos dos dois fornecedores é diferente. No caso do fornecedor Y, verifica-se que para as duas pressões testadas os *foils* Y1 e Y2 têm comportamentos semelhantes, ou seja, à medida que o tempo de prensagem aumenta a tensão de rutura também aumenta, sendo a colagem da superfície A com a superfície B de ambos os *foils* favorecida pelo aumento da pressão. Relativamente ao fornecedor X, é possível observar que os dois *foils* em teste não se comportam da mesma forma. No caso do *foil* X1, verifica-se que os resultados obtidos para as duas pressões testadas são muito semelhantes, o que indica que o aumento da pressão não tem influência na colagem. Por outro lado, no *foil* X2 a influência do aumento da pressão no fortalecimento da colagem é mais visível, sendo este resultado mais aproximado ao comportamento dos produtos do fornecedor Y.

Através dos parâmetros do modelo de primeira ordem ao qual foram ajustados os resultados, foi possível avaliar a velocidade de envelhecimento das matérias-primas em teste, assim como o estado de envelhecimento máximo de cada uma. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 18 e na Figura 19.

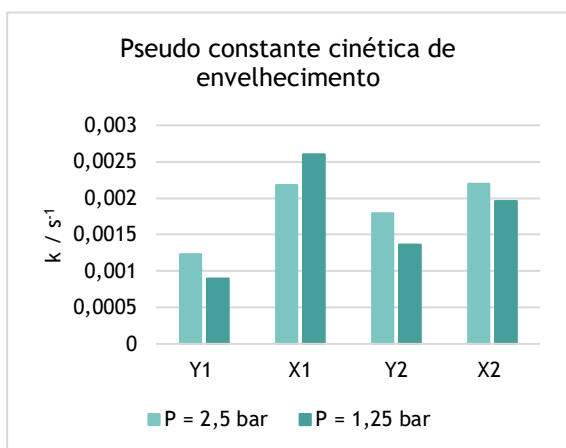


Figura 18 - Pseudo constante cinética de envelhecimento.

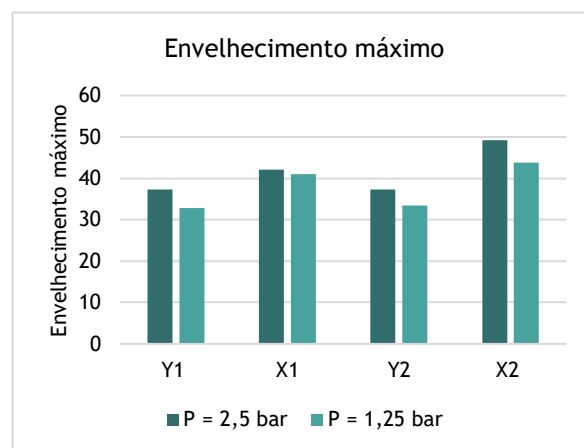


Figura 19 - Envelhecimento máximo dos revestimentos testados.

Analisando a Figura 18, verifica-se que os *foils* do fornecedor X são os que apresentam maior valor de pseudo constante cinética, o que significa que estes produtos envelhecem mais rapidamente. Na Figura 19 está representado o valor de envelhecimento máximo que cada um dos *foils* pode atingir. Observando os resultados constata-se que os produtos do fornecedor X são os que atingem um estado de envelhecimento mais avançado. Durante a realização deste projeto foi avaliada a evolução da tensão superficial dos *foils* X1 e Y1 ao longo do tempo, utilizando o método de marcadores de teste. Concluiu-se que este parâmetro aumenta de forma significativa no *foil* X1 comparativamente ao *foil* Y1. O resultado obtido está de acordo com os valores apresentados na Figura 18 e na Figura 19, uma vez que o aumento da tensão superficial pode ocorrer devido ao envelhecimento das matérias-primas. O envelhecimento dos materiais pode dever-se a vários fatores, no entanto, neste caso suspeita-se que seja agravado pela volatilização de determinados componentes presentes no adesivo ou devido à ação da humidade relativa.

Durante a realização deste projeto houve a necessidade de determinar a temperatura nas camadas internas do rolo e a pressão exercida pelas camadas superiores nas camadas inferiores. Para isso recorreu-se à utilização de papeis indicadores de pressão e temperatura que permitem determinar estes parâmetros através da mudança de cor. Na Figura 20 e na Figura 21 é possível observar dois exemplos destes papeis.



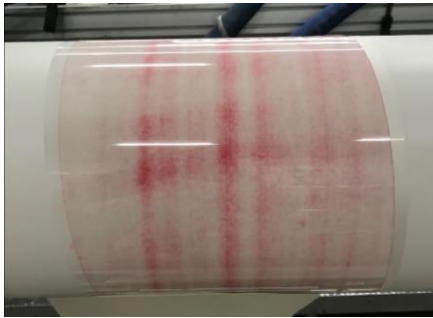


Figura 20 - Papel indicador de pressão.



Figura 21 - Papel indicador de temperatura.

Para a determinação dos valores de pressão e temperatura reais nas camadas internas foi produzido um rolo na *Pré-Coating*, no qual os papeis indicadores de pressão e temperatura foram colocados após a aplicação de cola, num diâmetro de aproximadamente 200mm. O rolo foi fabricado nas condições de produção normal e, posteriormente desbobinado. Através da mudança de cor observada nos papeis foi possível determinar os valores reais das variáveis no interior do rolo, tendo-se obtido uma pressão de 0,55 MPa e uma temperatura de 25 °C. Suspeitava-se que a temperatura no interior do rolo fosse mais elevada, no entanto, o teste foi realizado num dia em que a temperatura ambiente não era muito elevada. No caso de aumentar a temperatura ambiente é possível que a temperatura no interior do rolo também aumente. Conhecendo os valores reais de pressão e temperatura, procedeu-se à simulação destas condições no equipamento ABES. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 22. Na Tabela E. 3 do anexo E são apresentados os valores obtidos na realização dos ensaios.

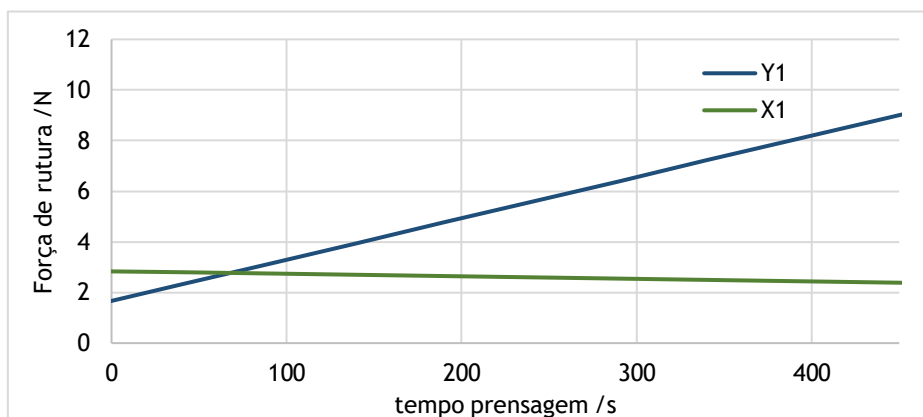


Figura 22 - Simulação no equipamento ABES das condições reais de pressão e temperatura na linha.

Analisando a Figura 22, verifica-se que a força de rutura obtida para o *foil* do fornecedor X ao longo do tempo mantém-se aproximadamente constante. Por outro lado, para o *foil* do fornecedor Y, observa-se um aumento significativo da força de rutura à medida que o tempo de prensagem aumenta. Este resultado não está de acordo com o esperado, uma vez que apenas

as matérias-primas proveniente do fornecedor X dão problemas de *foil* colado entre camadas, pelo que deveria observar-se um aumento da força de rutura no *foil* X1 e não no Y1.

#### 4.1.4 Determinação da energia livre de superfície

Como referido no capítulo 2, a energia livre de superfície dos *foils* foi determinada por dois métodos diferentes: por medição dos ângulos de contacto e através de marcadores de teste. Este parâmetro é influenciado pela rugosidade do material, pelo que se procedeu à medição da rugosidade, na direção longitudinal, em ambas as faces dos quatro *foils* testados. Os resultados obtidos para os parâmetros  $Ra$  e  $Rz$  são apresentados na Figura 23 e na Figura 24. Na Tabela F. 1 e na Tabela F. 2 do anexo F são apresentados os valores medidos para os parâmetros  $Ra$  e  $Rz$ , nas superfícies A e B dos revestimentos estudados e o respetivo desvio padrão.

