



DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM MATERIAL COMPÓSITO TERMOMOLDÁVEL E SUSTENTÁVEL

JORGE FILIPE SOARES TEIXEIRA

novembro de 2020

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM MATERIAL COMPÓSITO TERMOMOLDÁVEL E SUSTENTÁVEL

Jorge Filipe Soares Teixeira
1120493

2019/2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM MATERIAL COMPÓSITO TERMOMOLDÁVEL E SUSTENTÁVEL

Jorge Filipe Soares Teixeira
1120493

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Doutor Engenheiro João Francisco Silva

2019/2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



***“Don’t stop when you are tired. Success doesn’t just find you.
You have to go out and get it. Stop when you are done and make
yourself proud”***

JÚRI

Presidente

Dr. Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Dr. João Francisco Silva
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Co-orientador

Dra. Cláudia Costa
R&D Manager, Sonae Indústria de Revestimentos, S.A.

Arguente

Dr. João Pedro Lourenço Gil Nunes
Professor auxiliar, DEP – Universidade do Minho

AGRADECIMENTOS

O objetivo de conseguir completar um segundo mestrado tem que necessariamente ter o apoio de grandes pessoas à minha volta. Quero começar por agradecer à Doutora Cláudia Costa, em nome da Sonae Indústria de Revestimentos SA, por me ter deixado participar e concluir este desafio da melhor maneira possível, dando-me grande capacidade arbitrária e autonomia para tomar os meus próprios caminhos. Quero enaltecer a sua compreensão, solidariedade e disponibilidade para ajudar a ultrapassar os obstáculos com as melhores ferramentas possíveis. Sem dúvida uma grande pessoa. Ainda nesta grande instituição, existem outros intervenientes que fizeram com que o trabalho não custasse tanto, e que hoje em dia não são colegas, mas sim amigos. Não querendo alongar-me com nomes, porque das setenta pessoas com quem me relacionei no decorrer das atividades com os mais diferentes cargos, poucas foram aquelas que não interferiram da maneira mais pequena que fosse, tecnicamente ou pessoalmente na concretização desta tese. Quero sim, deixar uma palavra de apreço para a equipa da Tecminho/Fibrenamics, representada pelos engenheiros Carlos Mota, Fernando Cunha e Luís Nobre, que foram uns excelentes colegas de trabalho, que tiveram envolvidos do início ao fim deste projeto, sempre com muita energia, entusiasmo e boa disposição.

Da parte da minha instituição académica, não posso deixar de agradecer ao meu orientador, o professor Doutor João Francisco, a quem lhe elogio a maneira como me manteve sempre motivado e desafiado, querendo aprender sempre mais e a fazer-me ir sempre mais além, mas a colocar-me uns travões sempre que eu me excedia. Pelas palavras de motivação quando os resultados não eram os que eu queria e até mesmo quando o cansaço era muito, conseguia dar-me um pouco mais de força para continuar e, obrigado por todo conhecimento transmitido ao longo deste tempo. Ainda da minha instituição académica, quero agradecer a dois docentes cuja área de trabalho é relacionado com o meu tema, o que proporcionaram discussões técnicas bastante aprofundadas mas sempre num tom descontraído e sempre com uma grande vontade de ajudar no que fosse preciso. O meu muito obrigado ao doutorando Púria Esfandiari e ao professor Paulo Jorge Roque de Oliveira Novoa. Não posso deixar de agradecer também ao professor Francisco José Gomes da Silva por toda a disponibilidade e atenção que teve para ouvir os meus diversos problemas e as minhas opiniões sobre alguns temas correlacionados com o mestrado de engenharia mecânica. Não posso deixar de agradecer a qualquer um dos professores que tive durante o meu percurso porque eles também me ajudaram a chegar onde cheguei.

Ainda no ISEP, mas agora relacionado com pessoas do departamento de engenharia química, aquele que foi o meu departamento por 5 anos seguidos até ter chegado à almejada defesa para o título de mestre em engenharia química, quero agradecer à professora Doutora Simone Barreira, minha orientadora da tese em engenharia Química

que me acompanhou sempre posteriormente a este momento e mostrou-se sempre disponível para qualquer eventualidade que pudesse vir a precisar, a quem cheguei a recorrer para a realização de alguns ensaios para este trabalho que desenvolvi. Quero agradecer também à engenheira Paula Vendas, por toda a simpatia que me recebia sempre que eu me dirigia às instalações do DEQ para fazer os ensaios. Uma palavra de apreço ainda para a engenheira Doutora Isabel Brás e engenheiro Doutor António Crispim Ribeiro pelas palavras de apreço e carinho sempre que me encontravam.

Por último, mas não menos importantes, os meus amigos mais próximos, aqueles que me ouviam sempre a reclamar e mesmo assim continuavam a aturar-me, mas quem mais “sofreu” desse mal, foi a minha família direta e a Cíntia Martins. Quero agradecer e pedir desculpa por me terem aturado mais 3 anos de estudo e de muito stress, onde a minha paciência era quase inexistente, mas ainda assim conseguiram manter as palavras de carinho e encorajamento sem me deixarem ir abaixo e desistir deste objetivo pessoalmente traçado. Coordenar atividades laborais diurnas com noturnas e querer ainda ter tempo para o desporto e para desanuviar, não é fácil e reconheço que o tempo que eu dei de mim aos outros foi diminuto mas espero compensar com e após o culminar desta defesa para obtenção de um segundo título de mestre.

PALAVRAS CHAVE

Materiais compósitos, Sustentabilidade, Termoformação, Fibras de Celulose, Polímeros termoplásticos, Reciclagem

RESUMO

Este trabalho desenvolvido na Sonae Indústria de Revestimentos, S.A, insere-se num programa cofinanciado pelo IAPMEI (Portugal) cujo o título de projeto é Flexcomp. Este visa a conceção, de raiz, de um material compósito sustentável que permita um fácil reprocessamento para alteração da sua forma. Para além destas propriedades é também um objetivo que a sua massa volúmica tenha o valor mais baixo possível com vista à sua aplicação nas indústrias dos transportes. Para alcançar tais objetivos, realizou-se um estudo com diferentes fibras de origem natural, de celulose, conhecidos por papel *kraft*, e que são já usadas no atual processo produtivo da empresa. Substituiu-se a resina termoendurecível no papel *kraft* (resina fenólica) e procedeu-se ao estudo de possíveis polímeros termoplásticos, passíveis de serem usados pelo processo atual de produção da SIR, para que seja possível a termoconformação do compósito obtido. Este compósito contempla ainda a utilização opcional de fibras inorgânicas para atingir determinados requisitos a nível de propriedades mecânicas e/ou de fogo, propriedades essas cruciais na indústria dos transportes. O material foi desenvolvido com sucesso tendo já associado um pedido de patente.

KEYWORDS

Composite Materials, Sustainability, Thermoforming, Cellulose Fibers, Thermoplastic Polymers, Recyclability

ABSTRACT

This work developed at Sonae Indústria de Revestimentos, S.A, is part of a program co-financed by IAPMEI (Portugal) whose project title is Flexcomp. This aims to design, from scratch, a sustainable composite material that allows easy reprocessing to change its shape. In addition to these properties, it is also an objective that its density is as low as possible with a view to its application in the transport industries. To achieve these goals, a study was carried out with different fibers of natural origin, cellulose, known as kraft paper, and which are already used in the company's current production process. The thermosetting resin was replaced in kraft paper (phenolic resin) and the study of possible thermoplastic polymers, which could be used by the current SIR production process, was carried out so that the thermoforming of the obtained composite is possible. This composite also includes the optional use of inorganic fibers to achieve certain requirements in terms of mechanical and/or fire properties, crucial properties in the transport industry. The material was successfully developed and will have a patent associated with it.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

Termo	Designação
ABS	Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno
CEPI	<i>Confederation of European Paper Industries</i> (Confederação Europeia de Indústrias de Papel)
CPL	<i>Continuous Pressure Laminate</i> (Laminado de Pressão Contínua)
E	Módulo de elasticidade ou módulo de <i>Young</i>
FL	<i>Flooring</i> (Assoalho)
FR	<i>Fire Retardant</i> (Resistente ao fogo/Retardante de chama)
G	Módulo de corte
HPL	<i>High Pressure Laminate</i> (Laminado de alta pressão)
ISO	<i>International Standard Organization</i> (Organização Internacional de Standardização)
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i> (Placa de fibra de média densidade)
MF	<i>Melamine Formaldehyde</i> (Melamina Fomaldeído)
MFB	<i>Melamine Faced Board</i> (Painéis Melamínicos)
OSB	<i>Oriented Stand Board</i> (Placa de vertente orientada)
PB	<i>Particle board</i> (aglomerado de partículas)
PF	<i>Phenol Formaldehyde</i> (Fenol Formaldeído)
PLA	Ácido Poliláctico
RC	<i>Resin Content</i> (Conteúdo de resina)
SInd	Sonae Indústria
SIR	Sonae Indústria de Revestimentos
TC	Tempo de cura
TEB	<i>Tensile Energy to Break</i> (Energia de tração de rutura)
U	Energia de Deformação
UV	Ultravioleta
VC	<i>Volatile content</i> (Conteúdo de voláteis)
VFB	<i>Veneer Faced Board</i> (Placa com face de folheado)

Lista de Unidades

Termo	Designação
bar	bar
μm	Micrómetro
cm	Centímetro
m	Metro
min	Minutos

mm	milímetro
MPa	Mega Pascal
N	Newton
nm	Nanometro
Pa	Pascal

Lista de Símbolos

Termo	Designação
ε	Deformação (adimensional)
σ	Tensão (MPa)
γ	Deformação de corte (adimensional)
τ	Tensão de corte (MPa)
ν	Coefficiente de <i>Poisson</i> (adimensional)

GLOSSÁRIO DE TERMOS

Termo	Designação
Anisotropia	As propriedades de um dado material variam consoante a direção de aplicação dos esforços.
Ductilidade	Grau de deformação que um material suporta até ao momento da sua fratura
Fluência	Deformação de um material ao longo do tempo sobre tensão constante.
Higroscopia	Capacidade de absorção de água dos diferentes materiais.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1 - NEGÓCIOS PERTENCENTES À SONAE INDÚSTRIA [1]	1
FIGURA 1-2 – EXEMPLOS DE PB [2]	2
FIGURA 1-3 – EXEMPLOS DE <i>MDF</i> [2]	2
FIGURA 1-4 – <i>EXEMPLOS DE OSB</i> [2]	3
FIGURA 1-5 – EXEMPLO DE HPL E CPL. VISUALMENTE PODEM SER IDÊNTICOS MAS VARIAM NAS SUAS PROPRIEDADES MECÂNICAS [2]	3
FIGURA 1-6 – EXEMPLO DE UM PRODUTO VFB [3]	3
FIGURA 1-7 – EXEMPLO DE UM PRODUTO MFB [2]	4
FIGURA 1-8 – EXEMPLO DE UM PRODUTO <i>FLOORING</i> [4]	4
FIGURA 2-1 - EVOLUÇÃO DOS DIFERENTES MERCADOS PARA OS MATERIAIS COMPÓSITOS [8]	9
FIGURA 2-2 – EXEMPLIFICAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PROCESSO DE IMPREGNAÇÃO [13]	11
FIGURA 2-3 - FORMAÇÃO TÍPICA DE UM TERMOLAMINADO DE ALTA PRESSÃO (ADAPTADO DE [13] E [14])	11
FIGURA 2-4 – ESQUEMA COMUM DE UM PROCESSO PRODUTIVO PARA HPL: 1- SÍNTESE DE RESINAS; 2- IMPREGNAÇÃO DAS FOLHAS; 3- PRENSAGEM COM PRATOS QUENTES (ADAPTADO DE [16])	12
FIGURA 2-5 – COMPOSIÇÃO TÍPICA DE UM MATERIAL COMPÓSITO. A FASE CONTÍNUA (MATRIZ) É MENOS RESISTENTE QUE O REFORÇO. EXISTE SEMPRE UMA INTERFACE ENTRE A FASE CONTÍNUA E O REFORÇO. [19]	14
FIGURA 2-6 – VANTAGENS E DESVANTAGENS ESPERADAS DO MATERIAL COMPÓSITO DESENVOLVIDO NESTA TESE	15
FIGURA 2-7 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS MATRIZES POLIMÉRICA [17]	16
FIGURA 2-8 -EVOLUÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA: A) TERMOPLÁSTICO AMORFO; B) TERMOENDURECÍVEL; C) TERMOPLÁSTICO SEMICRISTALINO [7]	17
FIGURA 2-9 – COMPORTAMENTO ESPERADO PARA CADA UMA DAS CATEGORIAS DE POLÍMEROS NUM ENSAIO DE TRAÇÃO-DEFORMAÇÃO [21]	17
FIGURA 2-10 – VANTAGENS DE CADA TIPO DE POLÍMEROS [17] E [22]	17
FIGURA 2-11 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PAPEL KRAFT A SER EMBEBIDA POR RESINA FENÓLICA [16]	18
FIGURA 2-12 - FORÇAS E LIMITAÇÕES DO FENOL FORMALDEÍDO [24]	19
FIGURA 2-13 - VANTAGENS E LIMITAÇÕES DA RESINA MELAMINA-FORMALDEÍDO [25]	19
FIGURA 2-14 - ARRANJO MOLECULAR DE UM POLÍMERO AMORFO E DE UM POLÍMERO CRISTALINO. ADAPTADA DE [26]	20
FIGURA 2-15 - EFEITO DA TEMPERATURA NO MODO DE ELASTICIDADE (ASSUMINDO QUE AMBOS OS POLÍMEROS TÊM A MESMA TG E TM) ADAPTADA DE [26]	21
FIGURA 2-16 - VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE [27]	22
FIGURA 2-17 - VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO POLIPROPILENO [28]	23
FIGURA 2-18 - VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO PMMA [29]	23
FIGURA 2-19 - VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO PLA (ADAPTADO DE [30])	24
FIGURA 2-20 - VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO ABS(ADAPTADO DE [34])	25

FIGURA 2-21 – CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE REFORÇO [19]	26
FIGURA 2-22 - DIAGRAMA DE PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE PAPEL KRAFT [37]	28
FIGURA 2-23 - PRINCÍPIO DA TERMOFORMAÇÃO [43]	31
FIGURA 2-24 – EXEMPLIFICAÇÃO DE UM PROCESSO DE <i>POSTFORMING</i> . 1- <i>HPL FIXADO AO SUBSTRATO</i> ; 2- <i>AQUECIMENTO DO HPL ATÉ UMA TEMPERATURA PRÉ DEFINIDA</i> ; 3- <i>APLICAÇÃO DE PRESSÃO CONTRA O MOLDE</i> ; 4- <i>ETAPA DE ARREFECIMENTO PARA CONSOLIDAÇÃO GEOMÉTRICA</i> ; 5- <i>PRODUTO FINAL (ADAPTADO DE [44])</i>	32
FIGURA 2-25 – EXEMPLO DA PEÇA FLEXCOMP A SER TERMOCONFORMADA PELO MÉTODO <i>VACUUM FORMING</i>	32
FIGURA 2-26 – EXEMPLO DE UMA PEÇA FLEXCOMP A SER TERMOFORMADA PELO MÉTODO <i>PRESSURE FORMING</i>	33
FIGURA 2-27 – ESQUEMA DE UM FEIXE DE ELETRÕES A SER PROJETADO NUMA AMOSTRA. [47].	34
FIGURA 2-28 – TRANSIÇÕES PASSIVEIS DE SER OBSERVADAS EM DSC (ADAPTADO DE [46])	36
FIGURA 3-1- ÁRVORE DE PRODUTO A DESENVOLVER	39
FIGURA 3-2 – ESQUEMATIZAÇÃO DOS PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A IMPREGNAÇÃO DE FIBRAS ATRAVÉS DA EQUAÇÃO DE DARCY [49] E [50] .	41
FIGURA 3-3 – ESQUEMATIZAÇÃO DOS PAPEIS KRAFTS TESTADOS	43
FIGURA 3-4 - EXEMPLOS DE PAPEIS KRAFT TESTADOS	44
FIGURA 3-5 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TGA AOS DIFERENTES TIPOS DE PAPEL KRAFT	45
FIGURA 3-6 – DENSÍMETRO DE TIPO <i>GURLEY</i> MANUAL [56]	47
FIGURA 3-7 - RESULTADOS DA DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE PELO TESTE DE <i>GURLEY</i> PARA OS DIFERENTES PAPÉIS	48
FIGURA 3-8 – TEMPERATURAS DE FUSÃO PARA POLÍMEROS SEMICRISTALINOS E TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA PARA POLÍMEROS AMORFOS (VALORES ADQUIRIDOS A PARTIR DE [7], [26], [57] E [58])	52
FIGURA 3-9 – FILME DE PMMA, POLIETILENO E DE PLA USADO PARA ENSAIOS	53
FIGURA 3-10 – COMPÓSITO COM O PAPEL 8 E IMPREGNADO COM A RESINA FENÓLICA COM OS SEGUINTE PARÂMETROS DE Prensagem: 140°C DURANTE 12 MIN COM UMA PRESSÃO DE 20 BAR.	54
FIGURA 3-11 – NA IMAGEM À ESQUERDA, A AMOSTRA DO PAPEL 8 COM PMMA, Prensado COM OS PARÂMETROS DO CICLO 1 E À DIREITA COM O CICLO 2 (PARÂMETROS PRESENTES NA TABELA 3-7)	55
FIGURA 3-12- IMAGEM DO SEM AO COMPÓSITO FENÓLICO, COM O PAPEL 8, Prensado A 140°C E 80BAR DE PRESSÃO ESPECÍFICA.	56
FIGURA 3-13 – À ESQUERDA IMAGEM SEM DE PE COM O PAPEL 8, Prensado A 140°C E A 40BAR, ENQUANTO NA IMAGEM À DIREITA SÃO EXATAMENTE OS MESMO MATERIAIS, COM A DIFERENÇA QUE O PARÂMETRO DE TEMPERATURA FOI MODIFICADO DE 140 PARA 180°C.	56
FIGURA 3-14 – PROBLEMAS DE RASGAMENTO AQUANDO DO PROCESSAMENTO DO COMPÓSITO COM O PE E O PAPEL KRAFT NÚMERO 8.	57
FIGURA 3-15 – PROBLEMAS NO PROCESSAMENTO DO COMPACTO DE KRAFT E PLA APÓS SAÍDA DA PRENSA	58
FIGURA 3-16 - ENSAIO DE ÁGUA EM EBULIÇÃO ONDE SE VÊEM OS PROVETES NO FUNDO DO GOBELÉ COM ÁGUA	71

FIGURA 3-17 -MONTAGEM USADA NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO VAPOR DE ÁGUA.	73
FIGURA 3-18 - NESTA IMAGEM OBSERVA-SE O ENSAIO DE RESISTÊNCIA TÉRMICA (HÚMIDA (CANTO SUPERIOR ESQUERDO) E SECA (CANTO INFERIOR DIREITO)	75
FIGURA 3-19 – PROVETES DO COMPÓSITO FLEXCOMP APÓS O ENSAIO DO CALOR SECO ONDE SE PODE OBSERVAR UMA LIGEIRA DEFORMAÇÃO À SUPERFÍCIE DO DECORATIVO.	76
FIGURA 3-20 - ENSAIO DE ESTABILIDADE DIMENSIONAL SECA	77
FIGURA 3-21 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO RISCO.	79
FIGURA 3-22 - EQUIPAMENTO PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO.	81
FIGURA 3-23 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA A MANCHAS.	82
FIGURA 3-24 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO (BOLA GRANDE).	84
FIGURA 3-25 – INSTRUMENTO PARA O TESTE DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO COM A BOLA PEQUENA [65]	85
FIGURA 3-26 – EXEMPLO DE UM GRÁFICO FORÇA VS DESLOCAMENTO OBTIDO NUM PROVETE DE MATERIAL COMPÓSITO	87
FIGURA 3-27 - EXEMPLO DE UM GRÁFICO FORÇA VS DESLOCAMENTO OBTIDO NUM PROVETE DE MATERIAL COMPÓSITO	88
FIGURA 3-28 – GRÁFICO TENSÃO V DEFORMAÇÃO DA ZONA LINEAR DO ENSAIO DE TRAÇÃO DO MATERIAL COMPÓSITO	89
FIGURA 4-1 – MOLDE PARA O ESTUDO DOS RAIOS DE CURVATURA	98
FIGURA 4-2 – PEÇA FLEXCOMP EM EXPOSIÇÃO NA ICNF 2019	101
FIGURA 4-3 – FLEXCOMP EM EXPOSIÇÃO NA FEIRA INTERZUM 2019, EM COLÔNIA, ALEMANHA	101

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2-1- NOMENCLATURA DE UM HPL SEGUNDO A EN438 [15].....	12
TABELA 2-2 – PROPRIEDADES DE CONTROLO EM PAPEIS IMPREGNADOS.	13
TABELA 2-3 – CARACTERÍSTICAS NECESSÁRIAS PARA A ESCOLHA DA MATRIZ TERMOPLÁSTICA PARA ESTE TRABALHO.....	21
TABELA 2-4 – COMPARAÇÕES DE AMPLIAÇÃO E RESOLUÇÃO POR DIFERENTES MÉTODOS [47].	35
TABELA 2-5 – PROPRIEDADES RETIRADAS DE UM ENSAIO DE DSC (ADAPTADA DE [46])	35
TABELA 3-1 -MASSA VOLÚMICA DOS DIFERENTES PAPÉIS KRAFT	46
TABELA 3-2 – ENSAIO DE TRAÇÃO AS FIBRAS CELULÓSICAS	50
TABELA 3-3 – RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO AO POLÍMERO PMMA	59
TABELA 3-4 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO AO COMPÓSITO DE KRAFT, BRANQUEADO E NÃO BRANQUEADO COM A MATRIZ PMMA.....	60
TABELA 3-5 – PERCENTAGENS MÁSSICAS DE FIBRAS E POLÍMERO, EM CADA UM DOS COMPÓSITOS PRODUZIDOS.....	62
TABELA 3-6 – RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO PARA O ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FRAÇÃO MÁSSICA DO POLÍMERO	62
TABELA 3-7 – PARÂMETROS DE Prensagem NOS DIFERENTES CICLOS APLICADOS NA PRODUÇÃO DO MATERIAL COMPÓSITO	63
TABELA 3-8 – RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO PARA O COMPÓSITO PRODUZIDO ATRAVÉS DE PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO DIFERENTES.....	63
TABELA 3-9 - PERCENTAGENS MÁSSICAS DE FIBRAS E POLÍMERO, EM CADA UM DOS COMPÓSITOS PRODUZIDOS.....	64
TABELA 3-10 – RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE FLEXÃO PARA O ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO CICLO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS	65
TABELA 3-11 - PERCENTAGENS MÁSSICAS DE FIBRAS E POLÍMERO, EM CADA UM DOS COMPÓSITOS PRODUZIDOS.....	66
TABELA 3-12 - RESULTADOS DO ENSAIO DEFLEXÃO PARA O ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA POROSIDADE DO PAPEL KRAFT	67
TABELA 3-13 - PERCENTAGENS MÁSSICAS DE FIBRAS E POLÍMERO, EM CADA UM DOS COMPÓSITOS PRODUZIDOS.....	68
TABELA 3-14 – RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE FLEXÃO PARA O ESTUDO DA COLAGEM NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	69
TABELA 3-15 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DA ÁGUA EM EBULIÇÃO	71
TABELA 3-16 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO VAPOR DE ÁGUA.....	73
TABELA 3-17 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA TÉRMICA.	75
TABELA 3-18 – RESULTADOS DOS TESTES DE ESTABILIDADE DIMENSIONAL.....	78
TABELA 3-19 – CLASSIFICAÇÃO DO TESTE DE RESISTÊNCIA AO RISCO PELA NORMA EN438.....	79
TABELA 3-20 - RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO RISCO.	80
TABELA 3-21 - RESULTADO DO TESTE DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO.	81
TABELA 3-22 – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA A MANCHAS.	83