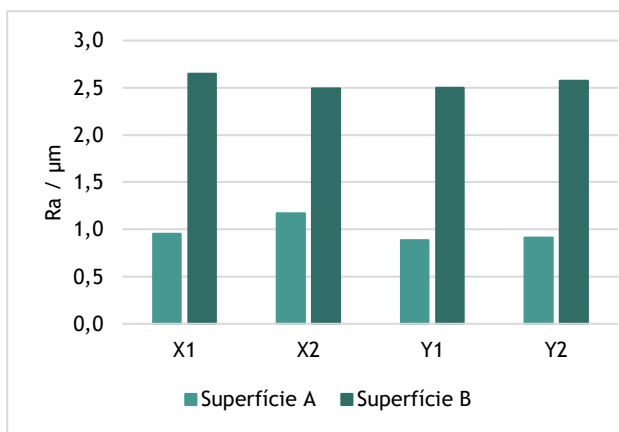


Figura 23 - Variação do parâmetro  $Ra$  nas superfícies A e B dos foils testados.

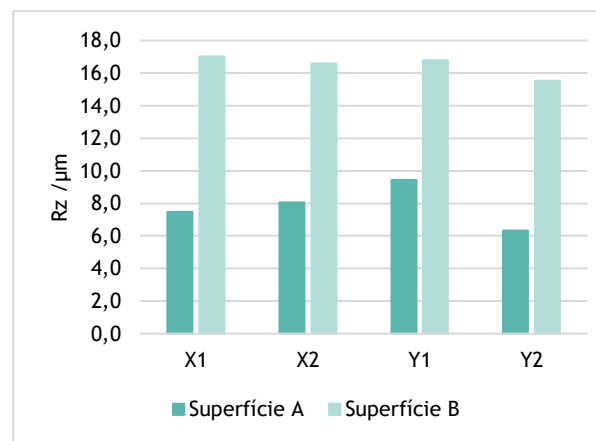


Figura 24 - Variação do parâmetro  $Rz$  nas superfícies A e B dos foils testados.

Analisando os resultados apresentados na Figura 23, é possível observar que na superfície B que corresponde à face onde é aplicado o adesivo, os valores obtidos para a rugosidade média aritmética são semelhantes para os produtos de ambos os fornecedores. O mesmo acontece no parâmetro  $Rz$  (Figura 24) que corresponde à média aritmética dos valores máximos do perfil de rugosidade. Relativamente à superfície A, é possível observar uma maior oscilação nos valores obtidos para os parâmetros  $Ra$  e  $Rz$  dos quatro *foils* em teste. Os *foils* do fornecedor Y são os que apresentam menor valor de rugosidade média aritmética, quando comparados com os produtos do fornecedor X. Isto está de acordo com o esperado, uma vez que quanto maior for a rugosidade de uma superfície maior será a tendência do adesivo para aderir a essa mesma superfície. Como foi referido anteriormente, o *blocking* está diretamente relacionado com a interação do *hotmelt* com a superfície A do *foil*, pelo que valores elevados do parâmetro  $Ra$  se refletem numa maior tendência para ocorrer o problema de *foil* colado entre camadas e este

está associado ao fornecedor X. Além disso, é importante referir que as alterações realizadas no processo deste fornecedor não foram favoráveis à resolução do problema, visto que a rugosidade média aritmética do *foil* X2 aumentou relativamente ao *foil* X1, favorecendo a adesão do *hotmelt* à superfície A.

O parâmetro  $Ra$  é pouco sensível a valores atípicos, enquanto que o parâmetro  $Rz$  tem maior sensibilidade a alterações no acabamento superficial. Tendo em conta estas propriedades e, através dos resultados apresentados na Figura 23 e na Figura 24 é possível verificar que a diferença entre os valores obtidos da superfície A para a superfície B relativamente ao parâmetro  $Rz$  é significativamente superior à do parâmetro  $Ra$ . A superfície A é menos rugosa, o que significa que as estrias nesta face do *foil* são regulares e de baixa amplitude, refletindo-se num valor mais baixo de  $Rz$ , por outro lado, a superfície B por ser mais rugosa possui estrias mais irregulares e com elevada amplitude que tornam o valor de  $Rz$  significativamente superior. Desta forma, é possível concluir que as diferenças relacionadas com o acabamento superficial das faces A e B do *foil* são muito mais visíveis no parâmetro  $Rz$  do que no parâmetro  $Ra$ .

#### 4.1.4.1 Marcadores de teste

Os marcadores de teste são um método fácil e prático para a determinação da energia livre de superfície de determinadas superfícies e, por isso é utilizado na IKEA *Industry* Portugal para o controlo de receção das matérias-primas. Na realização deste projeto procedeu-se à medição da energia livre de superfície utilizando este método. Os resultados são apresentados na Tabela 6.

*Tabela 6 - Registo dos valores obtidos para a energia livre de superfície pelo método dos marcadores de teste.*

<i>Foil</i>	Energia livre de superfície ( $\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	
	Superfície A	Superfície B
X1	32-34	>42
X2	30-31	>42
Y1	<28	>42
Y2	<28	>42

Como foi referido no capítulo 3, a IKEA *Industry* Portugal exige aos fornecedores que os seus produtos apresentem uma energia livre de superfície inferior a  $32\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$  na superfície A e superior a  $38\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$  na superfície B. Por análise da Tabela 6, é possível concluir que na superfície B todos os *foils* apresentam valores de energia livre de superfície superiores a  $42\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$  e, por isso, cumprem o requisito definido pela empresa. Na superfície A ambos os *foils* do fornecedor Y apresentam uma energia livre de superfície inferior ao valor estipulado, no entanto, isso não se verifica nos produtos do fornecedor X. Neste caso, os *foils* X1 e X2

apresentam uma energia livre de superfície muito próxima do valor máximo estabelecido, pela empresa, para a superfície A, o que se reflete na ocorrência do problema de *foil* colado entre camadas.

#### 4.1.4.2 Determinação dos ângulos de contacto

Os ângulos de contacto são um parâmetro termodinâmico que permite caracterizar o fenómeno de molhabilidade. Como foi referido no capítulo 3, realizaram-se ensaios onde foram medidos os ângulos de contacto utilizando três líquidos: água, etilenoglicol e n-hexadecano, sendo os valores obtidos apresentados na Tabela F. 3 e na Tabela F. 4 do anexo F. Através das medições efetuadas foi possível calcular as componentes polar e dispersiva e, conseqüentemente obter a energia livre de superfície para cada face dos *foils* analisados. Os resultados são apresentados na Tabela 7. De notar que este método também foi utilizado para determinar a energia livre de superfície do adesivo *hotmelt* aplicado na *Pré-Coating*, com o objetivo de perceber a aptidão deste para criar ligações com as superfícies do *foil*.

*Tabela 7 - Registo dos valores das componentes polar e dispersiva e da respetiva energia livre de superfície para os foils testados.*

Foil	Superfície A			Superfície B		
	$\gamma_{sv}^p$	$\gamma_{sv}^d$	Energia livre de superfície ( $mN \cdot m^{-1}$ )	$\gamma_{sv}^p$	$\gamma_{sv}^d$	Energia livre de superfície ( $mN \cdot m^{-1}$ )
X1	6,85	24,9	31,8	0,178	27,6	27,8
X2	7,72	25,3	33,0	1,28	28,2	29,5
Y1	1,27	24,2	25,4	0,539	22,6	23,1
Y2	4,03	24,8	28,8	1,62	23,6	25,3
Adesivo	0,212	27,2	27,4			

Através dos resultados apresentados na Tabela 7, é possível observar que, para ambas as superfícies dos quatro *foils* analisados, os produtos do fornecedor X apresentam maior energia livre de superfície do que os do fornecedor Y. Comparando os resultados obtidos para as superfícies A e B, verifica-se que a componente dispersiva pouco varia de uma face para a outra, no entanto a componente polar é significativamente superior na superfície A, o que resulta num maior valor de energia livre de superfície nesta face.

Tendo em conta os critérios estabelecidos para o controlo de receção destas matérias-primas e, analisando os resultados da Tabela 7 é possível concluir que os valores obtidos para a energia livre de superfície da superfície A estão dentro do valor esperado. No entanto, é importante salientar que, à semelhança dos resultados obtidos pelo método dos marcadores, os *foils* do fornecedor X se encontram muito próximos do valor máximo aceite. Relativamente à superfície B, era esperado que os valores obtidos fossem superiores a  $38mN \cdot m^{-1}$ , o que não se verifica. Os

critérios definidos pela *IKEA Industry* foram estipulados tendo em conta o método dos marcadores de teste. Analisando os valores obtidos através dos dois métodos é possível concluir que os resultados apenas são semelhantes para a superfície A. A discrepância observada nos resultados da superfície B deve-se ao facto de os métodos utilizados medirem parâmetros diferentes e, por isso não poderem ser comparados. A medição realizada com os marcadores de teste tem em conta o atrito da superfície, enquanto que os ângulos de contacto consideram a rugosidade intrínseca. Desta forma, na superfície A onde o atrito é menor os resultados obtidos pelos dois métodos são semelhantes. O mesmo não acontece na superfície B, uma vez que esta apresenta valores de rugosidade mais elevados e, por isso o valor obtido utilizando os marcadores de teste é significativamente superior ao calculado através da medição dos ângulos de contacto. Além disso, alguns estudos demonstram que os marcadores de teste com tensão superficial de  $28\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$  são quase ou totalmente apolares, sendo que a polaridade aumenta com o aumento da tensão superficial dos marcadores. No caso de a energia livre de superfície do sólido ser igual à tensão superficial do líquido e a polaridade das duas superfícies também ser semelhante, o resultado obtido pelos dois métodos deverá ser o mesmo. Caso a polaridade seja diferente, o resultado obtido pelos dois métodos será diferente (kruss, 2014).

A energia livre de superfície obtida para o adesivo *hotmelt* foi de  $27,4\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$ . Para evitar a ocorrência de *blocking*, era esperado que o adesivo utilizado no processo da *Pré-Coating* apenas tivesse tendência para interagir com a superfície B do *foil*. Desta forma, a energia livre de superfície do *hotmelt* deveria estar compreendida entre os valores estabelecidos como critério, ou seja, deveria ser superior a  $32\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$  para que não interagisse com a superfície A e inferior a  $38\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$ , de modo a possuir propriedades de adesão à superfície B. Analisando o valor obtido, verifica-se que este é inferior a  $32\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$ , o que indica que está fora do intervalo pretendido. Pelos resultados apresentados anteriormente, ambos os métodos indicam que os produtos do fornecedor Y possuem valores de energia livre de superfície inferiores a  $28\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$  na superfície A. Como o valor obtido para o adesivo *hotmelt* se encontra muito próximo dos  $28\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$ , a tendência para este aderir à superfície A dos *foils* Y1 e Y2 é muito baixa. O mesmo não acontece com os *foils* do fornecedor X, uma vez que estes apresentam valores de energia livre de superfície superiores a  $27,4\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$  e, por isso a tendência do adesivo para criar ligações fortes com a superfície A dos *foils* X1 e X2 é elevada. Estes resultados estão de acordo com o esperado, visto que as matérias-primas provenientes do fornecedor X são as que apresentam problemas de *foil* colado entre camadas.

## 4.2 Bolhas na lateral do painel

O aparecimento de bolhas na lateral do painel observa-se com maior frequência nos elementos de maior espessura e que são revestidos com *foil* de cor WSO (*White Stained Oak*) e *Black Brown*. Como explicado no capítulo 2, durante o processo na *Complete Line* são aplicados três adesivos na lateral do painel, pelo que houve a necessidade de tentar identificar o local de falha onde resulta o aparecimento de uma bolha. Na Figura 25 é apresentado um esquema das camadas que constituem a lateral do painel após o processo da *Complete Line*.

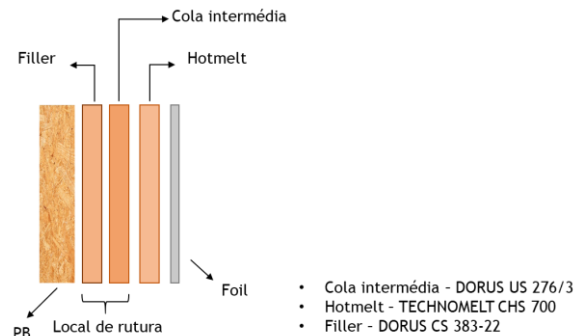


Figura 25- Ilustração da constituição da lateral do painel.

Com o intuito de perceber as causas deste problema e procurar soluções, foram realizadas várias ações no período anterior à realização deste projeto. O histórico de ações permitiu concluir que o aparecimento de bolhas está associado à má colagem do *foil* à lateral do painel. Além disso, a ação que se demonstrou mais eficiente foi o aumento da quantidade de cola intermédia aplicada, tendo permitido minimizar o problema. Desta forma, através da análise do histórico de ações realizadas pela empresa foi possível concluir que a rutura ocorre entre a camada de *filler* e a de cola intermédia.

### 4.2.1 Análise Mecânica Dinâmica (DMA)

De modo a sustentar a ideia de que a rutura na lateral ocorre entre a camada de *filler* e a de cola intermédia foi realizada uma Análise Mecânica Dinâmica que permitiu caracterizar a resistência dos adesivos e perceber se apresentavam algum tipo de limitação. Os adesivos foram sujeitos a dois ciclos consecutivos de aquecimento e arrefecimento, onde foi medido o módulo de elasticidade de modo a analisar a capacidade de resposta destes materiais a um processo de deformação. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 26, na Figura 27 e na Figura 28. É importante referir que a análise dos resultados foi realizada tendo em conta que os adesivos utilizados no processo são materiais plásticos, no entanto, as informações disponibilizadas pelo fornecedor não são suficientes para confirmar por completo esta afirmação.

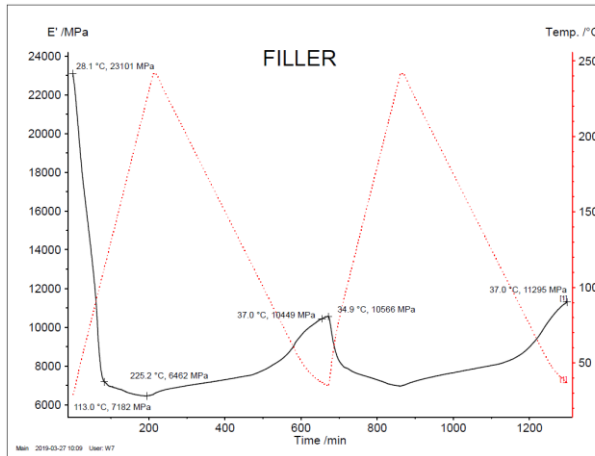


Figura 26 - Módulo de elasticidade (DMA) do filler utilizado na Complete Line.

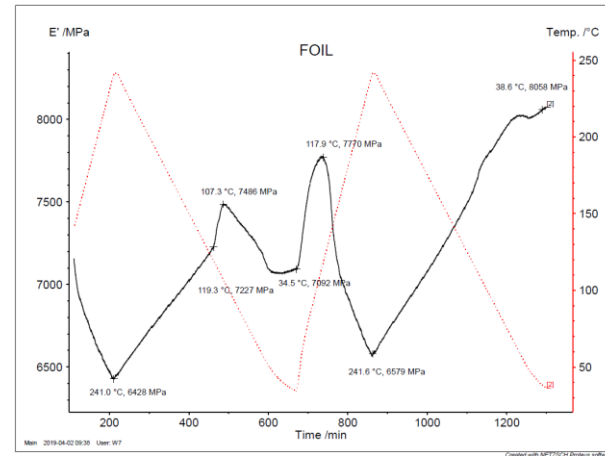


Figura 27 - Módulo de elasticidade (DMA) do hotmelt aplicado ao foil.

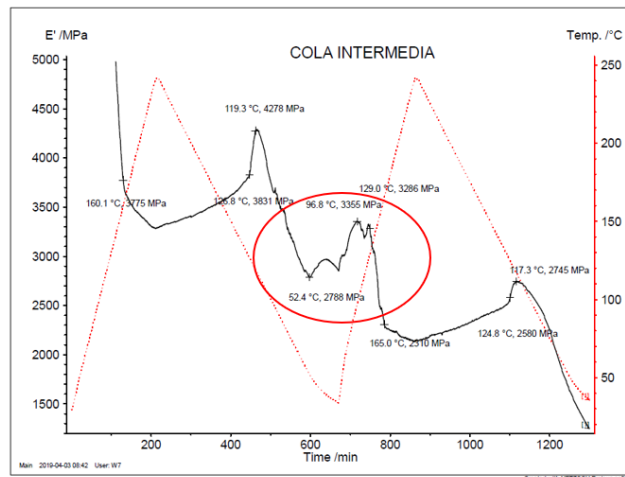


Figura 28 - Módulo de elasticidade da cola intermédia utilizada no processo da Complete Line.