TABELA 3-23 - RESULTADO DOS ENSAIOS DE IMPACTO.....	84
TABELA 4-1 – ESPECIFICAÇÕES DO MOLDE PARA ESTUDO DA PÓS DEFORMABILIDADE DO COMPÓSITO	98

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Apresentação da empresa	1
1.2.1	Produtos comercializados pelo grupo	2
1.3	Tema e objetivo de estágio	5
1.4	Estrutura da dissertação	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1	Os mercados e a sustentabilidade – um problema transversal.....	8
2.2	Indústria dos <i>High Pressure Laminates</i> (HPL)	10
2.2.1	Propriedades dos papéis	13
2.3	Materiais compósitos e a indústria dos transportes.....	14
2.4	Polímeros	15
2.4.1	Resinas termoendurecíveis	18
2.4.1.1	Fenol Formaldeído (PF)	18
2.4.1.2	Melamina Formaldeído (MF)	19
2.4.2	Polímeros termoplásticos.....	20
2.4.2.1	PE-HD (Polyethylene, high density)	22
2.4.2.2	PP (Polipropileno)	22
2.4.2.3	PMMA (Poli Metil Meta Acrilato)	23
2.4.2.4	PLA (Poliácido Láctico)	24
2.4.2.5	ABS (Acrilonitrilo-butadieno-estirero)	24
2.5	Fibras de reforço	25
2.5.1	Fibras celulósicas - Papel Kraft	26
2.5.2	Fibra de Basalto	29
2.5.3	Fibra de Carbono	29
2.5.4	Fibras de Vidro	30

2.6	Técnicas de termoformação.....	30
2.6.1	Vacuum Forming (Moldação a vácuo).....	32
2.6.2	Pressure Forming (Moldagem por compressão).....	32
2.7	Métodos de caracterização.....	33
2.7.1	TGA (Thermogravimetric analysis).....	33
2.7.2	SEM (Scanning electron microscopy).....	34
2.7.3	DSC (Differential Scanning Calorimetry).....	35
3	DESENVOLVIMENTO.....	39
3.1	Seleção das matérias primas.....	40
3.1.1	Seleção das fibras celulósicas - Papel Kraft.....	40
3.1.1.1	Análise termogravimétrica (TGA).....	44
3.1.1.2	Determinação da massa volúmica dos diferentes papéis.....	46
3.1.1.3	Determinação da porosidade dos diferentes papéis.....	47
3.1.1.4	Determinação da resistência à tração.....	48
3.1.2	Seleção das possíveis matriz poliméricas.....	51
3.1.2.1	Compatibilização dos polímeros com as fibras orgânicas e com o processo.....	54
3.1.2.2	Ensaio de Tração.....	58
3.2	Matriz polimérica reforçada com fibras celulósicas.....	60
3.2.1	Estudo do branqueamento do papel kraft (estudo da influência da lignina).....	60
3.2.2	Estudo da influência do conteúdo da fração mássica do polímero no compósito.....	61
3.2.3	Estudo do processamento por moldação a quente.....	63
3.2.3.1	Ensaio de tração.....	63
3.2.3.2	Ensaio de flexão.....	64
3.2.4	Estudo da influência da porosidade do papel nas propriedades mecânicas.....	66
3.2.5	Estudo da Influência da colagem dos compósitos.....	68
3.2.6	Caracterização do compósito de acordo com a norma EN438.....	69
3.2.6.1	Resistência à imersão em água em ebulição.....	70
3.2.6.2	Resistência ao vapor de água.....	72
3.2.6.3	Resistência térmica.....	74
3.2.6.4	Estabilidade dimensional.....	76
3.2.6.5	Resistência ao risco.....	78
3.2.6.6	Resistência à abrasão.....	80
3.2.6.7	Resistência às manchas.....	82
3.2.6.8	Resistência ao impacto.....	83
3.3	Análise Micromecânica da camada - Lei das Misturas.....	85
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	95
4.1	Conclusões.....	95

4.2	Proposta de trabalhos futuros	97
4.3	Artigos científicos, patentes e exposições	99
	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	103
	ANEXOS.....	113
	Anexo 1 -Ensaio dos resultados dos ensaios de tração	114
	Anexo 1.1 - Aos papeis kraft	114
	Mondi 160 gsm	114
	Koktamills 213 gsm	116
	Kraft 220 Hans Schmid	118
	Mondi 160 gsm	120
	Anexo 1.2 - Aos polímeros	121
	Ao PMMA (5mm/min)	121
	Ao PMMA (25mm/min)	124
	Anexo 1.3 - Fibras celulósicas + matriz polimérica	127
	Anexo 2 - Exemplo de cálculo dos ensaios de flexão (com base na norma ISO 14125)	128

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O presente trabalho foi desenvolvido em colaboração com a Sonae Indústria de Revestimentos, S.A no âmbito da disciplina de Dissertação/ Estágio do mestrado em engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). O trabalho está integrado no projeto “Flexcomp”, projeto este cofinanciado pelo IAPMEI, Portugal, através do programa Portugal 2020 e COMPETE 2020 (projeto número - 023541) e consiste no desenvolvimento de raiz do um material compósito termofornável e sustentável, recorrendo a uma matriz termoplástica e a fibras celulósicas.

1.2 Apresentação da empresa

A Sonae Indústria de Revestimentos é uma das 3 ramificações pertencentes à Sonae Indústria (SInd), estando inserida noutro grande grupo que é o universo SONAE. A Sonae Indústria foi fundada a 1959 tornando-se rapidamente um dos maiores produtores mundiais de painéis de derivados de madeira, com unidades industriais na Europa, América do Norte e África do Sul. Em maio de 2016 a Sonae Indústria conclui uma parceria com o grupo Arauco, sediado no Chile, que é um dos maiores produtores mundiais de recursos florestais. Na sequência desta parceria estratégica, criou-se a Sonae Arauco, detida pela Sonae Indústria em 50%. A SInd, através da Tafisa Canada, mantém 100% do negócio de painéis derivados de madeira no Canadá.. Na Figura 1-1 pode observar-se esquematicamente as ramificações da Sonae Indústria.

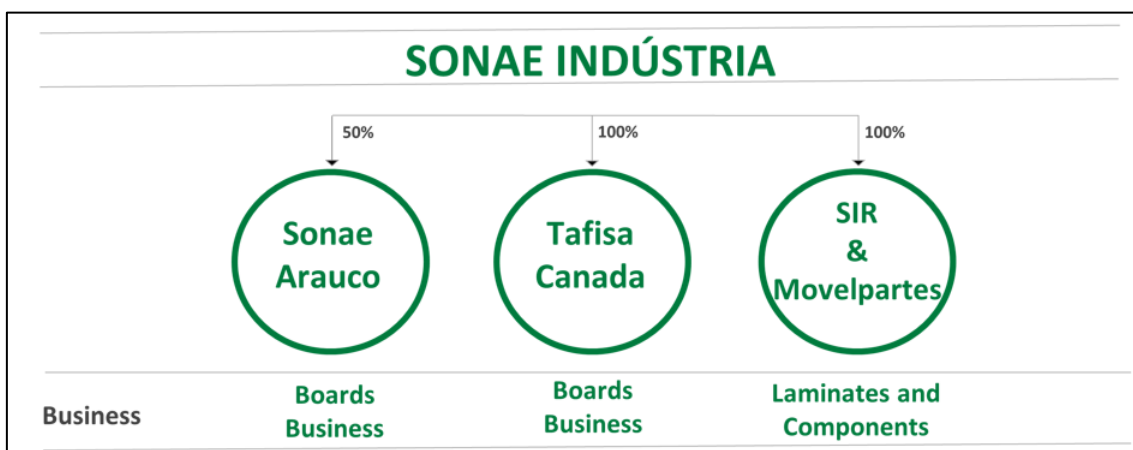


Figura 1-1 - Negócios pertencentes à Sonae Indústria [1]

Os produtos que advêm das diferentes fábricas têm por base derivados de madeira como PB (*Particleboard*), MDF (*Medium Density Fibreboard*), OSB (*Oriented Strand Board*), HPL (*High Pressure Laminates*) e CPL (*Continuous Pressure Laminate*). O grupo Sonae Arauco detém uma empresa de nome “EuroResinas” que faz a produção de diferentes resinas, nomeadamente fenólica e melamínicas, que podem servir para impregnação dos diferentes papeis utilizados pela SIR. A SIR é responsável pela produção HPL e é aqui que a presente tese se vai enquadrar.

1.2.1 Produtos comercializados pelo grupo

Existe uma gama variada de produtos produzidos pela Sonae Indústria. Podem ser divididos em duas categorias: Produtos crus (geralmente designados por *raw materials* ou produtos de construção e mobiliário) e os produtos de revestimento, que são produtos decorativos. Os produtos crus são:

- PB (*Particleboard* (aglomerado de partículas))



Figura 1-2 – Exemplos de PB [2]

- MDF (*Medium Density Fiberboard* (placa de fibra de media densidade))



Figura 1-3 – Exemplos de MDF [2]

- OSB (*Oriented Strand Board* (Placa de vertente orientada))



Figura 1-4 – Exemplos de OSB [2]

Estes produtos geralmente são designados de produtos crus pelo facto de raramente serem aplicados neste formato, sofrendo quase sempre um outro processo, para serem considerados produtos de revestimento. Os produtos de revestimento comercializados pela Sonae Indústria são compreendidos nas seguintes categorias.

- HPL (*High Pressure Laminate*) e CPL (*Continuous Pressure Laminate*).



Figura 1-5 – Exemplo de HPL e CPL. Visualmente podem ser idênticos mas variam nas suas propriedades mecânicas [2]

- VFB (*Veneer Faced Board* (Placa com face de folheado))



Figura 1-6 – Exemplo de um produto VFB [3]

- MFB (*Melamine Faced Board*), conhecido em português por melamina ou painéis melamínicos.

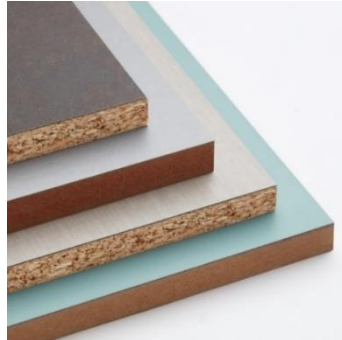


Figura 1-7 – Exemplo de um produto MFB [2]

- FL (*Flooring*)



Figura 1-8 – Exemplo de um produto *flooring* [4]

Os revestimentos HPL e CPL diferem no processo produtivo. Como o próprio nome indica o CPL é uma produção contínua (ao contrário do HPL) que recorre a prensas de correia dupla e por esse motivo não consegue atingir os valores de pressão usados no processo de HPL que usa pressões entre 50 e 90 bar, enquanto o CPL utiliza pressões entre 30 e 70 bar. A nível de matéria prima são constituídos, de um modo geral, pelos mesmos materiais à superfície (papéis melamínicos) mas que podem diferir no *backing* (parte de trás do laminado) que em vez do kraft (que se encontra na maioria dos HPL produzidos), os CPL utilizam muito aquilo que se designa por *vegetable parchment*, material este também à base de celulose e que se usa em outras áreas de indústria, como por exemplo na área alimentar. Ambos podem usar kraft, mas a espessura máxima atingida pelo CPL será à volta dos 1,5mm. Existe uma infinidade de conjugações de papéis, dando origem a uma vasta gama de produtos. O HPL pode ser vendido na variante de *Standard*, *Postforming*, *Fire Retardant* (FR) e *MED* (*Marine Equipment Directive*) [2], [5] e [6].

Os produtos VFB são revestimentos que usam PB ou MDF em conjunto com uma folha de madeira. Os produtos MF são revestimentos que usam papel impregnado com resina melamínica em conjunto com um aglomerado de partículas ou um MDF. A diferença entre um VFB e um MF é apenas o desenho do decorativo, que é sempre madeira no caso de VFB [2].

Os produtos FL, são idênticos aos produtos MF, só se diferenciando do MDF, pela utilização de uma espessura mais fina e pelo facto de que as peças são juntas por encaixe, ou seja, é necessário fazer entalhes de modo a que estas se liguem umas às outras, formando peças denominadas por macho ou fêmea, coisa que nos produtos MF não acontece [2].

1.3 Tema e objetivo de estágio

O nascimento do projeto Flexcomp deveu-se em grande parte à necessidade acentuada de cada vez mais ser necessário reduzir a emissão de resíduos e emissões poluentes, tentando criar desta forma um produto ecologicamente mais sustentável. Este produto terá a capacidade de ser reprocessável, vindo desta forma aumentado o seu ciclo de vida, aliada ao facto de apresentar uma baixa densidade, obtendo assim uma diminuição de emissão de poluentes quando o material for aplicado no setor dos transportes.

Sendo um material termomoldável e com um portefólio alargado de cores/desenhos/acabamentos que este possa ter, será também um material de interesse para o setor da construção e arquitetura.

A SIR objetiva desenvolver este produto, sem alterar o seu processo convencional, ou seja, moldação a quente.

Com esta dissertação, pretende-se criar e otimizar o compósito do ponto de vista das propriedades mecânicas, indicando qual será o melhor *build up* (organização de matérias primas (que contempla papel kraft + matriz termoplástica + reforço de fibras curtas), procurando determinar-se as propriedades mecânicas do mesmo. Um objetivo de mais longo prazo será o estudo dos raios de curvatura possíveis de obter com este material por termoldação.

1.4 Estrutura da dissertação

O presente trabalho está dividido em 4 capítulos que vão desde a introdução do tema, onde aborda conceitos inerentes ao tema em desenvolvimento; passando pela revisão bibliográfica, abordando os conceitos que estão relacionados com o tema; ensaios realizados com respetiva descrição experimental e discussão dos resultados obtidos, e por fim as conclusões, onde se deixa algumas sugestões para trabalhos futuros e ainda a exposição/divulgação nacional e internacional já realizada do trabalho.

Na introdução é feito o enquadramento projeto através de um texto sucinto da área em que a tese vai incidir, explorando o tema e o conjunto de objetivos propostos. A empresa de acolhimento para o desenvolvimento da tese também foi alvo de uma breve descrição neste capítulo, dando a conhecer os diversos mercados de atuação assim como os seus produtos, tentando transmitir a dimensão da empresa e da responsabilidade que isso acarreta.

Com o intuito de contextualizar o estudo realizado, os fundamentos que serviram de base para o seu desenvolvimento são descritos no segundo capítulo. Neste capítulo são abordados assuntos como a constituição de um material compósito, diferença entre polímeros termoendurecíveis e termoplásticos, que diferenças existe entra as fibras de reforço existente no mercado e algumas técnicas de termoconformação.

No capítulo seguinte, são descritas as atividades desenvolvidas ao nível de testes, metodologias, ações efetuadas e resultados obtidos. Inicialmente foi feita uma seleção das matérias primas, realizando um conjunto de testes para se poder verificar a viabilidade das mesmas e também criar uma base de dados dos diferentes materiais testados.

A conclusão em conjunto com as sugestões futuras de trabalho a realizar, é o último capítulo deste relatório, no qual são expostas as apreciações sobre os métodos e os resultados alcançados. O capítulo encerra com algumas propostas de ensaio a realizar em trabalhos futuros sobre o tema e com a exposição de algumas ações de divulgação do projeto.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Os mercados e a sustentabilidade – um problema transversal

A tese insere-se no projeto FlexComp, projeto este que surge de uma necessidade identificada no mercado dos transportes, que visa a substituição de metais e polímeros que atualmente são usados em estruturas desta área, procurando manter o produto resistente/retardante à chama, com a vantagem de permitir uma diminuição de peso das diferentes peças. Pretende-se também proporcionar maior resistência e sustentabilidade aos produtos, não precisando de alterar o processo atual de fabrico da SIR (Sonae Indústria de Revestimentos). Tendo estas premissas como objetivo, o trabalho irá focar-se no desenvolvimento de um compacto pós deformável, isto é que permite alterar a sua geometria (forma) por aplicação de pressão e temperatura. Este compacto será sustentável.

Um dos temas atuais que tem repercussões a nível internacional é a crescente poluição por acumulação de resíduos. Tendo em conta que os plásticos e os materiais compósitos têm uma vida quase infinita quando depositados em aterros, uma das soluções a que se recorre é à incineração dos mesmos (muitas vezes materiais de alto valor, como fibras de carbono e aramida por exemplo) originando também gases poluidores. Apesar destas desvantagens poderem ser diminuídas com aproveitamento da energia térmica dos gases, deve-se primar pela reciclagem dos mesmos. A reciclagem pode ser dividida em quatro categorias: primária, secundária, terciária e quaternária [7].

A reciclagem primária envolve o reprocessamento dos resíduos com o objetivo de voltar a obter um produto idêntico aquando da sua formação ou similar. Este caso é o que acontece aos componentes fabricados com polímeros termoplásticos. Na reciclagem secundária, o material não consegue voltar exatamente a ter as características que tinha originalmente, por motivos de degradação do mesmo. Quando isso acontece recorre-se à trituração e os produtos resultantes são usadas como cargas noutras aplicações. A reciclagem terciária permite a separação química (via pirólise ou dissolução por ácidos, sendo esta última não muito aceitável do ponto de vista ambiental), usando os hidrocarbonetos que daí derivam como monómeros, polímeros, *fuels* e outros produtos que contribuem para a minimização do uso dos recursos petrolíferos. Fibras e cargas existentes após este processo, podem ser usadas para compostos de moldação. Por fim, na reciclagem quaternária queima-se o material compósito (via incineração) aproveitando-se a energia térmica do processo para outros fins [7].

Na indústria dos transportes o problema da sustentabilidade é tido em maior consideração devido à dimensão global desta indústria, onde um pequeno melhoramento pode ter uma repercussão bastante significativa. O cerco aperta-se por diferentes frentes, quer seja pela necessidade de diminuir as emissões gasosas que advêm do motor de combustão, ou pela necessidade de escolher materiais recicláveis, reutilizáveis e/ou bio degradáveis. Contudo, nem todos os setores dos transportes veem desenvolvimento de materiais da mesma maneira. Pode afirmar-se que existem três grandes atributos importantes no desenvolvimento dos materiais e que são: desempenho (*performance*), custo e cadência de produção. Cada um tem um peso relativo diferente para cada indústria como se pode observar na Figura 2-1.

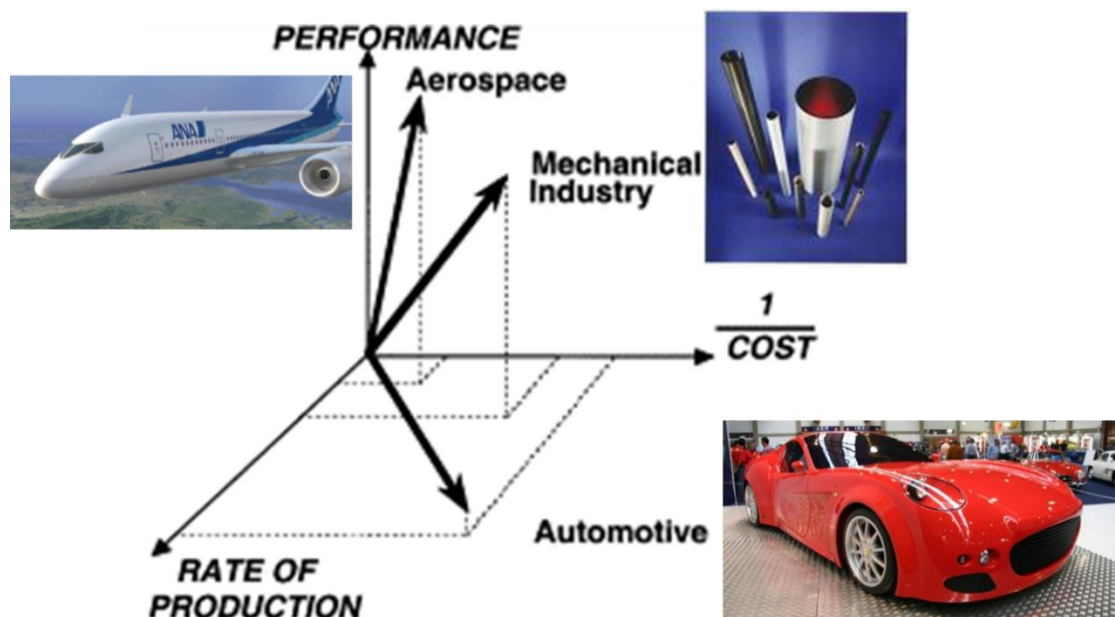


Figura 2-1 - Evolução dos diferentes mercados para os materiais compósitos [8]

Os plásticos designados de alto desempenho têm ganho algum relevo na indústria automóvel pelas vantagens que estes trazem consigo associadas [9]:

- Redução do consumo de combustível, através da redução do peso dos materiais. É estimado que uma redução de 10% no peso do automóvel traga uma redução entre 5 a 7% do consumo de combustível;
- Diminuição da corrosão, aumentando a longevidade dos materiais, requerendo baixa ou nula manutenção;
- Facilidade de assumir formas complexas;
- Baixo custo com vantagens a nível de conforto e segurança;
- Reciclabilidade;

- Esteticamente apelativos.

Todas as vantagens associadas aos plásticos de alto desempenho referidas anteriormente, podem ser encontrados em materiais compósitos, com melhores propriedades e, em alguns casos, a um preço menor. Todos os argumentos usados na aposta de plásticos de alto desempenho vão ser incorporados no material compósito que esta tese propõe desenvolver.

2.2 Indústria dos *High Pressure Laminates* (HPL)

Laminados de alta pressão, produtos conhecidos pelo acrónimo HPL, são produtos amplamente usados no sector do mobiliário, mas também usado para algumas peças do setor de construção e dos transportes. Um laminado, é a conjugação de múltiplas camadas de materiais fibrosos que podem ser unidos, obtendo-se características mecânicas elevadas. O primeiro produto do género foi desenvolvido nos inícios dos anos 1900, com a invenção de Leo Hendrik Baekeland a criar o primeiro polímero sintético “*Bakelite*” que era uma resina fenólica. Devido as suas propriedades, como ser isolante elétrico e térmico, teve uma grande gama de aplicações, sendo a mais difundida o seu uso para telefones e rádios. Só em 1930 é que foi fabricado o HPL conforme o conhecemos hoje: resina melamínica na superfície e resina fenólica no núcleo, pela fabricante Resopal [10], [11] e [12].

Os HPL podem ser de aplicação horizontal e vertical, e têm propriedades como resistência à abrasão/desgaste e a manchas/químicos, baixa manutenção e alta durabilidade, sempre associados a uma parte decorativa apelativa, que vai desde a diversificação de texturas, cores e efeitos do termolaminado. A massa volúmica destes materiais tem no mínimo $1,35 \text{ g/cm}^3$ [13].