Quando um material se encontra no estado sólido o seu módulo de elasticidade apresenta um valor elevado, à medida que é aquecido o valor deste parâmetro tende a diminuir como consequência do aumento da viscosidade do material. Analisando os resultados obtidos por DMA aos três adesivos estudados, verifica-se que estes se comportam de maneira diferente ao serem aquecidos e arrefecidos duas vezes consecutivas. Na Figura 26, na Figura 27 e na Figura 28 a linha vermelha a tracejado corresponde à variação da temperatura, enquanto que a linha a preto diz respeito à variação do módulo de elasticidade. Era esperado que o perfil obtido para o módulo de elasticidade durante o primeiro ciclo de aquecimento e arrefecimento dos materiais se reproduzisse no segundo ciclo. Por observação dos resultados dos ensaios efetuados verifica-se que isto apenas se observa na Figura 26, que corresponde ao teste realizado ao *filler*. O facto do perfil seguir a mesma tendência de um ciclo para o outro significa que o material preserva as suas características. Durante o primeiro aquecimento, as características do material são alteradas, sendo isto justificado pelo facto de o módulo de elasticidade no final

do primeiro arrefecimento ser muito inferior ao valor deste parâmetro no início do ensaio. No entanto, como foi referido anteriormente, há uma reprodução do perfil de um ciclo para o outro, o que significa que após esta modificação as características do *filler* não voltam a ser alteradas. Por observação da Figura 27, que corresponde à análise realizada ao adesivo *hotmelt* aplicado ao *foil* no processo da *Pré-Coating*, verifica-se que quando este material foi arrefecido pela primeira vez, o módulo de elasticidade deveria ter aumentado até atingir a temperatura de 34 °C definida previamente e isso não aconteceu. O módulo de elasticidade aumenta enquanto a amostra é arrefecida até atingir os 107°C. Para temperaturas abaixo desta o módulo de elasticidade diminui. Esta anomalia na variação do módulo de elasticidade pode ser justificada pelo facto de haver uma reorganização da estrutura do adesivo. No entanto, no final do segundo ciclo, verifica-se que o módulo de elasticidade é elevado, o que indica que o material se tornou mais cristalino comparativamente ao seu estado inicial, devido à alteração observada no primeiro arrefecimento. Na Figura 28 está representado o ensaio realizado à cola intermédia aplicada sobre o *filler*, no processo da *Complete Line*. O material é aquecido e o seu módulo de elasticidade diminui, quando se inicia o arrefecimento o módulo de elasticidade começa a aumentar, no entanto para temperaturas inferiores a 119°C este parâmetro oscila de forma significativa. Esta zona irregular é assinalada por uma circunferência na Figura 28 e pode ser justificada pelo facto de para temperaturas inferiores a 119°C o adesivo se reorganizar, modificando a sua estrutura inicial e, por consequência passar de um material cristalino a amorfo. Esta alteração na estrutura do material é comprovada pelo facto de o módulo de elasticidade, no final do ensaio ser significativamente diferente do valor inicial deste parâmetro. A diminuição do módulo de elasticidade no segundo ciclo sustenta a ideia de que o material adquire características amorfas. Desta forma, para evitar que a cola intermédia perca as suas características iniciais e para obter uma boa colagem da lateral do painel é necessário que este material não atinja temperaturas inferiores a 130°C no momento do contacto com o *filler*.

Para uma melhor compreensão da limitação deste adesivo é apresentado o esquema da Figura 29.

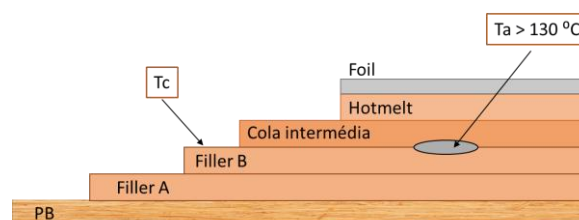


Figura 29 - Ilustração do problema de aparecimento de bolhas na lateral do painel.

Como foi referido anteriormente, para temperaturas inferiores a 130°C, as características da cola intermédia são alteradas e esta não adere corretamente ao *filler*. O esquema da Figura 29



pretende ilustrar este problema. Para que a adesão da cola intermédia ao *filler* seja realizada corretamente, a temperatura de equilíbrio da interface comum aos dois adesivos,  $T_a$ , não pode ser inferior a 130°C. Caso esta condição não se verifique pode ocorrer a formação de uma bolha que está associada à má colagem.

Tendo em conta as conclusões obtidas, foram analisadas as variáveis do processo da *Complete Line* que de alguma forma influenciam  $T_a$ . Este parâmetro é influenciado pela temperatura do rolo espatulador colocado entre o *nozzle* de aplicação da segunda camada de *filler* e o de aplicação de cola intermédia, pela quantidade de cola intermédia aplicada, pela temperatura de aplicação desta e, conseqüentemente pela temperatura a que o *filler* se encontra antes do contacto com a cola intermédia,  $T_c$ . Para evitar a má colagem da lateral do painel é necessário manter a temperatura de equilíbrio dos dois adesivos,  $T_a$ , o mais elevada possível. O aumento desta variável é conseguido através do aumento dos valores dos quatro parâmetros referidos anteriormente. No entanto, por se tratar de um processo à escala industrial, nem sempre é possível manipular as variáveis na proporção desejada. O aumento da temperatura do rolo espatulador não é uma alteração viável para o processo, uma vez que este elemento é utilizado para exercer pressão sobre a camada de *filler* e, quando se aumenta a sua temperatura começa a retirar o *filler* e não a pressioná-lo. A cola intermédia é aplicada a 195°C que já é uma temperatura bastante elevada, pelo que não pode ser aumentada. Desta forma, restam apenas duas variáveis que podem ser manipuladas. No entanto, como já foi referido, os estudos realizados antes da elaboração deste projeto demonstraram que o aumento da quantidade de adesivo aplicada favorece uma boa colagem da lateral do painel, pelo que a variável com mais interesse em ser estudada é a temperatura do *filler* antes a aplicação da cola intermédia. Quanto maior for  $T_c$ , maior será a temperatura na interface comum aos dois adesivos. O aumento deste parâmetro é conseguido através do aumento da temperatura de aplicação do *filler*, do aumento da temperatura do rolo espatulador colocado após o *nozzle* de aplicação da segunda camada de *filler*, do aumento da velocidade da linha e da temperatura ambiente e pela diminuição da humidade relativa e da humidade do painel. Apesar da temperatura  $T_c$  ser influenciada por diversas variáveis, a grande maioria não pode ser manipulada devido às limitações do processo. A humidade relativa, a temperatura ambiente e a humidade do painel são variáveis difíceis de controlar, pelo que não se pode proceder à sua manipulação. O aumento da velocidade da linha não é uma alteração favorável ao processo, uma vez que o valor desta variável sofre constantemente alterações devido às condições de operação da linha de produção. Além disso, a temperatura de aplicação do *filler*, por já ser suficientemente elevada, também não pode ser alterada, da mesma forma que não é possível manipular a temperatura do rolo espatulador pelo motivo referido anteriormente. Devido à impossibilidade de alterar as variáveis referidas anteriormente, de modo a estudar a influência do aumento da temperatura do *filler* antes do contacto com a cola intermédia, houve a necessidade de

procurar alternativas que permitissem manipular esta variável. Assim sendo, para validar as conclusões do ensaio de DMA, foram realizados testes em produção, os quais tiveram como principal objetivo perceber a influência da variação da temperatura do *filler* antes do contacto entre os dois adesivos. Desta forma, foram testados o melhor e o pior cenário relativamente à alteração deste parâmetro. Realizaram-se dois testes, no primeiro aqueceu-se o *filler* após o rolo espatulador e antes da aplicação da cola intermédia e no segundo teste arrefeceu-se o *filler* exatamente na mesma etapa do processo. O teste foi realizado num dos produtos mais críticos, ou seja, material de espessura 30mm revestido com *foil* WSO. Após o processo da *Complete Line*, as peças resultantes foram armazenadas e inspeccionadas após 2h e 6h. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados obtidos no teste de produção na *Complete Line*.