A primeira etapa de produção passa pela impregnação dos papéis. Este processo é de uma extrema importância e sensibilidade, porque é neste ponto do processo que se faz a junção das resinas (termoendurecíveis) e respetivos aditivos aos diferentes papéis. O processo de impregnação varia consoante o papel a impregnar, pois as propriedades do papel em si também variam. A porosidade do papel assume-se como uma das mais importantes propriedades para definir os diversos parâmetros de impregnação. Parâmetros como o tempo de imersão diferem de papel para papel assim como a força aplicada nos rolos onde passa o papel após a impregnação, influenciando diretamente o conteúdo de resina (mais força aplicada, mais resina irá escoar do papel) ; a composição do banho em si e o número de banhos, que usualmente não são mais que dois, onde o segundo é na maioria das vezes apenas um *coating*. De cada vez que há contacto entre a resina e o papel, estes são sujeitos a uma secagem evaporando-se assim os voláteis presentes (as secagens normalmente andam à volta dos 160°C). Para melhor compreensão na Figura 2-2 está um esquema exemplificativo de um processo de impregnação

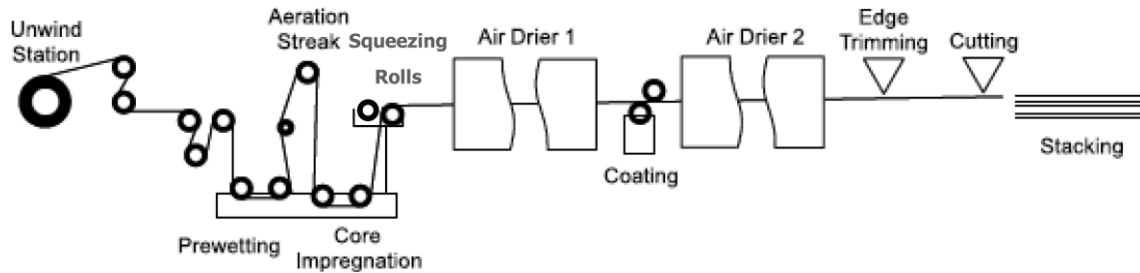


Figura 2-2 – Exemplificação esquemática do processo de impregnação [13]

Após o processo de impregnação estar concluído, os papéis estão prontos para serem empilhados de forma organizada, para se iniciar o processo de prensagem. Convencionalmente, os HPL consistem em camadas de material fibroso celulósico impregnado com resinas termoendurecíveis, comumente fenólica, para o papel kraft e melamínica, para papéis decorativos. Na Figura 2-3 pode-se observar a composição típica de um termolaminado de alta pressão.

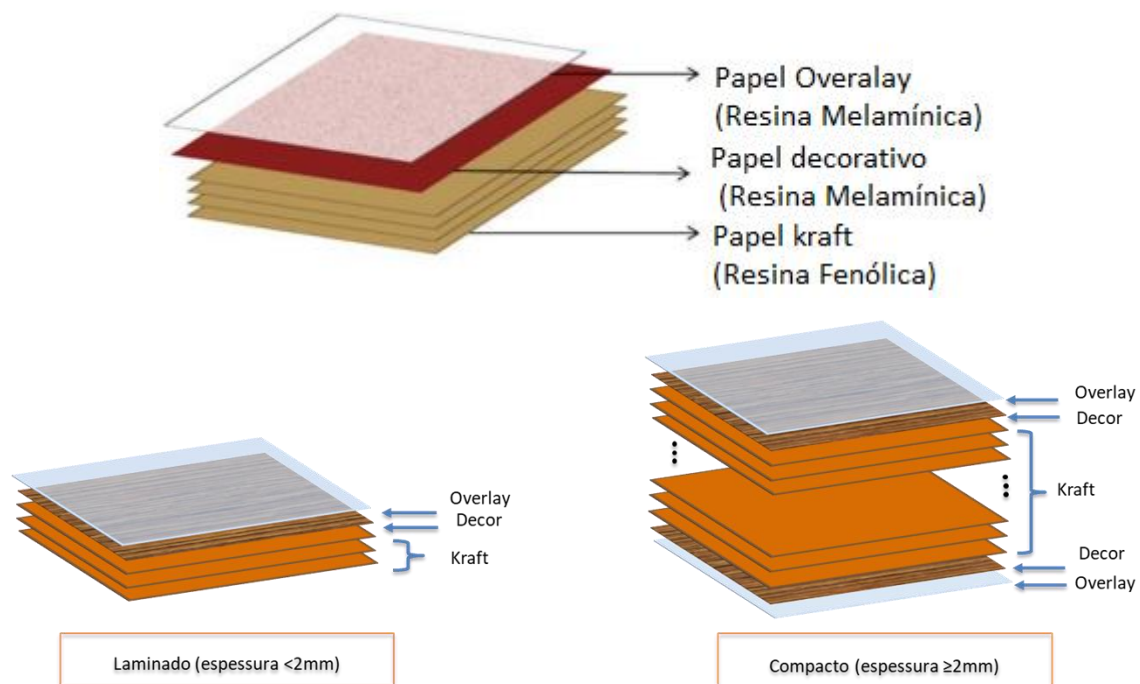


Figura 2-3 - Formação típica de um termolaminado de alta pressão (adaptado de [13] e [14])

O papel *overlay* tipicamente assume valores de gramagem entre 15 a 80g/m², o papel decorativo entre 50 a 160 g/m² e o papel kraft entre 80 e 300 g/m² dando origem a produtos com uma massa volúmica no mínimo 1,35 g/cm³. Papel kraft com a resina fenólica assegura as boas propriedades mecânicas do compósito enquanto que o papel decorativo assegura o bom aspeto e a resistência superficial, principalmente devido ao uso da resina melamínica. O *overlay* é um papel transparente, de uso opcional, que pode

ser reforçado com partículas cerâmicas (óxido de alumínio por exemplo), visando um aumento de resistência à abrasão e risco.

A norma EN438 “*High pressure decorative laminates (HPL) – Sheet based on thermosetting resins (usually called laminates)*” determina uma nomenclatura que permite classificar um HPL de uma forma simples e transversal às diferentes empresas produtoras deste material. A terminologia usada pode ser encontrada na *Tabela 2-1*.

Tabela 2-1- Nomenclatura de um HPL segundo a EN438 [15]

Primeira letra	Segunda Letra	Terceira Letra
H – <i>Horizontal grade</i>	G – <i>General purpose</i>	S – <i>Standard grade</i>
V – <i>Vertical grade</i>	D – <i>Heavy duty</i>	P – <i>Postformable grade</i>
		F – <i>Flame-retardant grade</i>

Para exemplificação da Tabela 2-1, são apresentados dois exemplos:

- HGS- Termolaminado decorativo Standard para utilização geral em aplicações horizontais.
- VGP – Termolaminado decorativo pós deformável para utilização em aplicações verticais de baixa solicitação ao uso.

No que diz respeito à prensagem de pratos quentes, as indústrias usualmente aplicam pressões que variam entre 5 a 10 MPa com temperaturas a variarem num intervalo de 120 (temperatura mínima obrigatória para ocorrer a cura das resina) a 150°C, nas camadas do laminado [10] e [13]. A SIR usualmente usa temperaturas à volta de 140°C e a uma pressão específica de 90 bar (9 MPa), havendo a possibilidade de variar estes dois parâmetros no ciclo de prensagem consoante as necessidades verificadas. Em resumo, o processo de produção de HPL pode-se resumir em 3 grandes passos como demonstra a Figura 2-4.

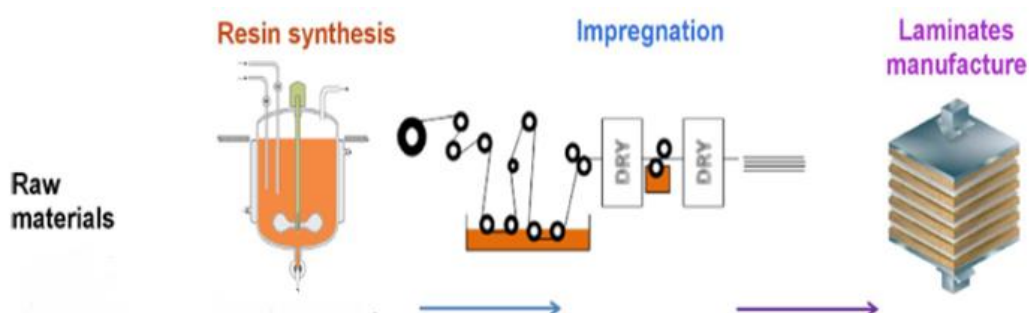


Figura 2-4 – Esquema comum de um processo produtivo para HPL: 1- Síntese de resinas; 2- Impregnação das folhas; 3- Prensagem com pratos quentes (adaptado de [16])

2.2.1 Propriedades dos papéis

De forma assegurar a qualidade do papel, é necessário controlar determinadas propriedades de modo a assegurar o controlo de processo dos produtos que se vão fazendo ao longo do tempo. No geral, existem quatro métodos de caracterização de papel, que se encontram na Tabela 2-2.

Tabela 2-2 – Propriedades de controlo em papeis impregnados.

Conteúdo de Resina (RC)
Conteúdo de voláteis (VC)
Flow (Escoamento)
Tempo de cura (TC)

O conteúdo de resina, como o próprio nome indica, permite saber o conteúdo de resina inserida no papel a impregnar; calcula-se com base na massa inicial da amostra e na sua massa após a sua impregnação, de acordo com a Equação 1. Este é um dos parâmetros mais importantes para garantir boas propriedades mecânicas no compósito.

$$RC (\%) = \frac{m_{\text{após impregnação}} - m_{\text{antes impregnação}}}{m_{\text{após impregnação}}} * 100 \quad \text{Equação 1}$$

O conteúdo de voláteis (VC) (Equação 2) calcula-se com base na sua massa antes e depois de uma passagem na estufa, com um tempo pré definido de 5 minutos, a 160°C. Os voláteis são na sua maioria constituídos por água.

$$VC (\%) = \frac{m_{\text{inicial}} - m_{\text{após estufa}}}{m_{\text{inicial}}} * 100 \quad \text{Equação 2}$$

O teste do *flow* permite-nos verificar a capacidade de escoamento da resina retirando, com o auxílio de uma espátula, a resina que escoou à volta do provete cortado. O cálculo é feito de acordo com a Equação 3.

$$flow\% = \frac{m_{\text{inicial}} - m_{\text{após prensagem}}}{m_{\text{inicial}}} * 100 \quad \text{Equação 3}$$

O tempo de cura indica-nos o tempo necessário para que a resina cure completamente a determinada temperatura.

2.3 Materiais compósitos e a indústria dos transportes

Foi a partir do século 20 que este grupo de materiais iniciou a caminhada de sucesso que perdura até aos dias de hoje. As múltiplas vantagens que apresentam fazem este grupo de materiais serem bastante difundidos e comuns, estando presentes no nosso quotidiano. Estes materiais requerem conhecimentos específicos sendo encontrados em aplicações bastante exigentes como é o caso da indústria aeronáutica e aeroespacial. Um material diz-se compósito quando resulta da combinação de dois ou mais materiais diferentes com uma interface distinta. Um dos materiais compósitos mais antigos conhecidos são os tijolos reforçados com fibra de palha. Hoje em dia, os compósitos mais conhecidos, passam pelo vulgar betão armado e ainda pelas comuns fibras de carbono embidas numa resina (a resina epóxido é das mais comumente usadas). Os materiais compósitos precisam sempre da matriz (fase contínua) para assegurar as boas propriedades do material, assegurando ainda esta uma eficiente distribuição de carga pelas fibras (fase descontínua), ajudando ainda a proteger as suas superfícies. É através da matriz que muitas das vezes se classificam os materiais compósitos [7], [17] e [18]. Na Figura 2-5 encontra-se o esquema de representação de um material compósito.

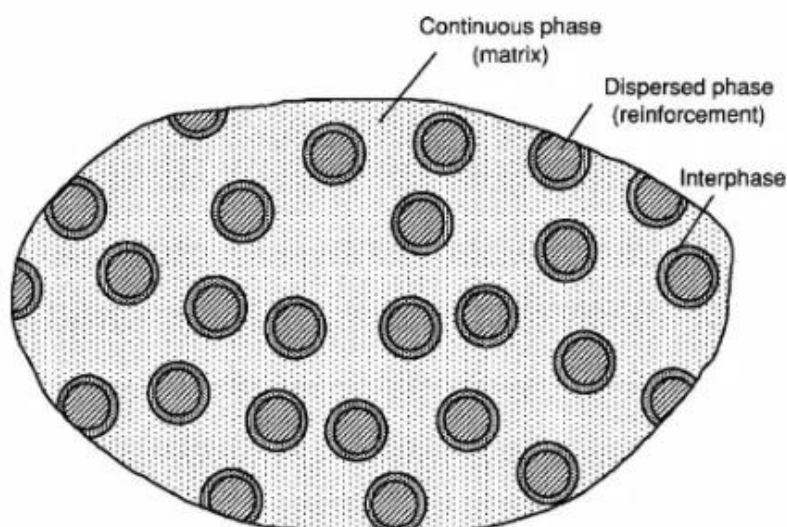


Figura 2-5 – Composição típica de um material compósito. A fase contínua (matriz) é menos resistente que o reforço. Existe sempre uma interface entre a fase contínua e o reforço. [19]

Abordando individualmente os setores de interesse para esta tese, que são os setores dos transportes, pode referir-se que na indústria aeronáutica são usados compósitos à base de fibras de carbono, aramida, híbridos de carbono-aramida e até fibras de boro em aplicações mais específicas. Os valores de fabrico destes materiais pode ser elevado mas pode ser compensado com os menores custos operacionais. Estes materiais compósitos sendo relativamente recentes têm ainda uma margem de progressão

bastante elevada prevendo-se que o sua utilização venha a aumentar. A indústria espacial é a indústria que mais relevo dá ao fator desempenho em detrimento do fator custo, pretendendo sempre uma solução que minimize o peso. Como também são sujeitos a muitas variações de temperatura, o compósito carbono-epóxico é muito usado devido ao seu baixo coeficiente de expansão térmico, que é quase nulo. Já na indústria automóvel, as propriedades de interesse como já foram anteriormente referidas através da Figura 2-1, cadência elevada e baixos custos, são as mais importantes. Assim, os compósitos mais usados são de matriz de poliéster e reforço em fibra de vidro e também fibra de carbono. A indústria ferroviária e a náutica também fazem uso de materiais compósitos, mas ainda numa pequena fração, tendo muito ainda por explorar [7] [17], [20].

Com o desenvolvimento proposto deste novo material compósito, pode-se esperar as vantagens e as desvantagens do produto final conforme indicado na Figura 2-6:

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none">• Diminuição do consumo de combustível através da redução do peso dos materiais, o que leva a uma menor poluição na área dos transportes;• Resistência ao fogo, com a introdução de fibras inorgânicas e de aditivos retardantes de chama;• Sustentável devido à possibilidade de reprocessamento;• Baixo custo quando comparado com os materiais de aplicação concorrente;• Possibilidade de diversificação de padrões de acabamento, através de cor/desenho, textura e geometria.	<ul style="list-style-type: none">• Reprocessamento limitado na medida em que a cada reprocessamento há sempre degradação do material;• Limitações na formas geométricas, não podendo assumir formas com ângulos muito fechados.

Figura 2-6 – Vantagens e desvantagens esperadas do material compósito desenvolvido nesta tese

2.4 Polímeros

Em materiais compósitos a combinação de materiais possível de se fazer é infindável, surgindo a um ritmo bastante acelerado novas combinações de materiais um pouco por todo o mundo. As matrizes poliméricas são comumente usadas nos materiais

compósitos, principalmente devido ao seu baixo custo e facilidade de produção do mesmo. De um modo mais intuitivo na Figura 2-7 apresentam-se principais vantagens e desvantagens associadas a este tipo de matriz.

Vantagens

- Baixa massa volúmica
- Boa resistência à corrosão
- Isolamento térmico e elétrico
- Facilidade de conformação e facilidade de produção em massa (economicamente e tecnicamente)
- Grande variedade de polímeros a baixo preço
- Excelentes propriedades óticas

Desvantagens

- Material próprio à retração (fraca estabilidade dimensional)
- Materiais combustíveis/inflamáveis
- Sensíveis ao envelhecimento
- Propriedades mecânicas relativamente baixas assim com a resistência a temperaturas

Figura 2-7 – Vantagens e desvantagens das matrizes polimérica [17]

As matrizes poliméricas dividem-se em duas grandes categorias: termoplásticas e termoendurecíveis. As termoplásticas ainda têm dentro de si um subgrupo, que são os semi-cristalinos ou amorfos, que irão ser explicados em mais detalhe no capítulo 2.4.1. As matrizes termoplásticas são constituídas maioritariamente pelos designados plásticos técnicos. Estes polímeros não têm qualquer reticulação entre moléculas, sendo mantidas nas suas posições à custa de ligações secundárias (forças intermoleculares). Quando se aquecem as ligações são quebradas e usufruem de uma liberdade de movimento que permite conformar o material. Quando se arrefece, as moléculas não têm tanta liberdade e começam a ficar “presas” com as ligações secundárias a darem-se de novo. De um modo geral, estas matrizes salientam-se por apresentarem maior resistência ao impacto, maior tenacidade e bastante menor higroscopicidade, quando comparados com os polímeros termoendurecíveis. Estes polímeros são facilmente processados por injeção e termoformação podendo ser reciclados, ao contrário das matrizes termoendurecíveis, sendo que esta capacidade tem uma relevância enorme nos dias de hoje [7]. Como desvantagem, de um modo geral, apresentam grandes dificuldades em impregnar completamente os reforços, ao contrário de uma resina termoendurecível, que apresenta viscosidades muito mais baixas que um termoplástico [17].

Os polímeros também diferem a nível de propriedades mecânicas. Nas Figura 2-8 e Figura 2-9 é bastante perceptível essa diferença ao nível do módulo de elasticidade em função da temperatura e também da sua deformação.

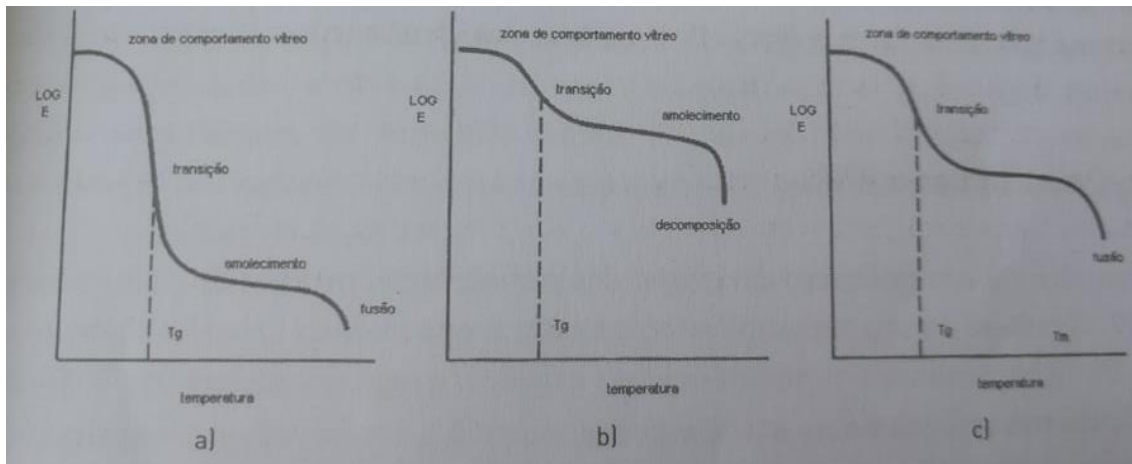


Figura 2-8 -Evolução do módulo de elasticidade em função da temperatura: a) termoplástico amorfo; b) termoendurecível; c) termoplástico semicristalino [7]

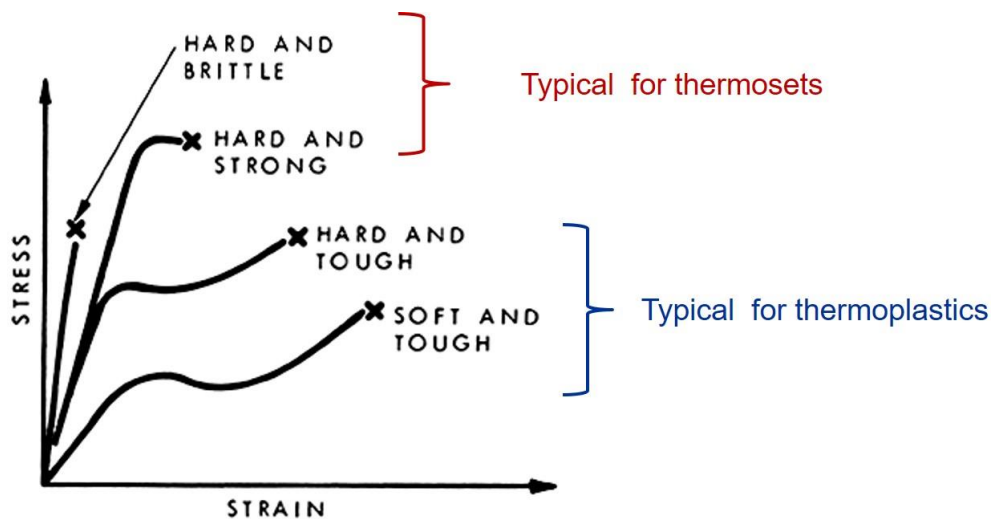


Figura 2-9 – Comportamento esperado para cada uma das categorias de polímeros num ensaio de tração-deformação [21]

Em resumo, cada polímero tem as suas próprias vantagens, vantagens essas que podem ser agrupadas da seguinte forma (ver Figura 2-10).

Termoplásticos	Termoendurecíveis
<ul style="list-style-type: none"> • Tempo ilimitado em stock; • Não precisa de solventes; • Fabricação mais rápida • Resistência ao impacto maior; <ul style="list-style-type: none"> • Maior tenacidade; • Baixa higroscopicidade; • Podem ser reciclados e reprocessados; 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior facilidade de impregnação do material de reforço devido à sua baixa viscosidade. • Boa estabilidade dimensional.

Figura 2-10 – Vantagens de cada tipo de polímeros [17] e [22]

De seguida, irão ser apresentadas as resinas termoendurecíveis que comumente se usa na indústria dos HPL e alguns polímeros termoplásticos que podem ser introduzidos no projeto.

2.4.1 Resinas termoendurecíveis

As resinas termoendurecíveis reagem de forma irreversível. Esta reação exotérmica denomina-se por cura. Se a amostra arrefecer após a cura se tentar de novo aquecer esta apenas irá apresentar uma transição vítrea [23].

2.4.1.1 Fenol Formaldeído (PF)

O Fenol Formaldeído ($-\text{CH}_2-\text{C}_6\text{H}_3(\text{OH})-$)_n iniciou a sua produção comercial em 1909 e desde então, mais de metade da sua produção é direcionada a produtos relacionados com a madeira (*Plywood*, MDF, laminados). Apesar desde binómio (papel kraft e resina fenólica) ser usado há muito tempo, esta resina ainda é alvo de muitos estudos, relativamente a problemas de impregnação (representação esquemática na Figura 2-11) que estas podem trazer e tentativas de otimização devido ao seu baixo custo e facilidade de processamento.

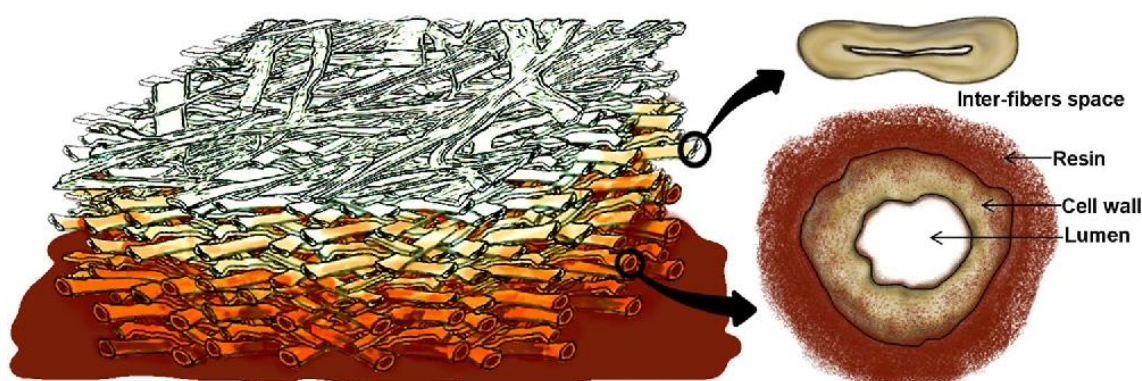


Figura 2-11 – Representação esquemática do papel kraft a ser embebida por resina fenólica [16]

Esta resina é a que se pretende substituir com a implementação do trabalho deste projeto. Sendo termoendurecível, após a sua cura esta não permite um rearranjo molecular, não possibilitando a sua moldação após a etapa de prensagem [24]. Na Figura 2-12 pode-se encontrar algumas das suas forças e limitações.