Teste	Ti (°C)	Tf (°C)	n° total peças	Após 2h	Após 6h
				% peças afetadas	% peças afetadas
1	45	60-65	120	5,83	13,3
2		36-40	114	34,2	42,1

No teste 1 foi utilizado um aquecedor para aumentar a temperatura da segunda camada de *filler* entre o rolo espatulador e o *nozzle* de aplicação de cola intermédia, enquanto que no teste 2 se utilizou ar comprimido para diminuir a temperatura na mesma etapa do processo da *Complete Line*. De notar que, nas condições de produção normal, a temperatura do *filler* antes da aplicação da camada de cola intermédia é de aproximadamente 45°C. De acordo com os resultados obtidos através do método DMA, era esperado que no teste 1, ao aquecer o *filler* não aparecessem bolhas nas laterais das peças. Por outro lado, no teste 2 as peças fabricadas deveriam apresentar uma percentagem de bolhas significativa. Analisando a Tabela 8, observa-se que a percentagem de peças afetadas após 2h e 6h no teste 2 é consideravelmente superior à percentagem obtida para o teste 1. Apesar de no teste 1 se ter observado a formação de bolhas na lateral das peças e isso não estar de acordo com o esperado, é possível concluir que os resultados obtidos seguem a tendência expectável. O teste não foi realizado nas condições mais adequadas, pelo que não foi possível aumentar nem diminuir de forma significativa a temperatura do *filler*, sendo esta uma possível justificação para os resultados obtidos. Ao aumentar a temperatura do *filler* antes do contacto deste com a cola intermédia, era esperado que a temperatura de equilíbrio aumentasse, no entanto, o aumento de 45°C para 65°C pode não ter sido suficiente para que a temperatura da interface fosse superior a 130°C. Além disso, no teste 2 quase não se conseguiu arrefecer o *filler*, pelo que não foi possível testar o efeito do pior cenário relativo à manipulação desta variável. A realização do teste com condições que permitissem variar significativamente a temperatura do *filler* antes do contacto deste com a cola intermédia possivelmente iria ampliar a discrepância entre a percentagem de peças afetadas do teste 1 para o teste 2.

#### 4.2.2 Calorimetria Diferencial de Varrimento (DSC)

As conclusões do teste de DMA realizado indicam que a temperatura de equilíbrio do *filler* e da cola intermédia não pode ser inferior a 130°C, sendo necessário que a cola intermédia possua uma baixa capacidade para variar a sua temperatura, de modo a não arrefecer rapidamente. Desta forma, foi realizada a Calorimetria Diferencial de Varrimento, que permitiu determinar o calor específico dos dois adesivos onde ocorre a rutura. Este estudo permitiu perceber se os adesivos apresentam as características adequadas para serem utilizadas no processo de laminação.

O método DSC foi utilizado para avaliar transições de fase ou eventualmente reações químicas que causam variações de entalpia nos adesivos utilizados. Para que o *filler* e a cola intermédia apresentem uma boa adesão é necessário que possuam determinadas características que favoreçam essa ligação. Se um determinado material possui um valor elevado de calor específico significa que não tem tendência para aumentar ou diminuir a sua temperatura. Por outro lado, caso o valor deste parâmetro seja baixo, o material consegue variar a sua temperatura com facilidade. Os estudos realizados indicam que a temperatura de equilíbrio da interface cola intermédia/*filler* deve ser o mais elevada possível, de forma a não baixar dos 130°C. A temperatura de aplicação da cola intermédia é de 195°C, pelo que o ideal seria o seu calor específico fosse de tal forma elevado que impedisse que a temperatura diminuísse significativamente. Além disso, o *filler* deverá ser capaz de variar a sua temperatura com alguma facilidade. Através da análise do DSC, apresentada na Figura G. 1 e na Figura G. 2 do anexo G, foi possível calcular o calor específico de cada um dos adesivos pelo cálculo da derivada do calor em relação à temperatura. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 30. De notar que apenas são apresentados os resultados relativos às etapas de aquecimento dos ensaios realizados.

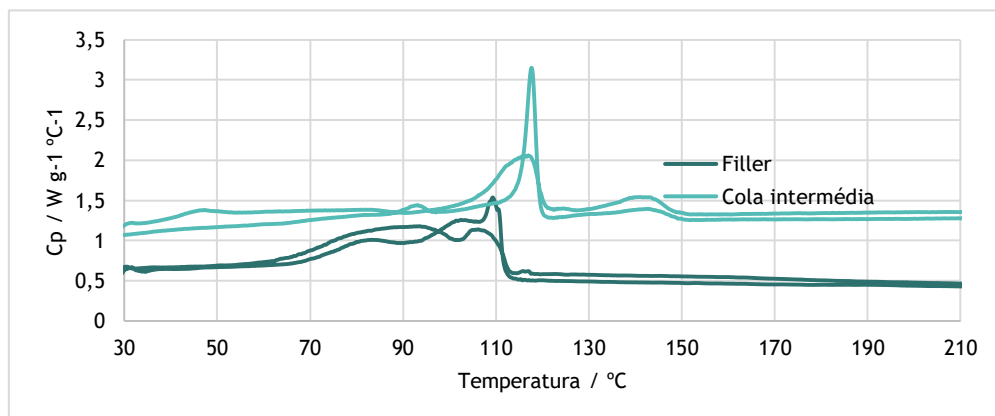


Figura 30 - Variação do calor específico em função da temperatura (DSC) para o filler e para a cola intermédia.

Observando a Figura 30, onde é apresentada a variação do calor específico dos dois adesivos analisados em função da temperatura, verifica-se que o  $C_p$  sofre algumas variações ao longo do ensaio. Os picos observados nas análises DSC são, normalmente associados à ocorrência de reações químicas ou a transformações físicas dos materiais. Como os adesivos utilizados na secção *Foil&Wrapping* são materiais não reativos, pode concluir-se que as oscilações observadas na Figura 30 se devem a modificações na estrutura dos adesivos. Analisando o gráfico obtido para o *filler*, verifica-se que há uma modificação estrutural aproximadamente entre os 70°C e os 112°C, sendo que a partir desta temperatura o calor específico se mantém aproximadamente constante. Tendo em conta o resultado obtido pelo método DMA para este adesivo, verifica-se que a modificação observada no DSC coincide com a alteração das características ocorrida durante o primeiro aquecimento da Análise Mecânica Dinâmica. Como foi referido, após esta modificação, as características do adesivo não se voltaram a alterar, sendo isso comprovado pela não alteração do  $C_p$ . No ensaio relativo à cola intermédia observa-se um pico por volta dos 120 °C e outro aos 140 °C, que correspondem a alterações estruturais do adesivo. Para temperaturas superiores a 140°C verifica-se que o  $C_p$  não se altera, pelo que é necessário que a temperatura de equilíbrio da interface cola intermédia/*filler* seja superior a este valor. Estes resultados estão de acordo com os resultados obtidos pelo método DMA. Assim sendo, é possível concluir que para obter uma boa colagem da lateral do painel é necessário que, no momento de contacto entre os dois adesivos, a temperatura seja suficientemente alta, de tal forma que evite a reestruturação dos adesivos e a alteração das suas características.

Relativamente à diferença entre os valores de calor específico dos dois adesivos estudados, é possível observar na Figura 30, que estes são muito diferentes. Como foi referido anteriormente, para os adesivos apresentarem características favoráveis à realização de uma boa colagem da lateral sem o aparecimento de bolhas, o calor específico da cola intermédia deveria ser muito superior ao do *filler*. Pelos resultados obtidos, é possível concluir que esta condição é verificada. Assim sendo, garantindo que temperatura de equilíbrio da interface *filler*/cola intermédia é superior a 130°C, é possível concluir que os adesivos apresentam as características necessárias para a obtenção de uma boa colagem da lateral do painel.

## 5 Conclusões

A secção *Foil&Wrapping* é a responsável pela maioria da sucata produzida no fluxo *Foil*. Atualmente, o problema de *foil* colado entre camadas e o aparecimento de bolhas na lateral dos painéis representam uma parte significativa desse valor. Com o intuito de reduzir o desperdício, a IKEA *Industry* Portugal teve a necessidade de estudar estes problemas e procurar alternativas viáveis e sustentáveis.

O problema de *foil* colado entre camadas, *blocking*, ocorre apenas no revestimento de cor *White gloss 10* proveniente do fornecedor X e está relacionado com a interação entre o adesivo *hotmelt* aplicado na *Pré-Coating* e a superfície A do *foil*, face exterior.

Avaliou-se a influência da temperatura na colagem entre a superfície A e a superfície B com cola e entre a superfície B com cola e a superfície B sem cola. Através deste estudo verificou-se que o aumento da temperatura favorece a colagem destas superfícies. Os resultados obtidos demonstraram que a interação do adesivo com as superfícies A e B do *foil* do fornecedor X são ambas significativamente fortes, quando comparadas com os resultados obtidos para os produtos do fornecedor Y. Além disso, verificou-se que a interação entre a superfície A do fornecedor X e o adesivo é muito semelhante à interação entre a superfície B do *foil* do fornecedor Y e o adesivo. Este resultado permitiu concluir que as características da superfície A do revestimento do fornecedor X não são as mais adequadas para a função pretendida para este produto. De forma a conseguir o enfraquecimento da ligação entre as faces do *foil* do fornecedor X e o adesivo, foi estudada a influência da redução da gramagem de *hotmelt*. Os resultados obtidos demonstraram que a redução da gramagem permitiu diminuir o valor de tensão de rutura da junta colada, no entanto não se observou uma variação significativa. Além disso, a alteração da gramagem pode não ser uma alternativa viável para a resolução do problema, pois é necessário garantir que a quantidade de adesivo aplicada ao revestimento é suficiente para que este adira corretamente ao painel.