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo • Resistência a altas temperaturas • Baixa emissão de fumo • Material auto-extinguível • Boa resistência a raios UV 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor resistência ao risco, água e temperatura que a resina MF • Tende a ser quebradiço • Tende a ser atacado por substâncias alcalinas no seu estado puro

Figura 2-12 - Forças e limitações do Fenol Formaldeído [24]

2.4.1.2 Melamina Formaldeído (MF)

A Melamina Formaldeído $((\text{CH}_2\text{-N})_2\text{-N}_3\text{C}_3\text{-N})_n$ teve a sua primeira produção industrial em 1940 e a sua maior aplicação é na área dos laminados, sendo maioritariamente usada na última camada do compósito. Esta resina quer-se à superfície para lhe conferir algumas propriedades de resistência térmica e de resistência a riscos e abrasão ao HPL, propriedades características da resina e que podem ser consultadas na Figura 2-13. Esta resina tem que ser repensada e substituída na parte decorativa do flexcomp por não apresentar a capacidade de termoformação.

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> • Resistência ao risco, calor e manchas/químicos • É translúcido na sua cor original, mas pode assumir qualquer cor • Não tem tendência para amarelecer • Boa isolamento elétrica que não é afetada pela humidade • Pode ser aplicado no ramo alimentar • Baixa absorção de água 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa resistência à oxidação a longo prazo <ul style="list-style-type: none"> • Baixa resistência dimensional, particularmente acima dos 80°C • Não é barato

Figura 2-13 - Vantagens e limitações da resina melamina-Formaldeído [25]

2.4.2 Polímeros termoplásticos

Este tipo polímero apresenta importantes vantagens. Propriedades como baixa massa volúmica, baixa energia de produção associado a um baixo custo e a possibilidade de fazer formas complexas com relativa facilidade são determinantes. É usual distinguir duas variantes de termoplástico, semi-cristalino ou amorfo [26]. As diferenças entre estes dois grupos de polímeros são principalmente duas: a diferença da orientação das moléculas, onde nos polímeros amorfos não há qualquer tipo de orientação, encontrando-se já alguma nos polímeros semi cristalinos, como é observável na Figura 2-14; o outro motivo é o facto da caracterização da T_g (*glass transition temperature*) de um polímero semi cristalino não estar bem definida como acontece num polímero amorfo, como se pode verificar através da Figura 2-15. Para este tipo de polímeros já se referencia uma T_m (*melting temperature*), que é a temperatura para a qual as ligações das zonas cristalinas começam a quebrar-se, apesar de haver zonas amorfas que têm liberdade para rodar nas ligações abaixo desta temperatura T_m , permitindo ter boas propriedades de resistência ao choque quando essas temperaturas são atingidas [26] [23].

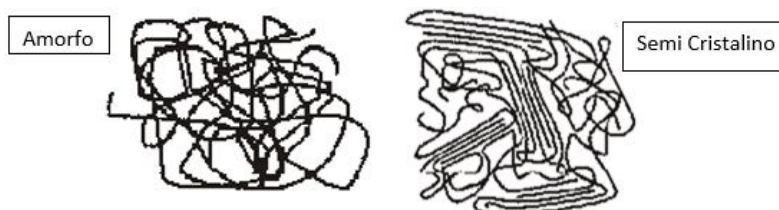


Figura 2-14 - Arranjo molecular de um polímero amorfo e de um polímero cristalino. Adaptada de [26]

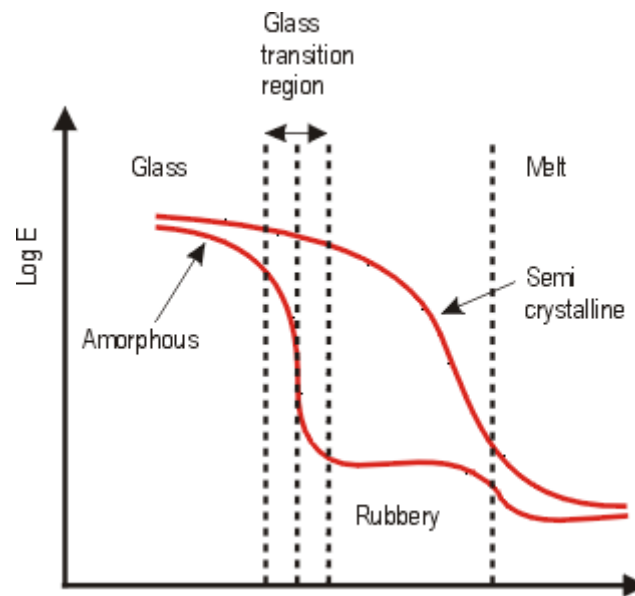


Figura 2-15 - Efeito da temperatura no modo de elasticidade (assumindo que ambos os polímeros têm a mesma T_g e T_m) adaptada de [26]

As matrizes termoplásticas que vão ser apresentadas e consideradas para este trabalho, sofreram uma pré seleção de acordo com as seguintes premissas:

Tabela 2-3 – Características necessárias para a escolha da matriz termoplástica para este trabalho

Características obrigatórias	Características preferenciais
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Apresentar baixa T_g e T_m, obrigatoriamente abaixo de $\leq 175^\circ\text{C}$ 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Apresentar um alto valor de MFI (índice de fluidez da massa), preferencialmente superior a 25g/10min
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Apresentar compatibilidade com reforços orgânicos, de base celulósica, e inorgânicos, à base de vidro. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Apresentarem resistência aos raios UV.
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Deverá ser reprocessável, ou seja, permitir a sua termoconformação, mais que uma vez. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Apresentar resistência ao Fogo.
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Baixa viscosidade

2.4.2.1 PE-HD (Polyethylene, high density)

O polietileno de alta densidade $(\text{CH}_2\text{-CH}_2)_n$ iniciou o seu fabrico industrial em 1955. O seu uso é bastante diversificado desde filmes de embalagem, garrafas, brinquedos, tubos entre outras aplicações. Na Figura 2-16 podem ser encontradas algumas das suas propriedades, características e limitações típicas.

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none">• Muito barato• Resistência química• Boa resistência ao impacto<ul style="list-style-type: none">• Excelentes propriedades elétricas• Baixa permeabilidade	<ul style="list-style-type: none">• Fraca resistência mecânica• Arde facilmente• Baixa resistência UV• Suscetível a fissuração

Figura 2-16 - Vantagens e limitações do polietileno de alta densidade [27]

2.4.2.2 PP (Polipropileno)

O polipropileno $(\text{CH}_2\text{-CH}(\text{CH}_3))_n$ começou a ser produzido industrialmente em 1957. Este polímero representa à volta de 95% das aplicações comerciais do tipo GMT (*Glass Mat Thermoplastics*) [7], sendo amplamente usado na indústria automóvel. Em resumo as suas forças e limitações são:

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> • Idêntico ao PE mas com melhores propriedades mecânicas e densidade mais baixa. • Mais durável que o poliestireno (PS) • Mínima absorção e permeabilidade • Propriedades elétricas não afetadas pela exposição à água 	<ul style="list-style-type: none"> • Preço ligeiramente mais alto • Quebradiço a temperaturas inferiores a -20°C <ul style="list-style-type: none"> • Pouca resistência a combustíveis • Pouca resistência a raios UV • Continua a arder após ser retirada a fonte de ignição <ul style="list-style-type: none"> • Expansão térmica

Figura 2-17 - Vantagens e limitações do polipropileno [28]

2.4.2.3 PMMA (Poli Metil Meta Acrilato)

O PMMA $(\text{CH}_2\text{-C}(\text{CH}_3)\text{COOCH}_3)_n$ é dos termoplásticos com melhores propriedades mecânicas. As suas vantagens e limitações encontram-se na Figura 2-18.

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> • Excelente transparência e resistência UV. • Boas propriedades mecânicas em geral. • Baixa emissão de fumo <ul style="list-style-type: none"> • Pode ser colorido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa resistência a solventes e a ácidos minerais. • Suscetível a fissuração. <ul style="list-style-type: none"> • Absorção de água. • Baixa resistência ao risco.

Figura 2-18 - Vantagens e limitações do PMMA [29]

2.4.2.4 PLA (Poliácido Láctico)

PLA é um bio polímero, podendo ser produzido a partir de bactérias, biodegradável e reciclável. É no decorrer do processo de fermentação de vegetais ricos em amido que é produzido o ácido láctico que é usado para diversas aplicações. O PLA foi sintetizado pela primeira vez em 1932 mas com propriedades mecânicas que foram consideradas insatisfatórias. A DuPont tentou otimizar este com melhores propriedades mecânicas mas surgiu um novo problema. Este reagia com a água. Só em 1966 é que houve um interesse real no produto, com a demonstração da degradação do mesmo in vitro.

Este polímero é capaz de ser sujeito a um processo de compostagem para a sua degradação, a desvantagem deste é que a compostagem só ocorre nuns determinados parâmetros físico-químicos e biológicos. A resistência ao impacto também não é das melhores. Como vantagem apresenta uma boa compatibilidade com fibras naturais e a capacidade de ser misturado com outros polímeros. A síntese-resumo encontra-se na Figura 2-19.

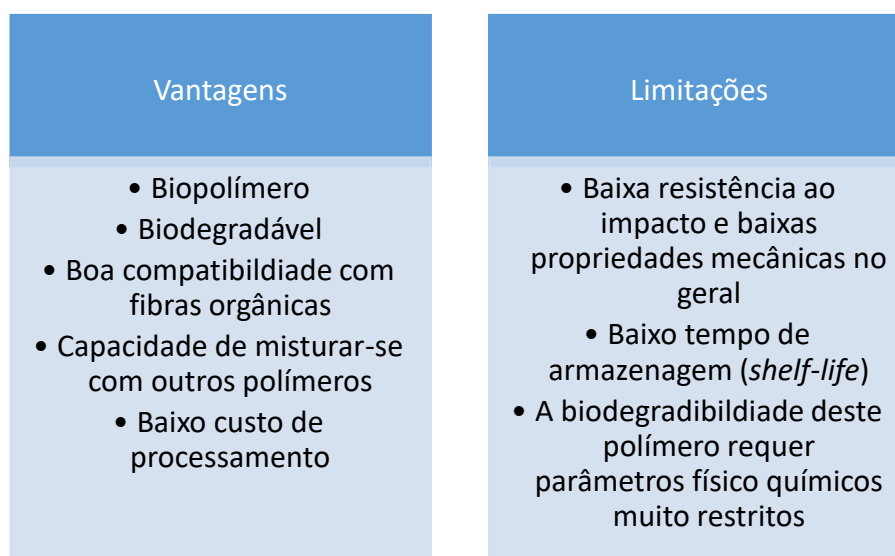


Figura 2-19 - Vantagens e limitações do PLA (adaptado de [30])

2.4.2.5 ABS (Acrilonitrilo-butadieno-estireno)

Este polímero termoplástico amorfo tem uma grande variedade de aplicações, que vão desde capacetes de segurança, linhas de refrigeração, cascos de embarcações, materiais isolantes até painéis de instrumentos e os brinquedos lego [31]. O ABS tem como vantagens a grande resistência ao impacto e a sua dureza. É também um dos polímeros mais usados para uso de materiais termoformados. Como desvantagens apresenta uma baixa resistência aos raios UV e alguns químicos, como ácidos fortes, solventes (apenas

resiste ao álcool), aldeídos, cetonas e ésteres [32] e [33]. Na Figura 2-20 pode-se encontrar uma pequena síntese deste polímero relativamente às suas vantagens e desvantagens.

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none">• Baixo custo;• Grande capacidade de deformação;• Reciclável;• Baixa massa/volúmica;• Material pouco condutor (termicamente e eletricamente).• Alta resistência ao impacto	<ul style="list-style-type: none">• Pouca resistência a químicos no geral;• Pouca resistência à fadiga;• Baixa resistência a raios UV e à intempérie;• Quando se encontra a arder, liberta muito fumo.

Figura 2-20 - Vantagens e limitações do ABS(adaptado de [34])

2.5 Fibras de reforço

As fibras de reforço podem assumir diferentes denominações com base na sua geometria, tipologia e orientação como se pode observar na Figura 2-21. Neste tópico vão se abordar algumas das fibras mais conhecidas e que podem ser aplicadas no projeto, com a devida explicação das suas principais vantagens e desvantagens.

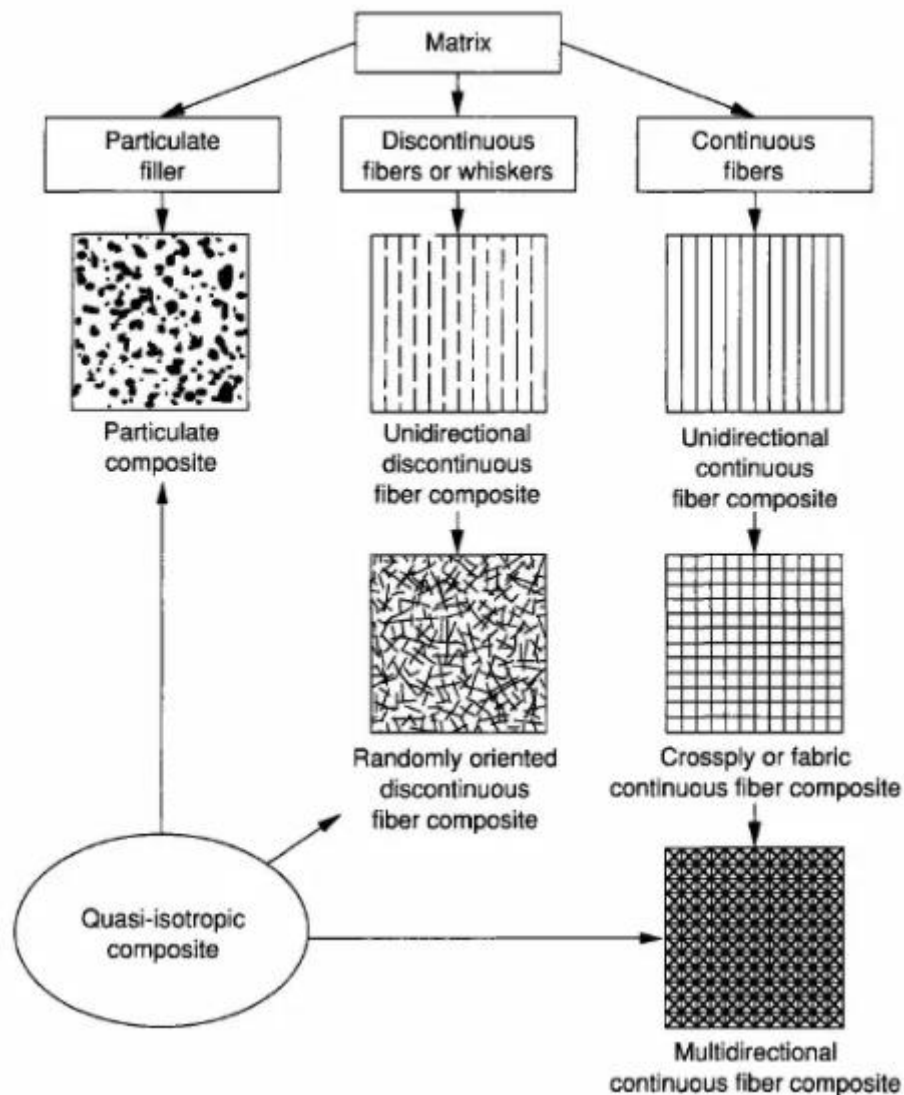


Figura 2-21 – Classificação dos tipos de reforço [19]

2.5.1 Fibras celulósicas - Papel Kraft

O kraft é um produto derivado de um processo de transformação de madeira, que confere propriedades mecânicas mais interessantes a este material. A matéria prima são geralmente fibras de *hardwood* mas também se usa de *softwood*. As fibras de *hardwood* são mecanicamente mais eficientes, quer a nível de longevidade quer a nível de resistência ao fogo, sendo também mais caras e com maior massa volúmica, o que será uma desvantagem em algumas aplicações [13] e [35]. Estas são provenientes

maioritariamente de árvores da classe da caducifólia (*deciduous*) e têm o tamanho à volta de 1 mm de comprimento e uma largura inferior a 0,02mm [36]. Já as fibras de *softwood* apresentam como vantagem uma maior porosidade e uma maior flexibilidade. Estas advêm maioritariamente de madeiras da classe das coníferas. Estas fibras geralmente têm o comprimento de 3 mm e entre 0,02mm e 0,035mm de largura [36]. Fatores como a idade, o ambiente, a época de plantação e corte das árvores, a sombra que estas têm ou não, influenciam bastante nas propriedades conferidas em cada uma das fibras celulósicas.

O processo de transformação da madeira é algo complexo e demorado. Antes de chegar a papel o kraft passa pelo que se designa de pasta de papel, que é a fase mais diferenciadora de produtor para produtor (para a mesma matéria prima). O processo pode ser observado através da Figura 2-22. A Indústria da pasta e do papel é uma área em que Portugal se destaca, sendo o terceiro maior produtor europeu desta matéria prima (com uma quota de 7,3%) com empresas de renome internacional como a “*the Navigator Company*” e a “*Altri*” [37].

Em suma o papel kraft são geralmente fibras descontínuas ligeiramente orientadas (no sentido de fabrico) que podem ser produzidas com diferentes tipos de madeira e que irão conferir propriedades mais ou menos elásticas, e também um maior ou menor grau de porosidade, consoante a família da madeira escolhida. Em muitos casos, é utilizado uma mistura de diferentes tipologias/família de madeiras.

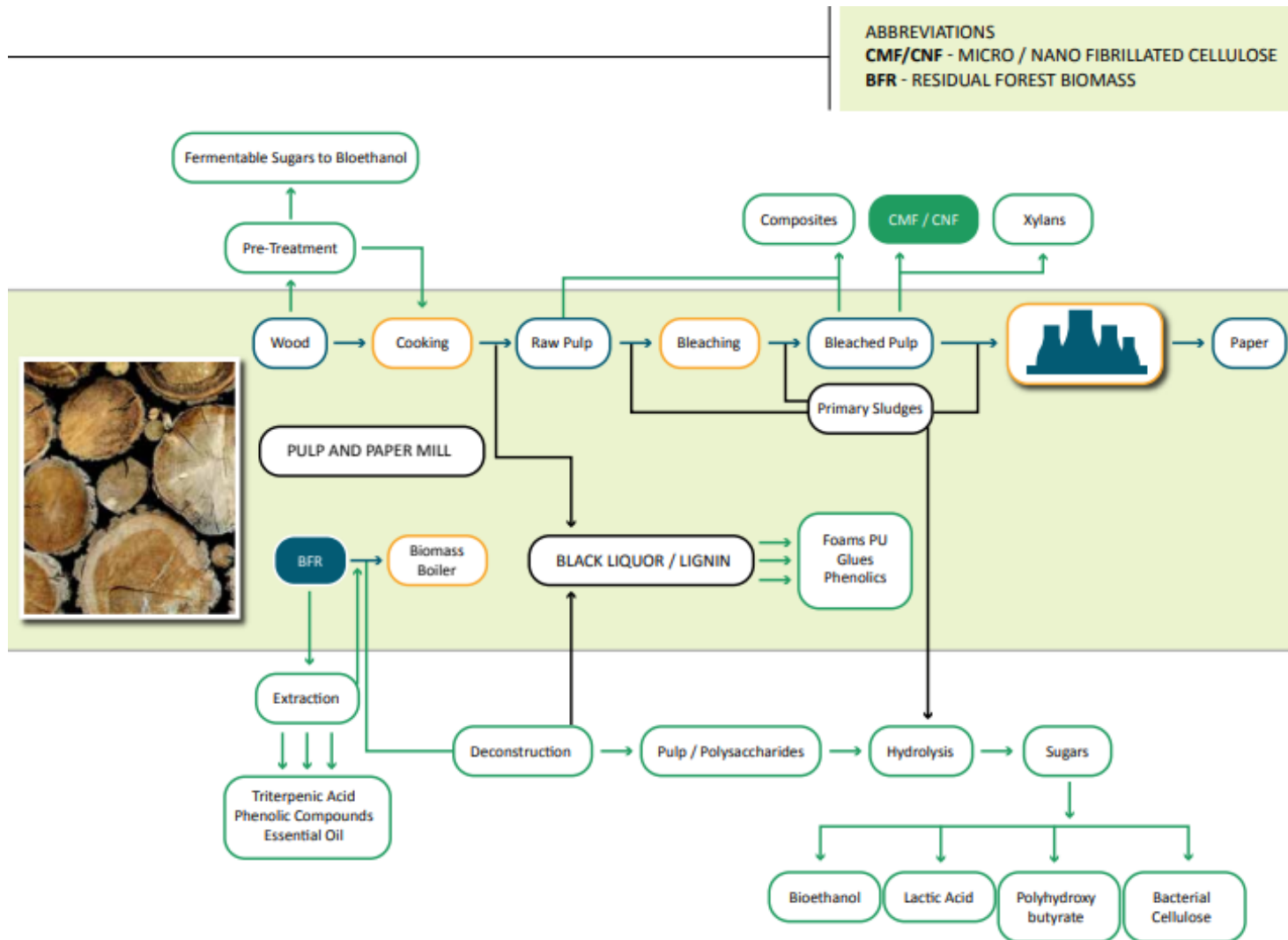


Figura 2-22 - Diagrama de processos de produção de papel kraft [37]

2.5.2 Fibra de Basalto

A primeira patente sobre fibras de basalto surgem em 1924 pela mão do francês Paul Dhé [38]. Fibras de Basalto são usadas principalmente para aplicações têxteis tendo como requisito conferirem proteção ao fogo e/ou isolamento de altas temperaturas. Devido a esta sua capacidade, este material é bastante utilizado como retardador de chama em edifícios industriais e domésticos, como por exemplo caldeiras e chaminés. Também são usadas como material de reforço em materiais compósitos para a indústria automóvel, eólica e aeroespacial [39] e [40]. Tem ainda como ponto positivo ser de origem natural, que como o próprio nome indica, advém do basalto, que é a rocha vulcânica mais comum no planeta [41]. Uma das maiores dificuldades quando se trabalha com este tipo de fibras é a baixa capacidade de adesão [40].

2.5.3 Fibra de Carbono

A produção das fibras de carbono de alta resistência iniciou-se na década de 1950 por Roger Bacon [38]. As fibras de carbono são usualmente subdivididas em dois grupos com base na sua percentagem de carbono. Entre 80 e 95% são as fibras mais comuns e com maior mercado; acima de 95%, até aos 99% encontram-se as fibras de grafite ou também conhecidas como fibras de carbono de alto desempenho cuja aplicação recai nas áreas da indústria espacial e aeronáutica. Estas fibras podem ser produzidas através de diferentes matérias primas: celulose, poliacrilonitrila (PAN) ou alcatrão (“pitch”). Usando o PAN como matéria prima obtêm-se as fibras com melhores propriedades mecânicas. Para a sua comercialização, estas podem assumir cinco designações diferentes com base na sua resistência mecânica [7]:

- UHM (*Ultra High modulus*) – para módulos superiores a 500 GPa;
- HM (*High Modulus*) – para módulos superiores a 300 GPa e rácio resistência mecânica/módulo de cerca de 1%;
- IM (*Intermediate modulus*) – para fibras com módulos até 300 GPa e rácio de resistência mecânica/módulo de cerca de 1%;
- VHS (*Very High strength*) – para baixo módulo, valores inferiores a 100 GPa.
- HS (*High strength*) – para valores de resistência à tração superiores a 3 GPa e a rácio resistência/rigidez entre 0,015 e 0,02.

A grande vantagem destas fibras é a sua grande rigidez (módulo de *Young*) e resistência a esforços de tração. Têm ainda a capacidade de conduzir eletricidade, alta resistência à fadiga, grande durabilidade e acima de tudo uma grande estabilidade dimensional,

sendo usado por diversas vezes para aplicações na área da metrologia, da ótica e aeroespacial [7] e [42].