No estudo da influência da pressão e do tempo de prensagem, verificou-se que à medida que o tempo aumenta a interação entre o adesivo e a superfície A dos *foils* tende a tornar-se mais forte. Nas matérias-primas provenientes do fornecedor Y, o aumento da pressão fortaleceu a interação do adesivo com a superfície A. O mesmo não aconteceu no *foil* do fornecedor X, neste caso a variação da pressão não influencia a colagem. Este produto tem sempre tendência a colar muito, independentemente do valor de pressão a que seja sujeito. Os parâmetros do modelo de primeira ordem, ao qual foram ajustados os resultados obtidos, permitiram concluir que o revestimento do fornecedor X tem tendência a envelhecer mais rapidamente do que os produtos do fornecedor Y, sendo isto comprovado pelo aumento significativo da tensão superficial ao longo do tempo.

A determinação da tensão superficial dos revestimentos estudados foi realizada pelo método de marcadores de teste e através da medição dos ângulos de contacto. Os resultados demonstraram que na superfície A, a energia livre de superfície dos *foils* do fornecedor X era elevada, estando no limite do requisito máximo admitido pela empresa. Além disso, determinou-se a tensão superficial do adesivo e verificou-se que o valor obtido era mais baixo que o expectável. Este parâmetro deve ser superior ao valor de energia livre de superfície da superfície A e inferior ao da superfície B, para que o adesivo reaja apenas com a face interior do *foil*. Os produtos do fornecedor X, apresentam, para ambas as faces, energia livre de superfície superior à do adesivo, o que favorece a interação entre estes dois materiais e, por consequência a ocorrência de *blocking*.

Em suma, os estudos realizados indicam que a superfície A das matérias-primas do fornecedor X apresentam propriedades favoráveis à adesão do *hotmelt*, provocando o problema de *blocking*. Tendo em conta que a IKEA Industry Portugal é incapaz de alterar quimicamente as propriedades do revestimento, é estritamente necessária a colaboração do fornecedor neste projeto. O trabalho conjunto entre a empresa e o fornecedor de *foil* permitirá tornar as características da matéria-prima adequadas à função pretendida.

O aparecimento de bolhas na lateral do painel está associado à má colagem. Através dos ensaios de DMA foi possível comprovar que o local de falha ocorre entre a camada de *filler* e a camada de cola intermédia. Este método permitiu identificar possíveis alterações nas características dos adesivos utilizados no processo. Os resultados demonstraram que a cola intermédia, quando se encontra a temperaturas inferiores a 130 °C, modifica a sua estrutura inicial e, por consequência passa de um material cristalino a amorfo. A interação entre o *filler* e a cola intermédia é realizada corretamente se a temperatura de equilíbrio na interface for superior a 130 °C. Estes resultados foram comprovados através da realização de um teste, à escala industrial, que demonstrou que o aumento da temperatura do *filler* antes do contacto deste com a cola intermédia favorece a boa colagem da lateral do painel.

Com o intuito de perceber se os adesivos, entre os quais ocorre a rutura, apresentavam características compatíveis para a obtenção de uma boa colagem foram realizados ensaios de DSC. As alterações nas estruturas dos adesivos observadas coincidiram com os resultados dos ensaios de DMA. Além disso, foi possível concluir que o calor específico da cola intermédia é significativamente superior ao do *filler*, o que indica que a cola intermédia não tem tendência para aumentar ou diminuir a sua temperatura. Esta característica é importante para a manutenção de um valor elevado de temperatura na interface entre os dois adesivos, no momento de contacto. Desta forma, garantindo que temperatura de equilíbrio da interface *filler*/cola intermédia é superior a 130°C, é possível concluir que os adesivos apresentam as características necessárias para a obtenção de uma boa colagem da lateral do painel.

## 6 Avaliação do trabalho realizado

### 6.1 Objetivos Realizados

Os objetivos propostos para o estudo das causas dos problemas de *foil* colado entre camadas e para o aparecimento de bolhas na lateral do painel foram, de um modo geral, cumpridos. No problema de *foil* colado entre camadas, os estudos realizados permitiram avaliar a influência de variáveis como a temperatura, a redução da gramagem, a pressão e o tempo de prensagem e perceber a influência de características como a tensão superficial e a rugosidade na ocorrência deste problema. No entanto, é importante referir que no estudo da redução da gramagem, no período de realização deste projeto, não foi possível averiguar, à escala industrial, a veracidade das conclusões dos testes realizados em laboratório. Relativamente ao aparecimento de bolhas na lateral do painel, foi possível determinar o local de falha onde ocorre a formação da bolha e identificar as limitações dos adesivos utilizados no processo da *Complete Line*. No entanto, seria essencial a realização de mais testes em produção que permitissem sustentar de forma sólida os resultados obtidos em laboratório.

### 6.2 Apreciação Final

De um modo geral, o trabalho desenvolvido na realização deste projeto foi bastante positivo, tanto a nível pessoal como profissional. O desenvolvimento da Dissertação em ambiente empresarial permitiu um primeiro contacto com o mundo da indústria, que se demonstrou bastante enriquecedor e desafiante. A realização deste projeto permitiu-me evoluir de forma muito positiva e motivou-me para a construção de uma carreira profissional no mundo da indústria. Tudo isto não seria possível sem o enorme apoio das pessoas com quem contactei e que demonstraram a importância do trabalho de equipa e da motivação para fazer mais e melhor.

## Referências

- Almeida, M., *Avaliação da cura das resinas dos papéis impregnados de segunda geração*, Tese de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Viseu, Portugal, 2013.
- Arcotest, *Test Inks for testing the surface energy* ([http://almelek.com/files/upload/files/Arcotest\\_urun\\_teknik%20foy.pdf](http://almelek.com/files/upload/files/Arcotest_urun_teknik%20foy.pdf))
- Berg, J.C., *Wettability*, Capítulo 2: *Role of acid-base interactions in wetting and related phenomena*, Marcel Dekker, Nova Iorque, 1993.
- Carvalho, L., *Estudo da operação de prensagem do aglomerado de fibras de média densidade (MDF)*, Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 1999.
- Cicekler, M., Tutus, A., Ozdemir, F., *Resin impregnation of decor papers and comparison of physical properties*, International Furniture Congress, Mugla, Faculty of Forestry, pp. 364-366, Turquia, 2016.
- Coelho, C. *Influence de l'Usinage du Bois sur les Caractéristiques Objectives et sur la Perception Subjective de l'Aspect d'une Finition*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2005.
- Composite Panel Association, *Laminating Composite Panels - technical Bulletin*, Gaithersburg, Maryland, 2007.
- Cruz, M., *Estudo da molhabilidade da madeira de pinho pela resina ureia-formaldeído*, Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2006.
- Figueiredo, A., Evtuguin, D., Monteiro, J., Cardoso, E., Mena, P., Cruz, P., *Structure - Surface property relationships of kraft paper* em *Ind. Eng. Chem.*, 50, pp. 2883-2890, Portugal, 2011.
- Forest Products Laboratory, United States Department of Agriculture, *Wood Handbook - Wood as an Engineering Material*, Madison, Wisconsin, 2010.
- Gadelmawla, E.S, Koura, M.M, Maksoud, T.M.A, Elewa, I.M, Soliman, H.H., *Roughness parameters* em *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, 123, pp. 133-145, 2002.
- Heinrich, H., *Chemistry of Adhesives - Hotmelt Adhesive* em Dunky, M., Pizzi, T., Leemput, M.V. (eds), *Wood Adhesion and Glued Products*, pp.68-74, 2002.
- Henkel, *Technical Data Sheet - Technomelt CHS 700*, 2017.
- Henkel, *Technical Data Sheet -Dorus CS 383-22*, 2011.
- Henkel, *Technical Data Sheet - Dorus US 276/3*.