2.5.4 Fibras de Vidro

As fibras de vidro são uma das fibras mais antigas. As suas primeiras aplicações foram feitas pelos egípcios para efeitos decorativo mas só na década de 1930 é que surge o primeiro método de produção industrial para fins comerciais [38]. As fibras de vidro são o tipo de reforço mais utilizado devido às boas propriedades aliadas ao baixo custo quando comparado com outros tipos de reforço. As fibras de vidro à saída da fieira, (que é o processo mais comum de produção de fibra de vidro) têm, normalmente, logo dois tratamentos superficiais: um revestimento têxtil para não se danificarem e um revestimento plástico, para permitir a compatibilização das fibras com diferentes matrizes orgânicas existentes. O revestimento plástico tem quatro componentes distintos [7]:

1. Um ligante que permite manter os filamentos unidos, evitando-se movimento relativo e abrasão; os ligantes são constituídos por suspensões ou emulsões de poliacetato de vinilo, resinas de poliéster ou epóxido;
2. Um agente de adesão à base de compostos orgânicos de silício com o objetivo de facilitar a adesão fibra-matriz da resina;
3. Um lubrificante;
4. Agentes anti-estáticos e/ou agentes de impregnação.

2.6 Técnicas de termoformação

A termoformação consiste no aquecimento de uma placa termoplástica plana com o intuito de esta amolecer e adquirir a forma do molde com uma cavidade com a forma que se pretende obter (exemplo na Figura 2-23). Esta técnica é comumente usada para fazer os *dashboards* dos carros ou tabuleiros, por exemplo [43].

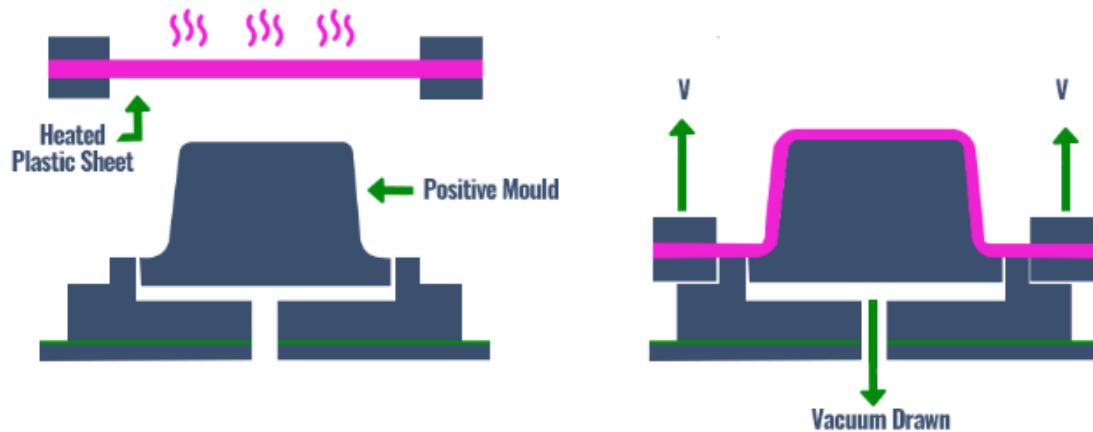


Figura 2-23 - Princípio da termoformação [43]

Este processo pode ter bastante variantes mas todas com o mesmo objetivo, que a placa adquira a forma do molde. O método pode ser resumido em cinco passos:

1. A placa é colocada numa superfície de modo a esta ser aquecida, podendo ser fixada ou não;
2. A placa toma a forma do molde com o auxílio de vácuo, ar comprimido ou algum componente mecânico;
3. A peça é arrefecida o suficiente para ser removida sem alterar a sua forma
4. Possíveis rebarbas existentes são removidas.

Na indústria dos HPL já existe uma técnica de *postforming*, mas esta técnica só permite modificações em duas dimensões e não em três como se pode ver pela Figura 2-24. Este método pode ser feito de modo estacionário ou de modo contínuo e consiste em colocar o HPL sobre uma superfície, fixando, através de um adesivo ou através de conexões mecânicas, e aquecer até temperaturas que podem ir de 120 a 200°C no HPL, de seguida pressiona-se o HPL contra um substrato, usualmente MDF ou aglomerados, que tem um determinado raio de curvatura, raio esse que o HPL vai assumir após a finalização do processo.



Figura 2-24 – Exemplificação de um processo de *postforming*. 1- HPL fixado ao substrato; 2- Aquecimento do HPL até uma temperatura pré definida; 3- Aplicação de pressão contra o molde; 4- Etapa de arrefecimento para consolidação geométrica; 5- Produto final (adaptado de [44])

Tendo por base o objetivo desta dissertação, que é a capacidade de o produto assumir formas 3D, duas técnicas vão ser abordadas mais em pormenor: *Vacuum Forming* (Moldação a Vácuo) e *Pressure Forming* (Moldação por compressão).

2.6.1 *Vacuum Forming* (Moldação a vácuo)

Este processo recorre à aplicação de calor e pressão através de vácuo. De maneira geral, é esta a técnica mais aplicada para a termoformação de termoplásticos. A placa a termoformar é colocada em cima do molde que posteriormente, pela força que a membrana irá exercer através do vácuo existente, esta irá adquirir a forma do molde. A título de exemplo na Figura 2-25 está uma peça flexcomp a ser termoformada pelo método aqui descrito.

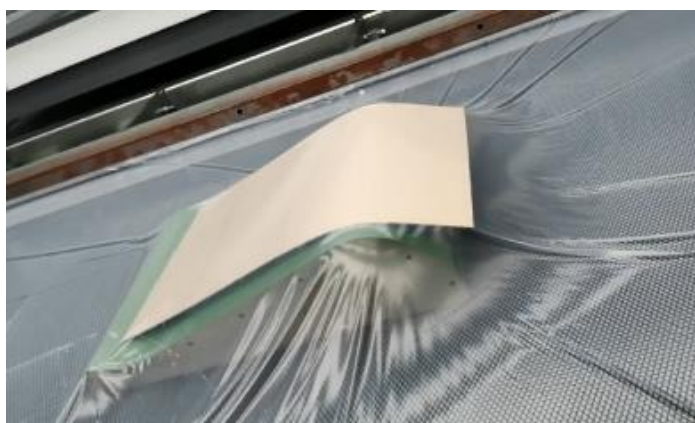


Figura 2-25 – Exemplo da peça Flexcomp a ser termoconformada pelo método *Vacuum Forming*

2.6.2 *Pressure Forming* (Moldagem por compressão)

A diferença desta técnica para a anterior (*Vacuum Forming* (Moldação a vácuo)) é que esta usa o molde macho e fêmea enquanto na anterior um dos moldes é substituído

por uma membrana de plástico. É utilizado pressão em vez de vácuo. Este processo permite a produção de peças com maior detalhe e maior qualidade estética, tendo ainda a possibilidade de serem introduzidas superfícies texturizadas. Na Figura 2-26 podemos ver um exemplo prático da peça flexcomp a ser termoformada por o método aqui descrito.



Figura 2-26 – Exemplo de uma peça flexcomp a ser termoformada pelo método *pressure Forming*

2.7 Métodos de caracterização

No desenvolvimento do material compósito, foi necessário recorrer a diferentes métodos de caracterização de materiais. Foram realizados ensaios comuns, como por exemplo ensaios de tração e flexão, e outros métodos menos difundidos sendo para estes providenciado uma base teórica. Por esse motivo serão abordados, ainda que de maneira não exaustiva, o princípio de funcionamento de alguns dos métodos usados.

2.7.1 TGA (*Thermogravimetric analysis*)

O princípio deste ensaio baseia-se na utilização do calor para provocar alterações física e químicas num material. Enquanto a temperatura do forno vai aumentando está a ser constantemente monitorizado a massa da amostra. Esta monitorização constante vai permitir determinar em que temperaturas se verificam alterações como a desidratação, decomposição ou oxidação de um material. Este método muitas vezes é usado para engenharia reversa, pois normalmente a curva TGA é característica de um dado tipo de material estando algumas alterações observadas relacionadas com a estrutura molecular do composto. Existem equipamentos TGA que são combinados com o FTIR (*Fourier-Transform infrared spectroscopy*) e têm a capacidade de fazer uma análise detalhada dos gases que são libertados que advêm da amostra. No método de TGA, a combinação dos gases de arrasto são importantes isto porque cada um deles tem uma função específica. Os gases usados são nitrogénio, que é um gás inerte e que visa o estudo da decomposição térmica ou oxigénio/ar, que visa o estudo da oxidação do material. A combinação dos dois é muitas vezes usada [45] e [46].

2.7.2 SEM (Scanning electron microscopy)

O SEM, que em português significa microscopia eletrónica de varrimento, permite analisar com grande detalhe qualquer tipo de material. O mecanismo assenta numa interação de eletrões incidentes com a matéria (ver Figura 2-27) e permite obter imagens numa gama de ampliação extremamente elevada, quando comparado com a microscopia ótica de reflexão (ver Tabela 2-4). Estes métodos que foram utilizados no decorrer deste projeto. Geralmente associado a esta técnica está também a espectroscopia dispersiva de raios-X (EDS) que permite uma análise semi-quantitativa dos elementos químicos na superfície dos materiais.

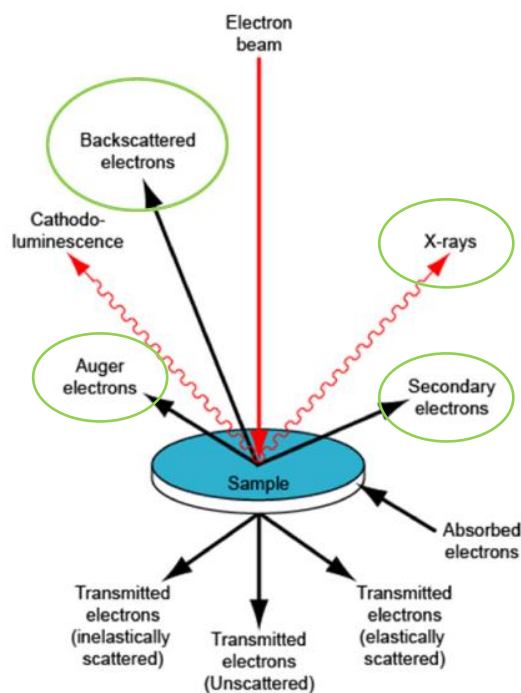


Figura 2-27 – Esquema de um feixe de eletrões a ser projetado numa amostra. [47].

Só uma parte de um feixe de eletrões emitida é que é analisada pelo método SEM (Eletrões retrodifundidos (criam contraste entre os diferentes átomos)), eletrões secundários (permitem ver a topografia da amostra) eletrões de Auger (permite ver os elementos atômicos existentes assim como os raios-x). Os outros tipos de radiação podem ser estudados a partir de outras técnicas

Tabela 2-4 – Comparações de ampliação e resolução por diferentes métodos [47].

Método	Resolução	Ampliação (x)
Olho humano	[0,1;0,2] mm	-
Microscopia ótica	[0,1;0,2] μm	~1200
Microscopia Eletrónica	[30-50] Å	[10;75000]
Microscopia com sensor	< 1 Å	> 500000

2.7.3 DSC (Differential Scanning Calorimetry)

Este método consiste em medir a quantidade de energia necessária para estabelecer o equilíbrio térmico entre uma amostra e um material inerte de referência permitindo desta forma dar informações de diferentes propriedades térmicas como a temperatura de transição vítrea (comumente conhecida como T_g), detetável através da variação capacidade calorífica do material, temperatura de fusão (T_m) e ainda temperatura de degradação do material [48].

No âmbito do trabalho desenvolvido, os materiais de interesse para esta medição são os termoplástico e também os termoendurecíveis. Contudo, não se retira a mesma informação sobre ambos. Na Tabela 2-5 pode-se observar quais os parâmetros é que se podem obter de cada tipo de plástico.

Tabela 2-5 – Propriedades retiradas de um ensaio de DSC (adaptada de [46])

	<i>Termoplástico</i>	<i>Termoendurecível</i>
Temperatura de transição vítrea (T_g)	√	√
Glass Transitions Size (ΔC_p)	√	x
Temperatura de fusão (T_m)	√	x
Temperatura de cristalização (T_c)	√	x
Cristalinidade (J/G)	√	x
Capacidade calorífica (J/g°C)	√	x
Estabilidade oxidativa (tempo ou temperatura)	√	x
Temperatura de processamento (°C)	√	x
Grau de cura (%)	x	√
Transições polimórficas	x	x
Desnaturação/gelatinização	x	x

Os resultados do DSC são calculados pela seguinte equação:

$$\Delta Q = \frac{\Delta T}{R_r} + \Delta T_0 \left(\frac{1}{R_s} - \frac{1}{R_r} \right) + (C_r - C_s) \frac{dT_s}{dt} - C_s \frac{d\Delta T}{dt}$$

$$\Delta Q = Q_{sample} - Q_{Reference}$$

$$\frac{\Delta T}{R_r} = \text{Termo correspondente ao princípio de fluxo de calor}$$

$$\Delta T_0 \left(\frac{1}{R_s} - \frac{1}{R_r} \right) = \text{Termo correspondente ao desequilíbrio no sensor da resistência}$$

$$(C_r - C_s) \frac{dT_s}{dt} = \text{Termo correspondente ao desequilíbrio no sensor da capacitância}$$

$$C_s \frac{d\Delta T}{dt} = \text{Termo correspondente ao desequilíbrio da taxa de aquecimento durante a transição.}$$

Na Figura 2-28 está representado uma curva de DSC onde se vê alguns picos característicos de uma análise.

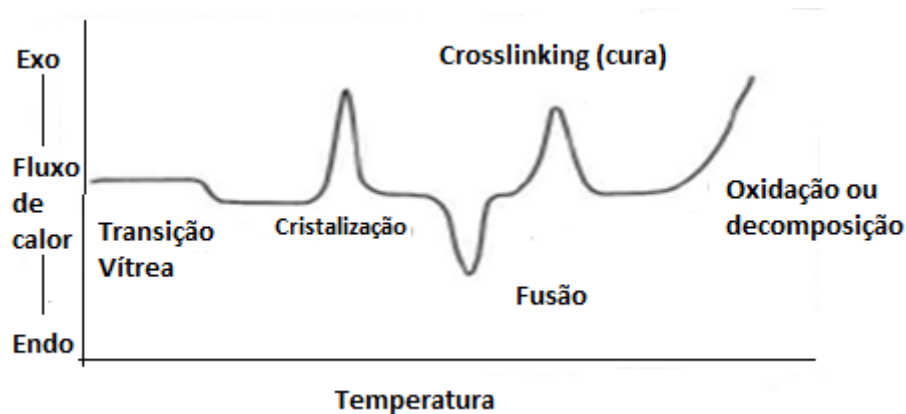


Figura 2-28 – Transições passíveis de ser observadas em DSC (adaptado de [46])

Os resultados são afetados principalmente por dois fatores: velocidade de aquecimento e massa de amostra.

DESENVOLVIMENTO

3 Desenvolvimento

Neste capítulo irá ser demonstrado o processo e a metodologia base adotada para as tomadas de decisão no decorrer da criação do material para o presente estudo. Na Figura 3-1 podemos ver a representação esquemática dos constituintes na formulação do material compósito.

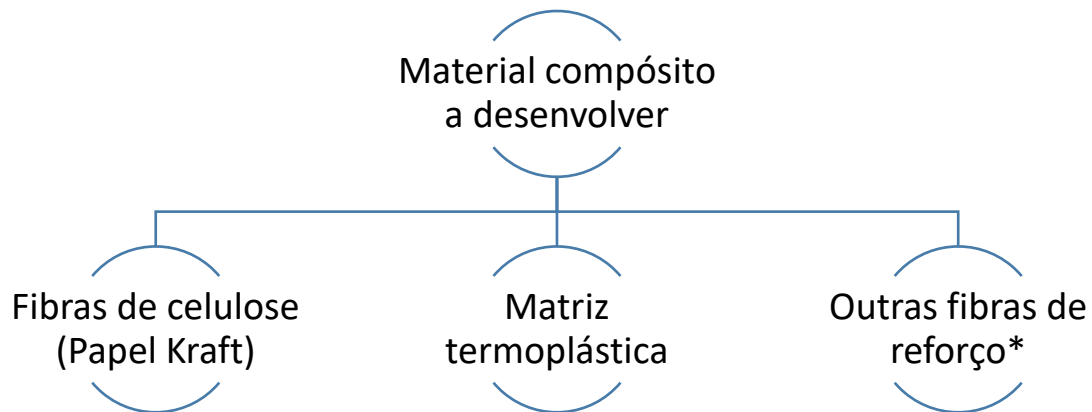


Figura 3-1- Árvore de produto a desenvolver

*Material opcional consoante a aplicação.

Este trabalho vai-se focar exclusivamente no papel kraft e na matriz termoplástica.

3.1 Seleção das matérias primas

3.1.1 Seleção das fibras celulósicas - Papel Kraft

Neste subcapítulo irão ser abordados as propriedades de interesse para seleção do papel kraft. Para cada uma delas são apresentadas as devidas considerações:

1. Gramagem de fibra compreendida entre 70 a 220 g/m²

A razão de se procurar um papel kraft com gramagens controladas prende-se com duas razões, que irão ser abordadas de seguida, onde cada uma dela justifica o limite superior de 220 g/m² e a outra justifica o limite inferior de 70g/m².

Os fabricantes de HPL usam krafts com uma gramagem entre 80 a 300 g/m². Estes são valores típicos para papel kraft impregnado com resinas termoendurecíveis, pelo que não se deve optar por altas gramagens quando se vai misturar com polímeros termoplásticos. A razão de se querer baixar a gramagem pode-se explicar com recurso à lei de Darcy (ver Equação 4 e Equação 5). Como se pode observar na Equação 5, quanto maior for D_p (espessura a impregnar) maior será o tempo de impregnação. Para melhor compreensão dos parâmetros está um esquema na Figura 3-2) é diminuir o tempo de impregnação necessário. Por isso quanto mais baixo for a gramagem melhor, contudo, delimitou-se a uma gramagem mínima de 70 g/m² pelo facto da forma em que a formação de cargas ocorre. Tendo a experiência de trabalhar com papeis com gramagem abaixo de 70 g/m² o manuseio destas torna-se complicado pois torna-se fácil estas sofrerem rutura e também pela quantidade de tempo que seria necessário para montar compactos de elevada espessura.

$$u_p = \frac{dx}{dt} = \frac{K}{\eta} \frac{dP}{dx}$$

Equação 4

$$t_{imp} = \frac{\eta D_p^2}{2KP}$$

Equação 5

Onde,

u_p = Velocidade de escoamento do polímero

K = Permeabilidade da fibra

η = Viscosidade do polímero

P = Pressão aplicada

t_{imp} = Tempo de impregnação

D_p = Espessura total do conjunto de fibras

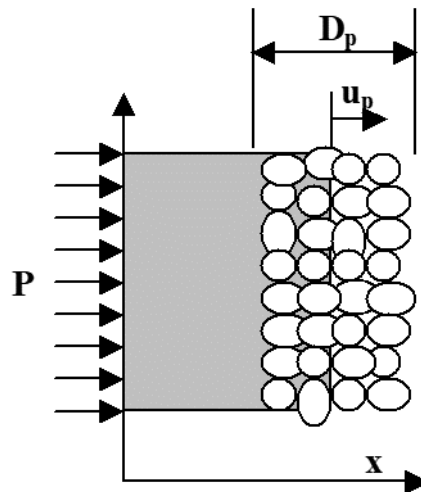


Figura 3-2 – Esquemática dos parâmetros que influenciam a impregnação de fibras através da equação de Darcy [49] e [50].

2. Porosidade/permeabilidade

O papel kraft quer-se com alta porosidade/permeabilidade. Quanto maior for o número de vazios, mais facilitada será a passagem do polímero como está explícito pela Equação 5 quanto maior for o valor de K, menor será o tempo de impregnação. Não se conseguiu encontrar valores de referência para esta propriedade por isso será importante fazer por comparação entre um conjunto de papéis. Por isso realizou-se os ensaios de porosidade de acordo com o método de *Gurley*.

3. Resistência Mecânica

A fibra de celulose vai ser usada maioritariamente para suportar esforços de flexão, pelo que se pretende que o papel a escolher tenha boas propriedades mecânicas tendo sido realizados ensaios de tração a cada papel isoladamente, para ajudar na tomada de decisão.

4. Deformação/alongamento

Tendo em conta o objetivo do material, que será para termoformar, as fibras terão que ter uma elevada capacidade de deformação/alongamento, valor esse que se terá atenção nos ensaios de tração.

5. Temperatura de degradação

De modo a garantir que as temperaturas de processamento, que irão ser alteradas de modo a ir encontro as necessidades de processamento dos polímeros. Para não degradar o papel kraft é necessário confirmar a partir de que temperatura é que começa a existir perda de massa do referido papel. Para isso foi feita uma análise termogravimétrica (TGA) a todos os papéis selecionados.

6. Massa volúmica

O objetivo é ter um material composto leve, por isso esta propriedade é crítica para estes estudos. Não foram impostos limites de massa volúmica, apenas se irá fazer uma análise comparativa entre os diferentes papéis selecionados.

Tendo em conta os requisitos enunciados neste capítulo foram selecionados um conjunto de papéis krafts aos quais se fizeram os testes devidos para ir de encontro aos requisitos. Foram selecionados 8 papéis diferentes de 5 fornecedores diferentes de acordo com o esquema da Figura 3-3. A título de exemplo apresenta-se na Figura 3-4 alguns dos possíveis papéis (por motivos de confidencialidade não irão ser mostrados todos nem serão associados os fornecedores à codificação dada através da Figura 3-3).