- Hiziroglu, S., Kosonkorn, P. *Evaluation of surface roughness of Thai medium density fiberboard (MDF)*. Building and Environment, 41(4), 527-533, 2006.
- Humphrey, P., *Outline standard for Adhesion Dynamics evaluation employing the ABES (Automated Bonding Evaluation System) technique*, Adhesive Evaluation System inc., Corvallis, Oregon.
- Ikea group, *Números IKEA 2018* disponível em [https://www.ikea.com/ms/pt\\_PT/this-is-ikea/facts-and-figures/index.html](https://www.ikea.com/ms/pt_PT/this-is-ikea/facts-and-figures/index.html), acessado a 25 de maio de 2019.
- Ikea, *Ikea Industry* disponível em <https://www.inter.ikea.com/en/inter-ikea-group/ikea-industry/index.html>, acessado a 25 de maio de 2019.
- Ikea *Industry Portugal* - Apresentação, 2018.
- ISO 4287. *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface Texture: Profil Method - Terms, definitions and surface texture parameters*, 2011.
- Irle, M., Barbu, M., *Wood-based panel technology* em Thoemen, H., Irle, M., Sernek, M. (eds), *Wood-Based Panels - An Introduction for Specialists*, Brunel University Press, capítulo 1, pp. 1-94, London, 2010.
- Kruss, *Why test inks cannot tell the full truth about surface free energy*, junho de 2014.
- Lemaster, R.L., Dornfeld, D.A. The use of an optical profilometer to monitor product quality in wood and wood-based products, Proceedings of the SandinMenczeg and Sawing Seminar, Sept 21 -22, Portland, OR.
- Malysheva, G.V., Bodrykh, N.V., *Hot-Melt Adhesives*, Polymer Series D. Glues and Sealing materials, Pleiades Publishing, Vol. 4, pp. 301-303, Russia, 2010.
- *Manufacturing of MDF - Dry process fiberboards (MDF)*. Disponível em <http://mdf-info.eu/general/manufacturing-of-mdf>, acessado a 14 de maio de 2019.
- Martins, D., *Caracterização de madeiras exóticas para acabamento com vernizes aquosos*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- Menard, K., *An Introduction to Dynamic Mechanical Analysis* em *Dynamic Mechanical Analysis - a practical introduction*, CRC PRESS, capítulo 1, 1999.
- Menczel, J., Prime, R., Judovits, L., Bair, H., Reading, M., Swier, S., *Differential Scanning Calorimetry (DSC)* em *Thermal analysis of polymers - fundamentals and applications*, Wiley, Capítulo 2, pp. 7 - 240, Canada, 2009.
- Muller, C., *Paper-based flexible laminates tendency to curl - Investigating the effect of humidity and temperature*, Master Thesis, Lund University, 2018.
- Nemli, G., *Factors affecting some quality properties of decorative surface overlays*, Faculty of Forestry, Turquia, maio de 2007.
- NP EN 316. *Aglomerados de fibras de madeira - Definição, classificação e símbolos*, 2012.

- Park, Y., Joo, H., Do, H., Kim, H., *Viscoelastic and adhesion properties of EVA/tackifier/wax ternary blend systems as hot-melt adhesives*, J. Adhesion Sci. Technol. Vol.20, pp. 1561-1571, julho de 2006.
- Pereira, J., *Desenvolvimento e validação de um método não intrusivo para caracterizar a molhabilidade de superfícies com estruturas complexas utilizando a técnica 3D de microscopia confocal de fluorescência de varrimento a laser*, Tese de Mestrado, Técnico de Lisboa, junho de 2017.
- PerkinElmer, Dynamic Mechanical Analysis (DMA) - a beginner's guide ([https://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/4474546GDE\\_IntroductionToDMA.pdf](https://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/4474546GDE_IntroductionToDMA.pdf))
- Schultz, J., Nardin, M., *Theories and Mechanisms of Adhesion* em Pizzi, A., Mittal, K.L., (eds) *Handbook of Adhesive Technology*, Marcel Dekker, Inc., parte 3, Nova Iorque, 2003.
- Tavares, J. Apresentação - *Indicação dos estados de Superfície*, 2012. Disponível em <https://paginas.fe.up.pt/~tavares/ensino/CFACG/Downloads/Apontamentos/Estado%20de%20Superficies.pdf>.

## Anexo A - *Layout da secção Foil&Wrapping*

Na Figura A. 1 é apresentado o layout da secção *Foil&Wrapping*, onde são ilustradas as instalações das áreas *Pré-Coating* e *Complete Line*.



Figura A. 1- *Layout da secção Foil&Wrapping*.

## Anexo B - ABES

Nas Figura B. 1 e Figura B. 2 apresentadas duas fotografias do equipamento ABES.



*Figura B. 1- Vista de frente do equipamento ABES.*



*Figura B. 2 - Vista de cima do equipamento ABES*

## Anexo C - Avaliação da influência da temperatura

Na Tabela C. 1 são apresentados os resultados obtidos no teste realizado no equipamento ABES para a avaliação da influência da colagem entre a superfície A e a superfície B com cola dos quatro *foils* analisados.

*Tabela C. 1 - Registo dos valores de força média de rutura obtidos para a colagem entre a superfície A e a superfície B com cola dos foils analisados.*

Temperatura (°C)	Força média de rutura (N)			
	Y1	X1	Y2	X2
25	3,500	2,450	2,450	1,750
45	14,01	19,26	5,250	16,46
65	58,84	76,00	58,84	89,31
85	57,09	72,15	62,69	85,46

Para o estudo da avaliação da influência da temperatura na colagem entre a superfície B com cola e a superfície B sem cola foram obtidos os valores apresentados na Tabela C. 2.

*Tabela C. 2 - Registo dos valores de força média de rutura obtidos para a colagem entre a superfície B sem cola e a superfície B com cola dos foils analisados.*

Temperatura (°C)	Força média de rutura (N)			
	Y1	X1	Y2	X2
25	1,750	1,400	3,500	2,100
45	5,600	6,300	2,450	11,90
65	24,86	51,13	38,87	46,93
85	41,68	57,79	45,87	63,04

## Anexo D - Avaliação da influência da redução da gramagem

Para a avaliação da redução da gramagem na colagem das superfícies do *foil* foram testados três valores de gramagem. Na Tabela D. 1 são apresentados os valores reais de gramagem medidos em vários pontos ao longo de toda a largura do rolo e o respetivo valor médio.

*Tabela D. 1-Registo dos valores médios de gramagem.*

Gramagem ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	P1	P2	P3	P4	P5	Gramagem média real ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )
16	15,0	16,0	14,6	14,7	15,4	15,1
18	16,0	17,7	16,8	17,0	16,8	16,9
20	18,6	19,5	18,6	18,5	18,3	18,7

Na Tabela D. 2 são apresentados os valores obtidos nos ensaios realizados para avaliar a influência da redução da gramagem na colagem entre a superfície A e a superfície B com cola.

*Tabela D. 2 - Registo dos valores de força média de rutura obtidos nos ensaios realizados relativos à redução de gramagem para a colagem entre a superfície A e a superfície B com cola.*

Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Força média de rutura (N)		
	16 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	18 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	20 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )
25	3,490	2,100	2,800
45	3,850	2,800	3,150
65	34,67	44,13	29,77
85	53,94	50,78	51,83

Os valores obtidos para os ensaios realizados com as gramagens de  $16\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $18\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$  e  $20\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$  para o estudo da interação entre a superfície B sem cola e a superfície B com cola são apresentados na Tabela D. 3.

*Tabela D. 3 - Registo dos valores de força média de rutura obtidos nos ensaios realizados relativos à redução de gramagem para a colagem entre a superfície B sem cola e a superfície B com cola.*

Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Força média de rutura (N)		
	16 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	18 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	20 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )
25	2,097	3,150	0,7000
45	17,86	20,66	16,81
65	64,09	70,05	65,84
85	66,54	66,54	62,34

## Anexo E - Avaliação da influência da pressão e do tempo de prensagem

Na Tabela E. 1 são apresentados os valores obtidos nos ensaios realizados à pressão de 2,5bar para a avaliação da colagem entre a superfície A e a superfície B com cola.

*Tabela E. 1-Registo dos valores de força média de rutura obtidos para os ensaios realizados à pressão de 2,5bar.*

$t_p$ (s)	Força média de rutura (N)			
	Y1	X1	Y2	X2
20	5,600	6,300	2,450	11,90
40	10,85	5,590	5,600	9,100
60	13,31	4,200	13,66	10,15
80	13,31	4,900	15,06	18,21
100	17,51	12,61	15,41	17,86
120	19,96	20,66	15,06	18,56
180	17,16	17,51	18,21	23,11
200	20,31	18,91	23,11	24,86
240	21,36	25,91	23,11	27,67
300	23,81	20,66	18,21	31,17
360	18,56	26,97	23,11	30,12
420	18,21	23,46	20,66	31,52

Na Tabela E. 2 são apresentados os valores obtidos nos ensaios realizados à pressão de 1,25bar para a avaliação da colagem entre a superfície A e a superfície B com cola.