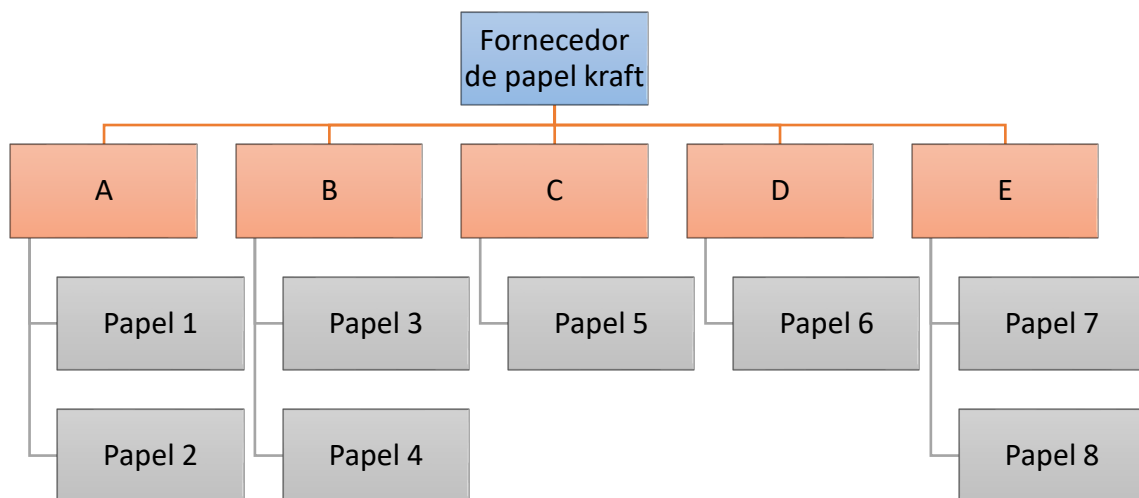


Figura 3-3 – Esquematização dos papéis krafts testados

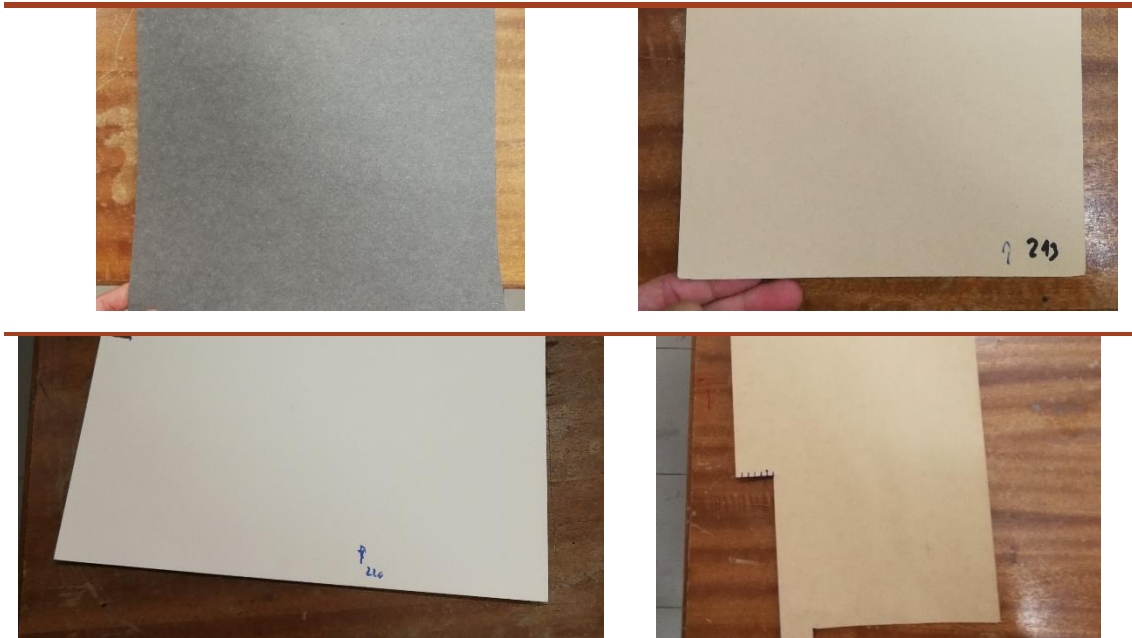


Figura 3-4 - Exemplos de papeis kraft testados

3.1.1.1 Análise termogravimétrica (TGA)

Este ensaio foi realizado ao papel kraft com o intuito de verificar as temperaturas de degradação do kraft, de forma a garantir que não haja perda de propriedades aquando do processamento do material. Os resultados encontram-se na Figura 3-5. Nem todos os papeis foram analisados devido às suas constituições bastante idênticas, sendo os selecionados para este ensaio os mais distintos entre si. O ensaio foi realizado com uma rampa de aquecimento de 10 (°C/min) até uma temperatura máxima de 500°C e foram usados como gás de arrasto o nitrogénio e oxigénio num caudal de 50 cm³/min. O equipamento utilizado foi o *Netzsch STA 449 F3*.

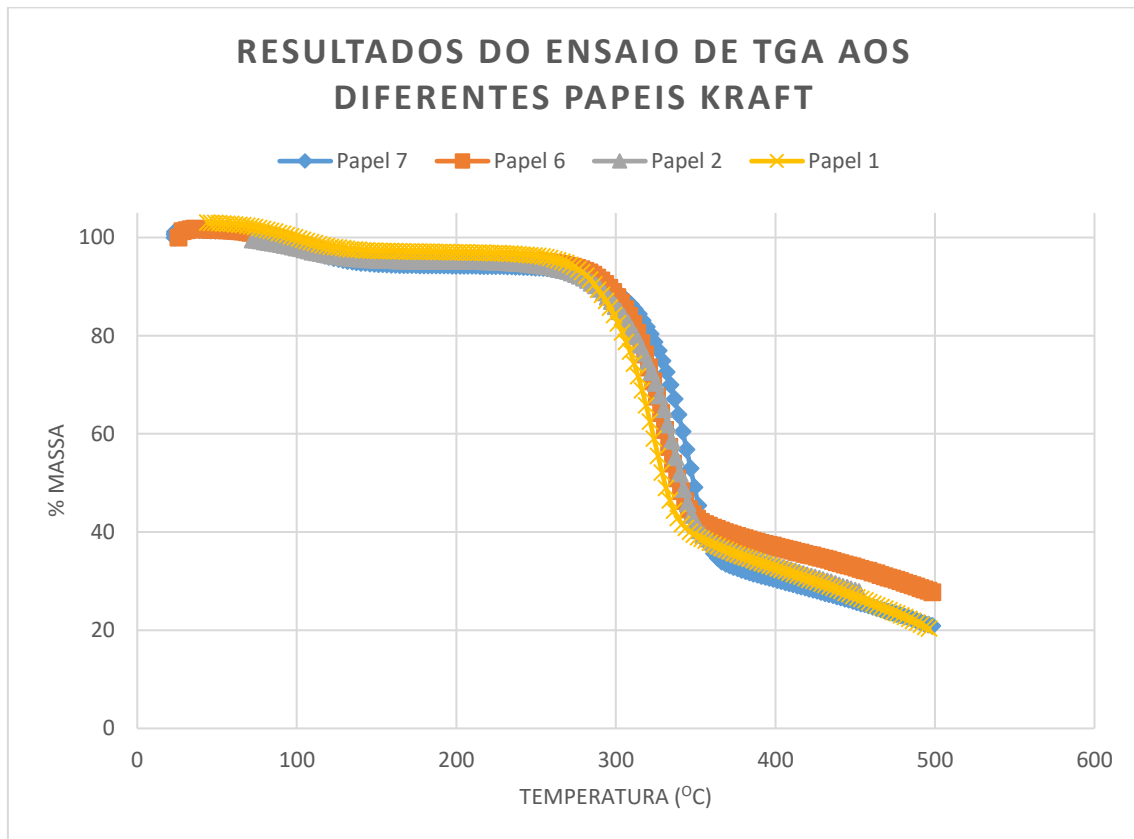


Figura 3-5 – Resultados dos ensaios de TGA aos diferentes tipos de papel kraft

Como se pode observar através da Figura 3-5, a degradação de todos os papeis testados, começam à volta dos 250°C. Tendo em conta que a temperatura máxima de processamento atingida pelo processo atual da SIR é à volta de 175°C, a limitação não está na matéria-prima.

Entre papeis, não se observou uma variação significativa de comportamento com o aumento de temperatura, evidenciando as semelhanças entre si, e por esse motivo, com objetivo de poupar tempo e recursos, não foram testados os 8 papéis selecionados, pois são todos à base do mesmo material (celulose).

3.1.1.2 Determinação da massa volúmica dos diferentes papéis

Tendo por base que o reforço é constituído por materiais idênticos, antecipa-se uma pequena variação desta propriedade. Ainda assim foram feitas medições no sentido de comprovar esta afirmação. As medições recorreram apenas a três instrumentos simples: um cortante de área bem definida; uma balança e um micrómetro. Os resultados podem ser consultados na Tabela 3-1.

Tabela 3-1 - Massa volúmica dos diferentes papéis kraft

Papel	Gramagem (g/m ²)	Massa Volúmica (kg/m ³) (Medição laboratorial)	Massa volúmica (kg/m ³) (Dados fornecedor)
1	70	749	-
2	200	711	-
3	90	588	550
4	160	676	600
5	170	552	-
6	220	693	700
7	185	592	600
8	213	618	640± 25

Os resultados obtidos mostram aquilo que se esperava: as massas volúmicas são todas próximas entre si, tendo uma variação máxima de 15% entre papéis. Os resultados também mostram que os valores vão de encontro ao que se encontra na ficha técnica dos produtos emitida pelos fornecedores. A nível de valor absoluto, valores a rondar os

600 kg/m³, são bastante inferiores aos valores das massas volúmicas das fibras de vidro ou mesmo carbono.

3.1.1.3 Determinação da porosidade dos diferentes papéis

Um material poroso é definido como qualquer sólido que contenha espaços vazios [51]. A porosidade é definida como a quantidade de poros existente numa superfície e normalmente é apresentada na forma de uma percentagem [52]. Para este projeto foi adaptado o método de *Gurley*, que se encontra descrito na ISO 5636-5:2013 “*Paper and board – Determination of air permeance (medium range) – Part 5: Gurley Method*” [53]. Este método quantifica o tempo necessário para passar 100 cm³ de ar no papel, numa determinada área com uma determinada pressão (peso do cilindro teste). Um equipamento idêntico ao que foi usado pode ser encontrado na Figura 3-6 [54] e [55]. Os resultados podem ser consultados na Figura 3-7.



Figura 3-6 – Densímetro de tipo *Gurley* manual [56]

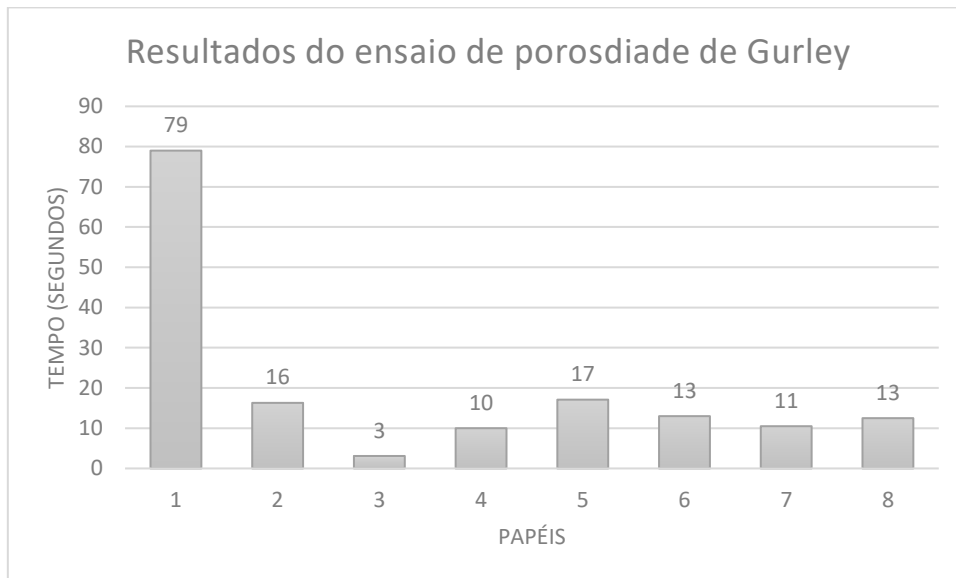


Figura 3-7 - Resultados da determinação da porosidade pelo teste de *Gurley* para os diferentes papéis

Os resultados da porosidade pelo método de *Gurley* mostram uma grande variabilidade entre os papéis testados, alguns são 25x menos porosos que outros papéis. Quanto maior for o tempo registado neste ensaio menor será o valor de “K” (permeabilidade) na equação de Darcy prevendo-se assim que a impregnação com as matrizes termoplásticas vão ter um tempo de processamento maior, fator esse que é indesejado. O papel 3 foi o que apresentou melhores resultados e o papel 1 foi aquele que teve os piores resultados sendo desde já eliminado na bateria de testes a realizar posteriormente.

3.1.1.4 Determinação da resistência à tração

O ensaio de tração é um dos testes mais importantes para seleção das fibras mais adequadas. Na Tabela 3-2 estão os resultados do ensaio de tração para os diferentes papéis. De realçar que os resultados são apresentados de duas maneiras. Uma é a leitura direta do ensaio, ou seja, calculada diretamente com base na força dividida pela área resistente (Equação 6). Outro modo de analisar é eliminar o fator gramagem, que varia

consideravelmente entre papéis e por isso calculou-se também a tensão através da Equação 7. O ensaio foi realizado a uma velocidade de 5mm/min com uma distância entre amarras de 50mm. Os provetes foram cortados na medida 150mmx50mm em diferentes direções (0° e 90°).

Nesta fase, o papel 1 tinha sido excluído pela sua baixa porosidade (ver capítulo anterior) e papel 2 foi também excluído destes ensaios por motivos económicos. O fornecedor quando cedeu a amostra não deu cotação ao mesmo e decidiu-se começar a ensaia-lo sem ter essa informação, após enviarem essa informação, foi tomada a decisão de abandonar o seu desenvolvimento e por isso é que já não apresenta valores na Tabela 3-2.

$$\text{Tensão } \left(\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right) = \frac{\text{Força (N)}}{\text{Largura (mm)} * \text{espssura (mm)}} \quad \text{Equação 6}$$

$$\text{Tensão } \left(\frac{\text{N*m}}{\text{g}} \right) = \frac{\text{Força (N)}}{\text{Largura (m)} * \text{gramagem } \left(\frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right)} \quad \text{Equação 7}$$

Tabela 3-2 – Ensaio de tração as fibras celulósicas

Papel	Ensaio de tração Longitudinal Transversal (N/mm ²)	Desvio padrão Longitudinal Transversal (N/mm ²)	Ensaio de tração Longitudinal Transversal (N*m/(g))	Desvio padrão Longitudinal Transversal ((N*m)/g)
1	Excluído			
2	Excluído			
3	50,0 25,0	4,7 1,8	86,6 44,1	8,1 3,4
4	60,2 24,3	3,3 1,7	93,0 38,1	2,3 2,1
5	22,0 8,6	1,8 0,9	40,9 16,7	3,3 2,2
6	16,6 11,1	1,4 0,6	25,2 17,0	2,2 0,5
7	29,0 16,8	1,8 0,7	50,2 29,8	1,5 1,2
8	25,1 13,3	0,9 0,7	39,8 21,2	1,1 1,0

Olhando para os resultados da Tabela 3-2 verifica-se que os papeis 3 e 4 se distinguem dos demais pela positiva. No lado oposto vem o papel 6, que foi o que apresentou piores resultados. O papel 6 é o único papel entre os testados que sofreu um tratamento de branqueamento, que consiste em retirar a celulose das fibras, passando o papel de tom acastanhado para um papel branco. Talvez a ausência deste composto faça com que as suas propriedades mecânicas baixem significativamente. Para comprovar esta hipótese, no capítulo 3.2.1 é descrito um ensaio que visa estudar este efeito.

Tendo em atenção todos os testes realizados a matéria prima que apresenta melhores resultados é o papel 4 seguidamente pelo papel 3 e 7, de acordo com os testes efetuados.

Por motivos económicos, o papel que seguiu com a continuação dos testes, foi o papel 8, que é um papel com características razoáveis e aquele que atualmente é usado no processo da SIR.

3.1.2 Seleção das possíveis matriz poliméricas

Após ter-se escolhido qual seria o melhor reforço celulósico a usar, passou-se à fase seguinte que consiste na escolha da matriz polimérica. Para a seleção das matrizes poliméricas teve-se em conta os seguintes aspetos:

- 1. Matriz polimérica termoplástica com temperatura de transição vítrea (t_g) menor ou igual a 150°C e/ou temperatura de fusão (t_m) obrigatoriamente $\leq 175^\circ\text{C}$.**

Este valor (175°C) é limitado pela capacidade produtiva ou seja, em momento algum se vai conseguir atingir nos laminados/compactos temperaturas iguais ou superiores a 175°C sendo esta temperatura um fator limitativo a nível de seleção de matrizes termoplásticas. Os 150°C de limite máximo para o valor da temperatura de transição vítrea prende-se acima de tudo com o fator tempo. Qualquer polímero com uma t_g acima deste valor iria tornar o processamento do mesmo bastante complicado devido ao tempo necessário para este fluir através das fibras, visto que a janela de temperatura de trabalho iria ser bastante reduzida. Fez-se uma pesquisa bibliográfica para selecionar um espectro de possíveis polímeros a serem escolhidos para o desenvolvimento deste material. Assim, chegou-se ao seguinte conjunto de dados expostos na Figura 3-8.

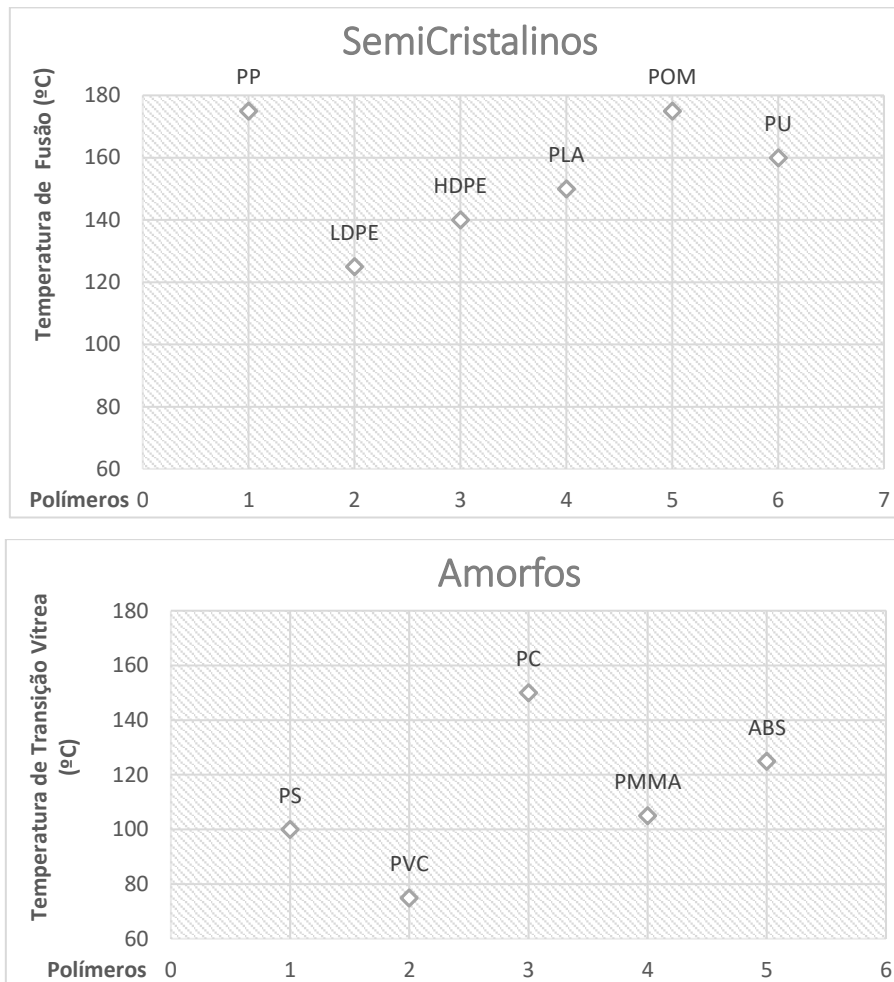


Figura 3-8 – Temperaturas de fusão para polímeros semicristalinos e temperatura de transição vítrea para polímeros amorfos (valores adquiridos a partir de [7], [26], [57] e [58])

A Figura 3-8 mostra as t_g e as t_m de polímeros termoplásticos, uns semicristalinos, outros amorfos. De modo a fazer alguns testes iniciais, apenas se selecionaram 3 matrizes, um polímero amorfo e dois polímeros semicristalinos que foram: Polimetilmetacrilato (PMMA), ácido polilático (PLA) e uma poliolefina, do tipo Polietileno de alta densidade (HDPE) (Figura 3-9).



Figura 3-9 – Filme de PMMA, Polietileno e de PLA usado para ensaios

2. Verificação de adesão das fibras às matrizes selecionadas

Este estudo de compatibilização é verificado com a realização de prensagens e verificação da sua capacidade de impregnação. Pode ser utilizado por várias técnicas, os métodos não destrutivos como o SEM (*Scanning Electron Microscope*) e microscopia ótica foram duas técnicas selecionadas. Também podiam ser verificados com base nas suas propriedades mecânicas, realizando alguns ensaios de tração e comparando com os valores teóricos obtidos por aplicação das leis da micromecânica; como a lei das misturas.

3. Propriedades mecânicas

Para verificar a resistência mecânica decidiu-se realizar ensaios de tração aos polímeros selecionados para auferir comparativamente quais destes é que teriam melhores propriedades. Estes valores também são necessários para realizar a verificação teórica.

Nos seguintes subcapítulos irão ser apresentados os testes efetuados de ajuda a tomada de decisão da escolha do polímero.

3.1.2.1 *Compatibilização dos polímeros com as fibras orgânicas e com o processo*

Neste subcapítulo vão ser mostradas algumas das imagens obtidas por microscopia ótica e por SEM. Com o intuito de verificar se existia algum problema de impregnação por parte do polímero nas fibras, foram prensadas umas amostras com o papel selecionado anteriormente (papel 8) com as diferentes matrizes escolhidas (PE, PMMA e PLA). Começando pelos ensaios de microscopia ótica, as imagens obtidas na secção transversal dos materiais compósitos nem sempre foram de fácil leitura, sobretudo quando as imagens obtidas exibiram má qualidade. Começou-se por verificar o material atualmente em uso, mas com resina fenólica, que é usada habitualmente e servirá como referência. É isso que se pode observar na Figura 3-10, onde é possível verificar nitidamente o envolvimento das fibras pela resina fenólica. Na Figura 3-11, onde se tem o mesmo papel kraft, mas agora com uma matriz termoplástica (PMMA), tem-se duas imagens distintas apesar de serem ambas o mesmo compósito. Nessa imagem é possível observar a influência notória dos parâmetros de prensagem, razão pela qual este vai ser um parâmetro de estudo mais a frente.

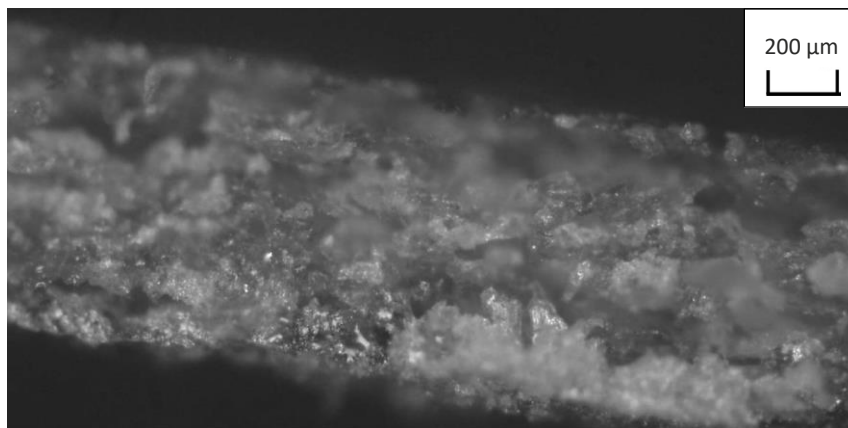


Figura 3-10 – Compósito com o papel 8 e impregnado com a resina fenólica com os seguintes parâmetros de prensagem: 140°C durante 12 min com uma pressão de 20 bar.

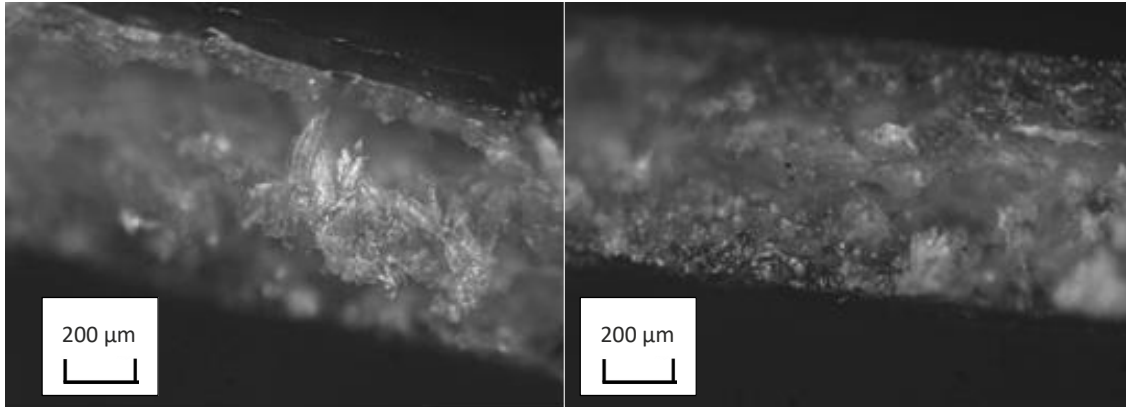


Figura 3-11 – Na imagem à esquerda, a amostra do papel 8 com PMMA, prensado com os parâmetros do Ciclo 1 e à direita com o ciclo 2 (parâmetros presentes na Tabela 3-7)

Na Figura 3-11, na imagem da esquerda, podia-se afirmar que a impregnação do polímero com as fibras é fraca devido à pouca envoltória que existe à volta das fibras mas mudando os parâmetros de prensagem atinge-se o patamar de impregnação que se pode ver na imagem à direita onde o aspeto é completamente diferente, sendo já bastante idêntico ao compósito fenólico. Deste modo é assegurada a boa impregnação do mesmo.