*Tabela E. 2 -Registo dos valores de força média de rutura obtidos para os ensaios realizados à pressão de 1,25bar.*

$t_p$ (s)	Força média de rutura (N)			
	Y1	X1	Y2	X2
20	4,550	3,850	2,450	3,500
40	16,46	3,500	2,800	12,25
60	14,71	7,350	2,450	19,26
80	12,96	10,50	16,46	17,51
100	14,01	8,400	16,81	11,55
120	12,61	7,000	15,41	16,81
180	16,81	22,76	17,16	27,32
200	14,71	23,46	13,31	22,41
240	21,01	18,21	8,050	28,02
300	15,76	26,26	16,11	25,91
360	15,41	24,16	12,25	25,91
420	18,21	26,25	21,36	28,02

Os valores obtidos nos ensaios realizados no equipamento ABES nas condições reais de pressão e temperatura são apresentados na Tabela E. 3.

*Tabela E. 3 -Registo dos valores obtidos nos ensaios realizados com as condições reais de pressão e temperatura.*

$t_p$ (s)	Força média de rutura (N)	
	Y1	X1
20	2,80	2,45
40	1,75	2,80
60	3,85	1,75
80	2,45	3,15
100	2,10	3,85
120	4,55	3,50
180	4,55	2,80
200	4,20	2,10
240	5,25	2,10
300	5,95	2,10
360	8,40	2,45
420	8,75	2,80



## Anexo F - Determinação da tensão superficial

Na Tabela F. 1 são apresentados os valores médios obtidos para o parâmetro  $Ra$ , nas superfícies A e B, assim como os respetivos desvios padrões.

Tabela F. 1 - Registo dos valores obtidos para o parâmetro  $Ra$  e os respetivos desvios padrões.

Superfície	X1		X2		Y1		Y2	
	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão Ra ( $\mu\text{m}$ )	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão Ra ( $\mu\text{m}$ )	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão Ra ( $\mu\text{m}$ )	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão Ra ( $\mu\text{m}$ )
A	0,957	0,050	1,17	0,17	0,885	0,07	0,916	0,073
B	2,65	0,14	2,49	0,26	2,50	0,20	2,57	0,13

Os valores médios obtidos para o parâmetro  $Rz$  e os respetivos desvios padrões para ambas as superfícies do revestimento são apresentados na Tabela F. 2.

Tabela F. 2 - Registo dos valores obtidos para o parâmetro  $Rz$  e os respetivos desvios padrões.

Superfície	X1		X2		Y1		Y2	
	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão Rz ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão Rz ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão Rz ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão Rz ( $\mu\text{m}$ )
A	7,48	0,10	8,06	0,92	9,44	1,16	6,32	0,71
B	17,0	0,73	16,6	1,87	16,8	1,54	15,5	1,13

Na Tabela F. 3 são apresentados os valores dos ângulos de contacto, medidos na superfície A dos *foils*, para os ensaios realizados com os líquidos água, etilenoglicol e n-hexadecano.

Tabela F. 3 - Registo dos valores dos ângulos de contacto obtidos para a superfície A.

Foil	água	etilenoglicol	n-hexadecano
X1	79,2	59,9	8,75
X2	77,2	57,3	----
Y1	96,1	77,7	10,7
Y2	86,6	64,5	16,8

Os ângulos de contacto obtidos para cada um dos líquidos usados para a determinação da energia livre de superfície da superfície B dos revestimentos são apresentados na Tabela F. 4.

Tabela F. 4 - Registo dos valores dos ângulos de contacto obtidos para a superfície B.

Foil	água	etilenoglicol	n-hexadecano
X1	103,5	72,1	0
X2	95,4	62,6	----
Y1	100,9	86,7	14,5
Y2	94,2	79,5	0

## Anexo G - Calorimetria Diferencial de Varrimento

Na Figura G. 1 é apresentado o resultado obtido através do método DSC para a análise das características do *filler*.

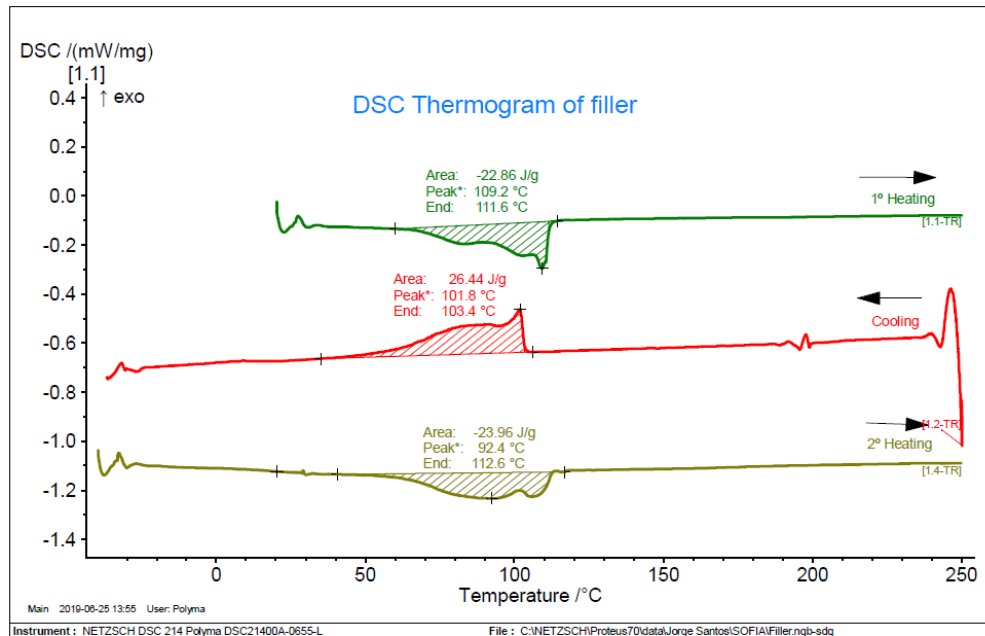


Figura G. 1 -Análise DSC realizada ao *filler*.

Na Figura G. 2 é apresentado o resultado da Calorimetria Diferencial de Varrimento realizada para a cola intermédia.

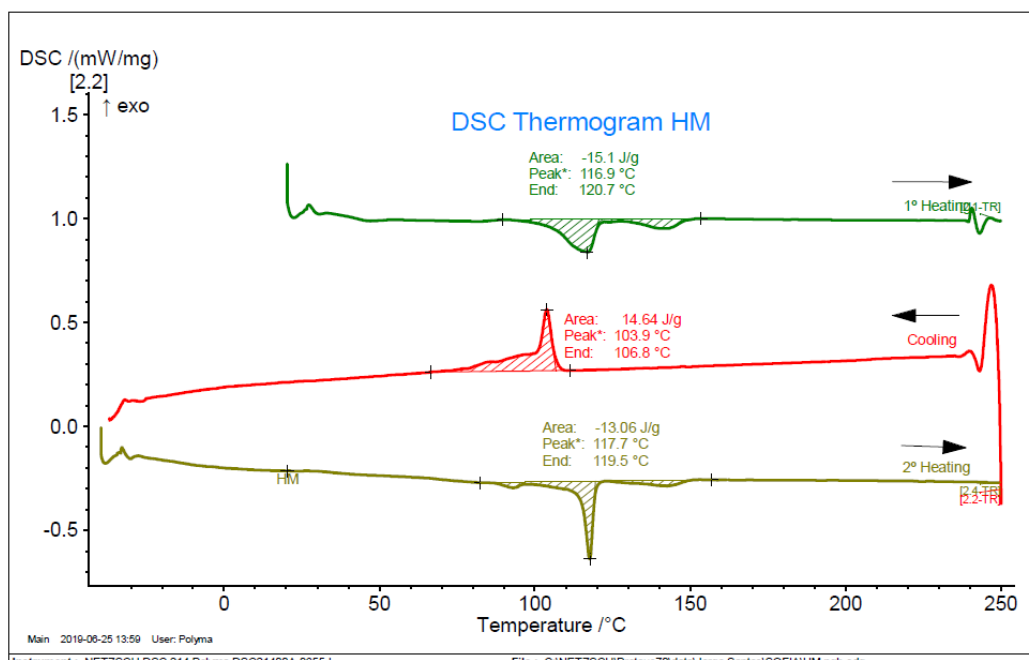


Figura G. 2 - Análise DSC realizada à cola intermédia.