Para o HDPE o procedimento foi o mesmo, só que se recorreu à tecnologia SEM. Assim sendo, foi realizado primariamente um SEM no compósito fenólico que se encontra na Figura 3-12. Na Figura 3-13 vê-se o material compósito impregnado com a matriz PE em duas temperaturas diferentes.

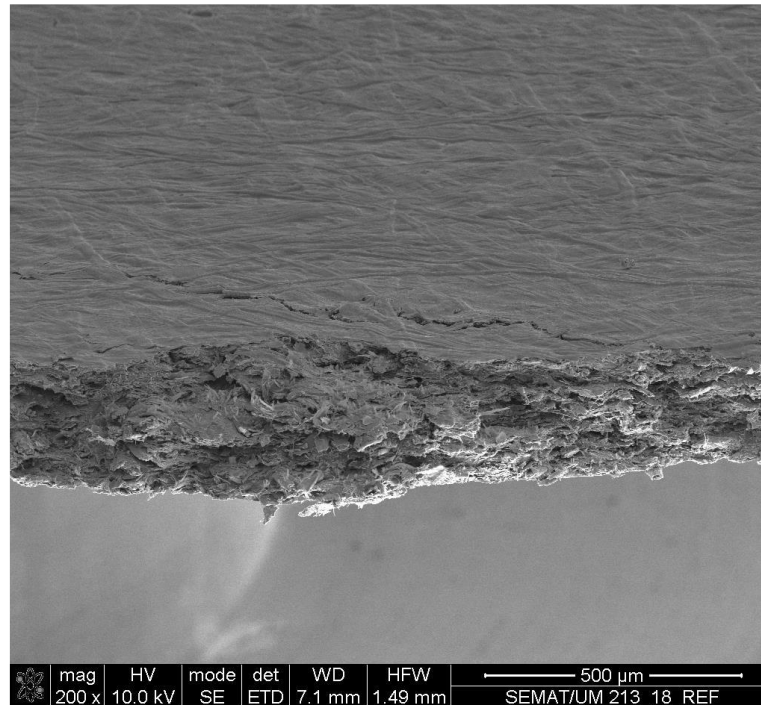


Figura 3-12- Imagem do SEM ao compósito fenólico, com o papel 8, prensado a 140°C e 80bar de pressão específica.

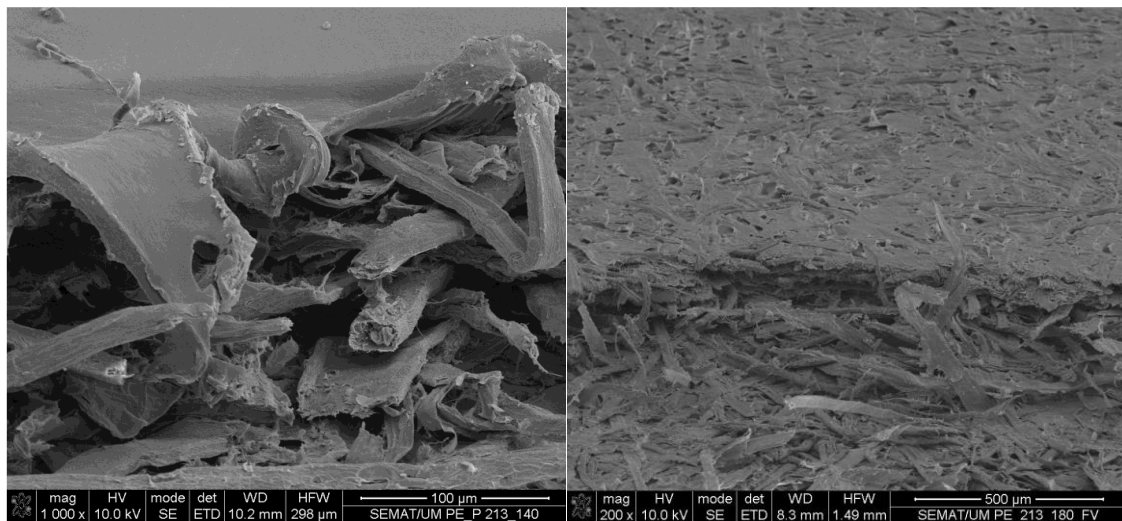


Figura 3-13 – À esquerda imagem SEM de PE com o papel 8, prensado a 140°C e a 40bar, enquanto na imagem à direita são exatamente os mesmos materiais, com a diferença que o parâmetro de temperatura foi modificado de 140 para 180°C.

Na Figura 3-12 vê-se uma boa impregnação das fibras celulósicas. Na Figura 3-13 acontece exatamente o mesmo que aconteceu nos resultados obtidos na Figura 3-11, à esquerda bastantes fibras não impregnadas, enquanto que na imagem à direita, quando prensado a uma temperatura superior, este já ficou idêntico ao aspeto apresentado pela Figura 3-12. (Numa etapa posterior de ensaios, onde o polímero levou uma ligeira alteração de gramagem para corresponder à percentagem mássica ponderal típica de 70-30% (70 para fibras 30 para o polímero) aconteceu que a gramagem acordada resultou em valores de 68% fibras 32 % polímero e revelou-se excessiva, levando a problemas de processamento como se pode ver na Figura 3-14. O problema é de fácil resolução, basta pedir ao fornecedor que baixe a gramagem do mesmo e o problema fica solucionado.) Por este problema, a caracterização do compósito no capítulo 3.2 Matriz polimérica reforçada com fibras celulósicas não foi utilizado o polímero PE.



Figura 3-14 – Problemas de rasgamento aquando do processamento do compósito com o PE e o papel kraft número 8.

No que diz respeito ao PLA, este apresentou um grande entrave ao seu processamento. Apesar de ter sido capaz de impregnar as fibras do kraft, com os parâmetros de prensagens de 150°C e 40bar, este quando foi processado a 160°C e 80bar de pressão específica aconteceu o que está na Figura 3-15.



Figura 3-15 – Problemas no processamento do compacto de kraft e PLA após saída da prensa

O PLA é um bio polímero relativamente recente cujas as potencialidades ainda estão em estudo. Neste caso em específico, quando submetido a altas temperaturas e pressões, de algum modo alterou as suas propriedades que fez revelar a sua origem que muitas das vezes é feito com base em fontes renováveis que contêm amido/açúcar, o que parece justificar o aparecimento de material, na zona de fratura do compacto, que tinha o cheiro e o aspeto característico de caramelo [59]. Por este motivo, não se optou por avançar com estes testes para o material compósito. Contudo, a temperaturas e pressões mais baixas foi possível verificar a sua compatibilidade, ficando pendente de uma avaliação relativamente às suas propriedades.

No fim da verificação deste ponto, apenas a matriz de PMMA surgiu como uma alternativa possível.

3.1.2.2 Ensaio de Tração

O ensaio de tração foi realizado com base na ASTM D 882-18 “*Standard Test Method for tensile Properties of thin plastic sheeting*” em que o método escolhido foi o método A.

Propriedades como o módulo de elasticidade, resistência à tração do filme e a TEB (*Tensile Energy to Break*) podem ser determinadas através deste ensaio [60]. O ensaio foi realizado exclusivamente ao polímero PMMA, visto que foi este o escolhido para prosseguir a bateria de testes, de acordo com as razões evidenciadas nos capítulos anteriores.

Os provetes tinham as dimensões de 150mm por 50mm e foram cortados com o auxílio de um x-acto. O ensaio foi realizado a duas velocidades, uma de acordo com a norma (a uma velocidade de 5 mm/min) e outro a uma velocidade de 25 mm/min com o intuito de compreender entre que valores é que variavam para possíveis comparações com valores encontrados na bibliografia, nomeadamente com o valor fornecido na ficha técnica do produto, que foi realizado com base na norma ISO 527-3 “*Plastics-Determination of tensile properties – Part 3: test conditions for films and sheets*” [61].

Tabela 3-3 – Resultados do ensaio de tração ao polímero PMMA

	Max Tensão (N/mm²)	Desvio padrão (N/mm²)	Deformação na força máxima (%)	Breaking factor (N/mm)
PMMA (25mm/min)	37,0	3,3	5,5	3,4
PMMA (5mm/min)	26,4	2,8	5,5	2,3
PMMA (dados fornecedor)	47	-	6	-
Valores bibliografia para o PMMA [62]	[38;70]	-	-	-

Começando por esclarecer alguns termos presentes na Tabela 3-3. O *breaking factor* é um termo contemplado na norma ASTM D882 e só é calculado quando o filme apresenta uma espessura inferior a 0,13 mm (que é o caso em estudo). Este termo é calculado através da divisão entre a força máxima registada no ensaio e a largura do provete, desprezando assim a espessura do material. Quanto ao valor de resistência máxima de tração, os resultados ficaram ligeiramente abaixo da ficha técnica e dos valores encontrados na bibliografia. Este valor é bastante influenciado pela velocidade de ensaio como se comprova pela diferença de tensão máxima obtido a 25mm/min ou a 5mm/min. A norma ISO 527-3 aceita um conjunto de velocidades que vão dos 5mm/min

aos 500mm/min pelo que a velocidade de ensaio usada para a ficha técnica da matéria prima talvez tenha sido ligeiramente superior à ensaiada.

A deformação na força máxima foi calculada com base no deslocamento do provete para a força máxima. Este valor é característico de cada material e os ensaios comprovam exatamente isso, quer os valores obtidos experimentalmente quer os valores que se encontram na ficha técnica coincidem que é os 6%.

3.2 Matriz polimérica reforçada com fibras celulósicas

Neste capítulo irão ser abordadas a influência de algumas variáveis no compósito constituído por papel kraft e a matriz polimérica. Para os estudos descritos nestes capítulos foram usados apenas os papéis kraft 7 e 8 e o polímero PMMA.

3.2.1 Estudo do branqueamento do papel kraft (estudo da influência da lignina)

Por razões estéticas, o papel kraft, que normalmente é acastanhado, sofre um processo de pigmentação, contudo, quando se quer o papel branco, o processo não é pigmentação mas sim um processo de branqueamento através de processos químicos que permitem retirar a lignina do papel [63]. É a influência desde composto nas propriedades mecânicas que se quer estudar. Assim, comparou-se o papel 6 (sem lignina) e 8 (com lignina) ambos impregnados com PMMA e com o mesmos parâmetros de prensagem. O ensaio foi realizado a uma velocidade 2mm/min com provetes cortados em 150mm x 20mm. Os resultados encontram-se na Figura 3-5.

Tabela 3-4 – Resultados dos ensaios de tração ao compósito de kraft, branqueado e não branqueado com a matriz PMMA

	Resistência à tração (N*m/g)	Melhoria
<i>Papel sem lignina+ PMMA</i>	54,4	-
<i>Papel com lignina + PMMA</i>	78,5	44%

Os resultados do ensaio de tração, onde ambos os provetes foram cortados na direção longitudinal, revelam que há uma influência notável por parte do composto de lignina. Estes ensaios vieram comprovar a teoria que o tratamento de branqueamento enfraquecia as fibras, visto que a lignina é dos compostos mais resistentes. Exemplo disso é que a resina natural fenólica é feita com base neste composto [36]. A justificação podia ser com base na tensão superficial do papel que poderia ter sido alterada após este tratamento, mas o papel foi tracionado seco cujos os valores se encontram na Tabela 3-2, e assim descarta a hipótese de ser uma fraca compatibilidade com o polímero visto que nesses ensaios já obtinha um valor inferior quando comparado ao kraft com lignina. Contudo, o ligante usado podia ser um pouco diferente, mas se esse fosse o caso, quando impregnado não se devia de verificar alterações significativas, algo que aconteceu, 44% de melhoria na capacidade de resistência à tração é bastante significativo. Em suma, é preciso ter em conta que os efeitos estéticos de ter um papel branqueado, prejudica nas suas propriedades mecânicas.

3.2.2 *Estudo da influência do conteúdo da fração mássica do polímero no compósito*

Para o estudo da influência da fração mássica do polímero no compósito, recorreu-se ao ensaio de flexão, com base na norma ISO 14125 “*Fibre-Reinforced plastic composites – Determination of Flexural properties*” [64]. Pretendeu-se perceber em que sentido variava as propriedades mecânicas do compósito, com a variação da fração mássica do polímero no compósito. Assim, procedeu-se ao fabrico de dois laminados compósitos, com os mesmos parâmetros de prensagem, em que se variou o seu *build up*. Num dos casos optou-se por colocar 2 folhas de PMMA por cada folha de papel kraft; no outro compósito, optou-se por colocar alternadamente uma folha de PMMA e uma folha de papel kraft. As respetivas massas ponderais podem ser consultadas na Tabela 3-5 assim como a espessura final dos mesmos. Na Tabela 3-6 encontram-se os resultados obtidos. Os resultados foram trabalhados de acordo com o exposto no Anexo 2 - Exemplo de cálculo dos ensaios de flexão (com base na norma ISO 14125).

Tabela 3-5 – Percentagens mássicas de fibras e polímero, em cada um dos compósitos produzidos.

Build up	Espessura (mm)	W_{fibras} (%)	$W_{polímero}$ (%)
5 * papel 8 + 10* PMMA	1,95	54,4	45,6
6 * papel 8 + 8 *PMMA	1,94	64,1	35,9

Tabela 3-6 – Resultados do ensaio de flexão para o estudo da influência da fração mássica do polímero

Build up	Flexural stress – Longitudinal (MPa)	Flexural stress – Transversal (MPa)	Flexural modulus of elasticity - Longitudinal (MPa)	Flexural modulus of elasticity - Transversal (MPa)
5 * papel 8 + 10* PMMA	46,40	34,26	2729,27	2079,22
6 * papel 8 + 8 *PMMA	48,60	41,22	2811,58	2226,42

Os resultados presentes na Tabela 3-6 demonstram que a maior quantidade de polímero não trouxe, como seria de esperar, nenhuma vantagem no quesito das propriedades mecânicas. Na resistência à flexão, o módulo, quer seja longitudinal ou transversal, com maior percentagem mássica de fibras tem melhores resultados. Do ponto de vista económico também é melhor o *build up* com maior percentagem mássica de fibra. De acordo com os valores obtidos, a fração mássica mais correta para este tipo de papel e matriz é W_f à volta de 65% (e um W_p de 35%) e é este que será usado nos restantes ensaios.

3.2.3 Estudo do processamento por moldação a quente

Com o intuito de perceber a influência dos parâmetros de processamento nas propriedades mecânicas do compósito foram realizados dois ensaios mecânicos, um ensaio de tração, com base na ASTM D882 e um ensaio de flexão, com base na ISO 14125.

3.2.3.1 Ensaio de tração

Para este ensaio foram produzidos dois compósitos com um empilhamento constituído por um papel kraft e duas folhas de PMMA (uma em cada lado). Aplicou-se dois ciclos diferentes que podem ser consultados na Tabela 3-7 para o seu processamento e realizou-se o ensaio de tração cujos resultados se encontram na Tabela 3-8. O ensaio foi realizado a uma velocidade de 2mm/min e com provetes cortados em 150mmx20mm.

Tabela 3-7 – Parâmetros de prensagem nos diferentes ciclos aplicados na produção do material compósito

	Ciclo 1			Ciclo 2		
	Temperatura (°C)	Pressão específica (bar)	Tempo (min)	Temperatura (°C)	Pressão específica (bar)	Tempo (min)
<i>Passo 1</i>	150	1,1	10	175	1,1	10
<i>Passo 2</i>	150	19,6	10	175	19,6	15
<i>Passo 3</i>	40	1,1	40	40	1,1	50

Tabela 3-8 – Resultados do ensaio de tração para o compósito produzido através de parâmetros de processamento diferentes

Resultados ciclo 1 (N*m/g)	Resultados ciclo 2 (N*m/g)	Melhoria (%)
78,5±1,8	95,7±4,0	22

É notório que o ciclo 2 teve melhores resultados do que o ciclo 1, conforme indicam os dados da Tabela 3-8. Isso reflete que existe uma melhor impregnação das fibras por parte da matriz quando o ciclo tem temperaturas mais altas e maior duração. Esta melhoria era esperada, só não se sabia quantificar esta. Assim, a diferença foi de 22% entre ambos os ciclos. É importante não esquecer que apenas se está a estudar uma folha de kraft. Em maiores espessuras, estes 22% vão ser bastante significativos a nível de resistência mecânica.

Estes resultados também podem ser verificados pelas imagens obtidas por microscopia apresentadas no capítulo 3.1.2.1 através da Figura 3-11 onde é possível ver a camada mais espessa do lado de fora das fibras celulósicas (na imagem da esquerda) em comparação com a amostra do lado direito onde é claramente possível ver uma alta compactação do material compósito, que se refletiu na diminuição da espessura do mesmo em 12%.

3.2.3.2 Ensaio de flexão

Neste ensaio estuda-se a importância de variar o ciclo em função da espessura. Pretende-se com este ensaio demonstrar que apesar de o polímero atingir a temperatura desejada, este precisa de tempo para poder impregnar as fibras de maneira eficiente. Para isso, produziu-se 5 provetes, com uma variação de uma folha entre cada um deles (como se poder ver através da Tabela 3-9) o que resulta numa variação de quase 1,5 milímetros, sempre com o mesmo ciclo.

Tabela 3-9 - Percentagens mássicas de fibras e polímero, em cada um dos compósitos produzidos.

<i>Build up</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Espessura(mm)/nºkrafts</i>
3* papel 8 + 6*PMMA	1,13	0,38

4 * papel 8 + 8* PMMA	1,52	0,38
5 * papel 8 + 10* PMMA	1,95	0,39
6 * papel 8 + 12* PMMA	2,41	0,40
7 * papel 8 + 14* PMMA	2,95	0,42

Tabela 3-10 – Resultados obtidos no ensaio de flexão para o estudo da influência do ciclo nas propriedades mecânicas

Build up	Flexural stress – Longitudinal (MPa)	Flexural stress – Transversal (MPa)	Flexural modulus of elasticity - Longitudinal (MPa)	Flexural modulus of elasticity - Transversal (MPa)
3* papel 8 + 6*PMMA	44,06	32,08	3806,69	2545,21
4 * papel 8 + 8* PMMA	45,65	32,08	2993,92	2040,23
5 * papel 8 + 10* PMMA	46,40	34,26	2729,27	2079,22
6 * papel 8 + 12* PMMA	54,40	36,54	2684,26	1627,7

Antes de discutir os resultados é de salientar que os provetes de maior espessura foram danificados acidentalmente antes do ensaio pelo que não se encontram nos valores apresentados através da Tabela 3-10.

Os resultados da Tabela 3-10 mostram que o valor das resistências mecânicas não são significativamente alteradas consosante o aumento do número de camdadas, o que seria de esperar porque as percentagens mássicas (volúmicas) são mais ou menos constantes. Por esse motivo é que é importante olhar para os resultados do módulo à flexão. Este mostra claramente que o módulo é bastante superior em espessuras mais baixas. O valor dos módulos nas orientações longitudinal e transversal têm um

decrecimento contínuo, pelo que é seguro afirmar que consoante se aumenta a espessura do compósito, para um mesmo ciclo de prensagem, a impregnação se torna mais difícil. Deste modo, está comprovado que a aplicação do mesmo ciclo para diferentes espessuras, mesmo que estas sejam baixas, o ciclo deve ser adaptado para melhorar as propriedades mecânicas, aumentando o tempo de ciclo consoante a espessura aumente.

3.2.4 Estudo da influência da porosidade do papel nas propriedades mecânicas

Para este estudo foram usados dois papéis kraft diferentes (papel 7 e 8), em que um tem uma maior porosidade que o outro (pela ficha técnica, no método de *Gurley*, o papel 7 demora entre 8 a 13 segundos para passar 100cm³ de ar enquanto que o papel 8 demora entre 10 a 15 segundos) e foram processados 3 provetes com os mesmos parâmetros de prensagem. Inicialmente tinha-se pensado comparar apenas dois provetes com espessura idêntica (pela Tabela 3-11 era o segundo e terceiro conjunto (1,52 e 1,45 mm respetivamente) porque os parâmetros de processamento são os mesmos evitando assim uma variável, mas os provetes tinham uma diferença de fração mássica de fibras o que influencia necessariamente os resultados e daí a necessidade de introduzir um provete com frações mássicas idênticas. Contudo, à partida, este terá uma pior impregnação, pois tem maior quantidade de fibras (maior espessura) sendo o ciclo igual para todos os provetes. Contudo, é possível tirar uma ideia se a porosidade do papel facilita a impregnação e conseqüentemente aumenta as propriedades mecânicas do compósito. Na Tabela 3-11 pode-se consultar a espessura e fração mássica de fibras e polímero. Na Tabela 3-12 encontram-se os resultados deste ensaio.

Tabela 3-11 - Percentagens mássicas de fibras e polímero, em cada um dos compósitos produzidos.

<i>Build up</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>W_{fibras} (%)</i>	<i>W_{polímero} (%)</i>
6* papel 8 + 8PMMA	1,94	64,1	35,9
4 * papel 8 + 8* PMMA	1,52	54,4	45,6
5 * papel 7 + 7 *PMMA	1,45	63,9	36,1

Tabela 3-12 - Resultados do ensaio deflexão para o estudo da influência da porosidade do papel kraft

Build up	Flexural stress – Longitudinal (MPa)	Flexural stress – Transversal (MPa)	Flexural modulus of elasticity - Longitudinal (MPa)	Flexural modulus of elasticity - Transversal (MPa)
6* papel 8 + 8PMMA	48,60	41,22	2811,58	2226,42
4 * papel 8 + 8* PMMA	45,65	32,08	2993,92	2545,21
5 * papel 7 + 7 *PMMA	54,72	42,11	3692,06	2816,75

Olhando para os resultados da Tabela 3-12 verifica-se que o provete que teve melhores propriedades foi o papel com maior porosidade (papel 7) que mostrou ter um maior módulo perante os dois casos de modo significativo. (Devia de ter sido testado um *build up* com 5*papel 8 + 7* PMMA, ou pelo lado inverso, (4*papel 7 + 8PMMA ou ainda 6*papel 7+ 8PMMA. Contudo, a espessura não ia ser exatamente igual pois as gramagens dos papeis são diferentes, mas deviam de entrar para um melhor comparativo). Apesar das diferentes espessuras, ainda assim, com a diferença apresentada no módulo dos respetivos provetes, dá para afirmar com segurança que o papel com uma maior espaço de vazios vai trazer vantagens a nível de propriedades mecânicas.

3.2.5 Estudo da Influência da Colagem dos Compósitos

Para este estudo foi usado apenas o papel kraft 7 com a matriz de PMMA e o que se tentou estudar foi se havia melhorias notáveis em fazer o incremento de espessura do material compósito através de uma colagem em prensagem de duas partes, ou seja, neste caso em específico, foram processados dois provetes com a espessura de 1,1 mm (3 folhas de kraft com 6 de PMMA) em vez de fazer de uma só vez a prensada com 6 folhas de kraft e 12 de PMMA, resultando numa espessura final aproximada de 2,25. O ciclo usado nos provetes de 1 mm é o ciclo 2 da Tabela 3-7. A segunda prensada, onde se efetivou a colagem das partes, aplicou-se o mesmo ciclo, com a diferença de que se diminuiu o tempo do passo 2 para 3 minutos. Tentou-se assim minimizar as perdas a nível de tempo de processamento para aquilo que se considera o standard, que é colocar o número de folhas de acordo com a espessura objetivo final. Para comparação foram utilizados os valores dos provetes testados nos anteriores capítulos. Assim os *build up* comparativos encontram-se na Tabela 3-13 e os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3-14.

Tabela 3-13 - Percentagens mássicas de fibras e polímero, em cada um dos compósitos produzidos.

<i>Build up</i>	<i>Espessura (mm)</i>
3* papel 8 + 6*PMMA	1,13
4 * papel 8 + 8* PMMA	1,52
5 * papel 8 + 10* PMMA	1,95
6 * papel 8 + 12* PMMA	2,41
(3* papel 8 + 6*PMMA)*2	2,25

Tabela 3-14 – Resultados obtidos no ensaio de flexão para o estudo da colagem nas propriedades mecânicas

Build up	Flexural stress – Longitudinal (MPa)	Flexural stress – Transversal (MPa)	Flexural modulus of elasticity - Longitudinal (MPa)	Flexural modulus of elasticity - Transversal (MPa)
3* papel 8 + 6*PMMA	44,06	32,08	3806,69	2545,21
4 * papel 8 + 8* PMMA	45,65	32,08	2993,92	2040,23
5 * papel 8 + 10* PMMA	46,40	34,26	2729,27	2079,22
6 * papel 8 + 12* PMMA	54,40	36,54	2684,26	1627,7
(3* papel 8 + 6*PMMA)*2 (colagem)	53,72	40,82	2431,99	1862,35

Os resultados da Tabela 3-16 obtidos permitem afirmar que não houve melhorias em realizar o compósito em duas etapas de prensagens. O problema pode estar no ciclo utilizado para a colagem, que pode não ter sido o mais adequado. A empresa não iria conseguir aumentar as propriedades mecânicas realizando ciclos de prensagens mais curtos a nível de tempo e mais prensadas, pelo resultado demonstrado. Contudo, isto não quer dizer que não se chegasse a outras propriedades mais interessantes com outros parâmetros de prensagem.

3.2.6 Caracterização do compósito de acordo com a norma EN438

A norma europeia 438 “*High Pressure decorative laminates (HPL) – Sheets based on thermosetting resins (usually called laminates)*” é a norma pela qual se rege a qualidade dos laminados termoendurecíveis produzidos pela empresa. Por esse motivo e apesar de a norma estar focada em materiais compósitos de matriz termoendurecível, algo que o material em desenvolvimento não usa, decidiu-se fazer uma comparação de atributos entre o produto HPL comum e este novo compósito. Esta norma contempla vários testes pelo que serão abordados individualmente os diferentes testes. O provete testado foi o compósito com o papel 8 e a matriz de PMMA produzido laboratorialmente e também foram utilizados nos ensaios os provetes do primeiro ensaio industrial, que tiveram ciclos de prensagem idênticos. Por motivos de confidencialidade não será demonstrado o gráfico temperatura vs tempo usado em cada uma das situações.

3.2.6.1 Resistência à imersão em água em ebulição.

O ensaio de imersão em água em ebulição tem uma duração de 2 h e é determinado pelo aumento da massa e espessura das amostras e pela observação de qualquer alteração na superfície. O teste geralmente está de acordo com a EN ISO 62 “*Plastics-Determination of water absorption*”, excetuando o facto de estar mais tempo em imersão e ser exigida a medição de variação da espessura e massa. Este ensaio consiste em colocar os compactos em água em ebulição sendo realizada a medição da espessura nas 4 extremidades do provete de 50mmx50mm e sendo também é registada a massa dos provetes para posterior análise da sua variação. Na Figura 3-16 encontra-se uma exemplificação do ensaio de resistência à imersão em água em ebulição. A classificação de aspeto é de acordo com a seguinte escala:

Classificação 5: nenhuma alteração visível.

Classificação 4: Ligeira mudança de brilho e / ou cor, visível apenas em determinados ângulos de visão.

Classificação 3: Mudança moderada de brilho e / ou cor.

Classificação 2: Mudança acentuada de brilho e / ou cor e aparecimento de algumas bolhas.

Classificação 1: Delaminação.



Figura 3-16 - Ensaio de água em ebulição onde se vêem os provetes no fundo do gobelé com água

Na Tabela 3-15 encontram-se os resultados obtidos nos ensaios.

Tabela 3-15 – Resultados dos ensaios da água em ebulição

<i>Build up</i>	Variação de massa (%)	Variação de espessura (%)	Classificação	Especificações EN 438 (for CGS)		
				Variação de massa (%)	Variação de espessura (%)	Classificação
<i>Industrial</i>	1,99	22,08	4	7,0	9,0	4
<i>Laboratorial</i>	39,38*	41,49*	1*			

*Das 3 amostras necessárias para o teste, uma passou sem delaminação com valores de 7,40, 26,21 e classificação de 4 respetivamente. Uma possível explicação é que verificou-se que a prensa não tinha uma temperatura uniforme ao longo dos pratos, revelando um problema com as resistências.

Comparando os compactos industriais com os produzidos na prensa de laboratório, podem observar-se que se obtiveram melhorias notáveis no processo industrial. De notar que a pressão atingida na prensa industrial (mais 10 bar que a prensa laboratorial) pode ter contribuído significativamente para este resultado. Por outro lado, o ciclo industrial, teve um pico de temperatura mais baixo em 10°C. As amostras industriais quase que passaram todas as especificações da EN438 para um laminado termoendurecível, a não ser a variação de espessura que ficou ligeiramente acima do estipulado pela norma. Tendo em conta que a água em ebulição tem uma temperatura de 100°C o compósito passou a temperatura de transição vítrea que se encontra nos 97°C. Com isto houve uma maior facilidade para este se expandir, nunca perdendo a adesão entre camadas.

3.2.6.2 Resistência ao vapor de água

Na Figura 3-17 seguinte encontra-se uma exemplificação do ensaio de resistência ao vapor de água. Neste ensaio, as amostras do material são mantidas por cima do balão de *Erlenmeyer* que contém água a ferver (100°C), de modo que a superfície decorativa da amostra seja exposta ao vapor de água. Após 1 h, a amostra é removida e deixada a recuperar por 24 h em condições ambientais normais antes de ser examinada para se observar qualquer alteração na aparência. A escala de resultados é a seguinte:

Classificação 5: nenhuma alteração visível.

Classificação 4: Ligeira mudança de brilho e / ou cor, visível apenas em determinados ângulos de visão.

Classificação 3: Mudança moderada de brilho e / ou cor.

Classificação 2: Mudança acentuada de brilho e / ou cor.

Classificação 1: Bolhas e / ou delaminação.



Figura 3-17 -Montagem usada no ensaio de resistência ao vapor de água.

Na Tabela 3-16 encontram-se os resultados obtidos no ensaio.

Tabela 3-16 - Resultados dos ensaios de resistência ao vapor de água.

<i>Build up</i>	Classificação	EN 438 Standard (for CGS)
		Classificação
<i>Industrial</i>	4	4
<i>Laboratorial</i>	4	

Todas as amostras apresentam resultado que cumprem com as especificações da norma. É um resultado muito interessante, visto que todas as amostras não delaminaram nem formaram bolhas. O que se pode observar é que existe apenas uma pequena alteração de cor ou brilho na superfície mas que pode ser eliminado com a utilização de uma chapa de acabamento na superfície e/ou a utilização de um papel decorativo com maior desempenho.

3.2.6.3 Resistência térmica

Este teste tem como objetivo verificar a adequação dos compactos para a utilização em aplicação onde entrem em contacto com o material compacto objetos moderadamente quentes como pode acontecer numa cozinha. Um bloco de liga de alumínio padrão a uma temperatura de teste especificada de 160°C é colocado em contato com a amostra do compacto. Após 20 minutos de contato, o bloco é removido. A este teste chama-se resistência ao calor seco e é avaliada exclusivamente por inspeção visual.

Outra variante obrigatória do teste denomina-se por calor húmido, um bloco de liga de alumínio padrão a uma temperatura de teste especificada de 100°C é colocado num pano húmido em contato com uma amostra retirada do compacto. Após 20 minutos de contato, o bloco é removido e a resistência é avaliada por exame visual. Na Figura 3-18 seguinte encontra-se uma exemplificação do ensaio de resistência térmica e na Tabela 3-17 encontram-se os resultados obtidos no ensaio. A escala de classificações é a seguinte:

Classificação 5: nenhuma alteração visível.

Classificação 4: mudança ligeira de aspeto.

Classificação 3: Mudança moderada de aspeto.

Classificação 2: Mudança significativa de aspeto.

Classificação 1: Mudança bruta de aspeto.

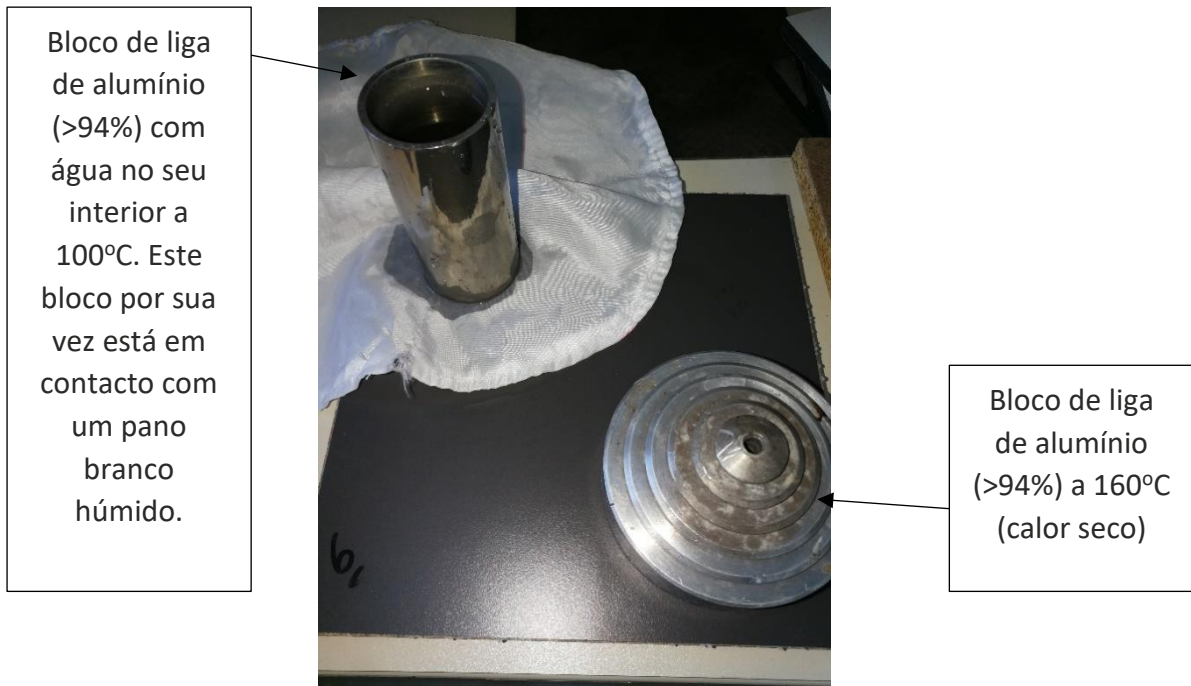


Figura 3-18 - Nesta imagem observa-se o ensaio de resistência térmica (húmida (canto superior esquerdo) e seca (canto inferior direito))

Tabela 3-17 - Resultados obtidos nos ensaios de resistência térmica.

<i>Build up</i>	Calor seco	Calor húmido	EN 438 Standard (for CGS)	
			Calor seco	Calor húmido
<i>Industrial</i>	2	4	4	4
<i>Laboratorial</i>	1	4		

O teste mais crítico para o compósito termoplástico é o ensaio do calor seco por este ser realizado a uma temperatura bastante superior à de serviço. Chegando a uma temperatura de 160°C o polímero volta outra vez à sua fase mais fluída/viscosa o que permite ligeiras deformações a superfície como se pode verificar na Figura 3-19. Este aspeto é a maior desvantagem comparativamente ao compósito com resinas termoendurecíveis (CGS).



Figura 3-19 – Provetes do compósito flexcomp após o ensaio do calor seco onde se pode observar uma ligeira deformação à superfície do decorativo.

3.2.6.4 Estabilidade dimensional

Este teste mede as alterações dimensionais laterais das amostras a temperaturas elevadas. Cada amostra deve ter $(200 \pm 0,8)$ mm de comprimento, (50 ± 1) mm de largura. As arestas devem estar lisas e livres de rachaduras/fissurações. Antes de fazer as primeiras medições, todas as amostras devem ser mantidas pelo menos 72h numa atmosfera padrão de $(23 \pm 2)^\circ \text{C}$ e $(50 \pm 5)\%$ de humidade relativa. Depois é verificar a alteração no comprimento medido de cada amostra em percentagem do comprimento medido inicial. Existem duas variantes de testes. Uma, que se denomina por estabilidade dimensional seca, consiste colocar os provetes a $70 \pm 2^\circ \text{C}$ durante 24 horas e deixar 1 hora no exsiccador. Após decorrida essa hora retiram-se os referidos provetes para serem medidos. Existe também a estabilidade dimensional húmida, que é realizada a $40 \pm 2^\circ \text{C}$ durante 96 ± 4 horas com uma humidade relativa de 90 a 95%, sendo os provetes retirados e imediatamente medidos após termino do ensaio. O objetivo é calcular a variação percentual média no comprimento medido para cada um dos pares de amostras (2 no sentido transversal + 2 no sentido longitudinal para cada uma das

variantes), para o valor mais próximo de 0,05%. Posteriormente calcula-se a alteração dimensional cumulativa para cada direção do provete, de ambas as variantes (húmida e seca). A mudança dimensional é a soma das mudanças dimensionais absolutas médias em cada um dos testes de baixa e alta humidade. Na Figura 3-20 vê-se uma foto dos provetes na estufa utilizada para o ensaio de estabilidade dimensional seca.



Figura 3-20 - Ensaio de estabilidade dimensional seca

O resultado deste ensaio encontra-se no Tabela 3-18.

Tabela 3-18 – Resultados dos testes de estabilidade dimensional.

<i>Build up</i>	Estabilidade dimensional seca		Estabilidade dimensional húmida		EN 438 Standard (for CGS)	
	L (%)	T (%)	L (%)	T (%)	Estabilidade dimensional	
	L (%)	T (%)	L (%)	T (%)	L (%)	T (%)
<i>Industrial</i>	0,22	0,52	-	-	0,4	0,8
Laboratorial	0,15	0,40	-	-		

L – Longitudinal

T – Transversal

Os resultados dos ensaios de estabilidade dimensional húmida não foram realizados devido a uma impossibilidade técnica na câmara climática que impediu a realização do ensaio. Contudo, dá para ter noção que os ensaios foram satisfatórios, não ocorrendo qualquer fissuração ou deformação nos provetes ensaiados. O ensaio de estabilidade dimensional seca é aquele que usualmente provoca maiores alterações dimensionais nos provetes pelo que se pode afirmar com alguma segurança, que os requisitos deste ensaio iam ser cumpridos se fosse realizado o ensaio de estabilidade húmida. Ainda assim, fica pendente o ensaio de estabilidade húmida para afirmar com segurança que o compósito desenvolvido passava neste ensaio.

3.2.6.5 Resistência ao risco

Neste ensaio são aplicadas cargas com intervalos especificados na norma, usando-se um objeto com uma ponta adiantada (material mais duro conhecido) de geometria definida. A resistência a riscos no compacto é expressa como uma classificação/escala numérica (de 1 a 5) que define a carga máxima aplicada que não produz riscos contínuos na superfície. A escala é seguinte (Tabela 3-19):

Tabela 3-19 – Classificação do teste de resistência ao risco pela norma EN438

Classificação	Traços descontínuos ou marcas não visíveis	≥ 90 % duplo círculo contínuo de risco claramente visíveis
5	6 N	> 6 N
4	4 N	6 N
3	2 N	4 N
2	1 N	2 N
1	-	1 N

O resultado do teste é desta forma verificado visualmente a força a partir da qual produz um risco contínuo. Na Figura 3-21 está representado um ensaio de resistência ao risco.



Figura 3-21 - Ensaio de resistência ao risco.

Na Tabela 3-20 estão apresentados os resultados do ensaio de resistência ao risco nos compactos flexcomp.

Tabela 3-20 - Resultados obtidos no ensaio de resistência ao risco.

<i>Build up</i>	Classification	EN 438 Standard (for CGS)
		Classification
<i>Industrial</i>	≥ 4	≥ 2
<i>Laboratorial</i>	≥ 4	

As amostras flexcomp passam a classificação requerida pela EN438. Contudo, este teste prende-se acima de tudo com o tipo de material e acabamento usado na parte de cima do compósito e não tanto com o núcleo do mesmo onde este sofreu alterações, e por isso previa-se que este teste fosse cumprido no que diz respeito à especificação pela EN438, porque os papéis decorativos testados estão validados para o processo *standard* de HPL.

3.2.6.6 Resistência à abrasão

Este ensaio mede a resistência ao desgaste da superfície decorativa do compacto até à subcamada. A abrasão é obtida girando uma amostra em contato com um par de rodas cilíndricas cobertas com fitas abrasivas. A força exercida depende do peso inserido em cada um dos braços (por defeito usam-se as rodas cilíndricas com o peso de 500 gramas). As rodas são posicionadas de modo que as suas faces cilíndricas sejam equidistantes do eixo de rotação da amostra, mas não tangenciais a ela. Quando giradas, elas atiram na superfície da amostra. O número de rotações da amostra necessárias para causar alterações na superfície é usado como medida de resistência ao desgaste da superfície. Na Figura 3-22 está representado o equipamento usado para o ensaio de resistência à abrasão.



Figura 3-22 - Equipamento para o ensaio de resistência à abrasão.

Na Tabela 3-21 estão apresentados os resultados dos compactos submetidos a este teste.

Tabela 3-21 - Resultado do teste de resistência à abrasão.

<i>Build up</i>	Ponto inicial (rot)	EN 438 Standard (for CGS)
		Ponto inicial (rot)
<i>Industrial</i>	475	≥150
<i>Laboratorial</i>	500	

Mais uma vez, este teste também pretende aferir a qualidade da parte superficial do compósito no que diz respeito à capacidade abrasiva, pelo que o papel decorativo utilizado vai ter uma importância elevada quando comparado com o núcleo, tendo os compósitos estudados passado este teste facilmente.

3.2.6.7 Resistência às manchas

Neste teste as amostras são colocadas em contato com uma série de agentes químicos que podem ser encontrados no uso diário. O tempo e as condições do contato são especificados para cada agente químico. No final do período do contacto especificado, as amostras são lavadas e examinadas para verificar a existência de possíveis vestígios residuais/alteração de cor ou brilho. Se o compacto atender aos requisitos de especificação quando testado, considera-se que está em conformidade com a especificação de resistência a manchas.

Na Figura 3-23 está representado um ensaio de resistência a manchas.



Figura 3-23 - Ensaio de resistência a manchas.

Na Tabela 3-22 encontram-se representados os resultados dos ensaios de resistência a manchas.

Tabela 3-22 – Resultados do ensaio de resistência a manchas.

<i>Build up</i>	Químicos do grupo 1	Químicos do grupo 2	Químicos do grupo 3	EN 438 Standard (for CGS)	
				Químicos grupo 1 and 2	Químicos grupo 3
<i>Industrial</i>	5	5	5	5	4
<i>Laboratorial</i>	5	5	5		

Mais uma vez, tal como aconteceu em ensaios anteriores, todas as amostras passaram neste teste sem qualquer dificuldade.

3.2.6.8 Resistência ao impacto

Uma amostra é coberta com uma folha de papel carbono (também conhecido como folha de papel químico) e sujeita ao impacto de uma bola de aço que cai de uma altura variável conhecida, apenas sobre o efeito da gravidade, (também conhecido como “queda-livre”). A resistência ao impacto é expressa como a altura máxima de queda que pode ser alcançada sem que ocorram em fissuras visíveis na face testada ou produzindo uma impressão superior ao diâmetro máximo especificado.

Na Figura 3-24 seguinte pode ver-se o equipamento necessário para o ensaio de resistência ao impacto.



Figura 3-24 - Ensaio de resistência ao impacto (bola grande).

Na Tabela 3-23 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de resistência ao impacto dos materiais compactos.

Tabela 3-23 - Resultado dos ensaios de impacto.

<i>Build up</i>	Bola grande (m)	Bola pequena (N)	EN 438 Standard (for CGS)	
			Bola grande (m)	Bola pequena (N)
<i>Industrial</i>	$\geq 1,8$	45	1,8	-
<i>Laboratorial</i>	$\geq 1,8$	50		

As amostras passaram no teste de resistência ao impacto. No ensaio com a bola grande, as amostras obtiveram a classificação máxima do equipamento em teste, que é de 1,8 metros, e mesmo assim, não apresentaram qualquer dano na sua superfície, o que

demonstra a grande capacidade de absorção de energia do compacto. A utilização de uma matriz termoplástica ajuda muito neste quesito. Este valor (1,8m) é o que se espera para um HPL tradicional, pelo que se optou por fazer mais um teste, que normalmente só se aplica a materiais de espessura inferior a 2mm (a espessura destes provetes era de 3mm) para efeitos comparativos. Os resultados estão expostos na Tabela 3-23. Este é um teste também presente na norma EN438 e recorre uma bola com 5 mm de diâmetro cujo força é aplicada através de uma mola. A classificação é obtida pelo valor máximo da força, registado em Newtons, que o material aguenta sem fissurar. O equipamento que se utilizou é mostrado na Figura 3-25. Foi neste teste que os valores sobressaíram quando comparados aos do HPL de matriz termoendurecível. Os resultados quase que dobram a especificação mais alta que pertence ao laminado HD (*“Horizontal grade, Heavy duty or severe use”*) cujo o valor é de 25N.



Figura 3-25 – Instrumento para o teste de resistência ao impacto com a bola pequena [65]

3.3 Análise Micromecânica da camada - Lei das Misturas

Neste capítulo vai fazer-se uma estimativa das propriedades do material compósito, com base na lei das misturas. O compósito desenvolvido tem um empilhamento

unidirecional (todas as folhas de kraft estão alinhadas no mesmo sentido), sendo que o material é um pouco anisotrópico (as fibras são puxadas no seu processo de fabrico e é por esse motivo que têm, em média, o dobro da resistência à tração). Deste modo, ao estimar as propriedades ótimas do compósito, por comparação com os resultados obtidos, é possível perceber se o processamento foi adequado ou não.

Devido à dificuldade técnica de isolar fibras de celulose, o método aplicado foi o seguinte: com base nos resultados de tração obtidos com o polímero e com o compósito, estimaram-se as propriedades das fibras. Esse valor calculado será comparado com os valores encontrados na literatura.

A equação da lei das misturas, que também é conhecido pelo nome de "Modelo de Voigt" e é descrito pela Equação 9 que aplicado à propriedade testada (módulo de elasticidade) fica descrito pela Equação 9 (assumindo que a fração volúmica de vazios é nula).

$$P = \sum_{i=1}^n P_i v_i$$

Equação 8

$$E_1 = v_f E_f + (1 - v_f) E_m$$

Equação 9

Onde:

P – é uma propriedade global da mistura;

P_i – é a propriedade de cada componente "i" da mistura;

v_i -é a fração volúmica de cada componente "i" da mistura

E_1 – Módulo de elasticidade na direção 1

E_f - Módulo de elasticidade das fibras

E_m – Módulo de elasticidade da matriz (polímero)

v_f - é a fração volúmica de fibras

Para aplicar a Equação 9 é preciso ter os seguintes dados e efetuar os seguintes passos:

1. Calcular o módulo de elasticidade do compósito:

O primeiro passo é calcular o módulo de elasticidade do compósito. Por isso é necessário transformar o gráfico Força vs deslocamento (exemplo na Figura 3-26), obtido através do ensaio de tração, para tensão vs deformação (Figura 3-27).

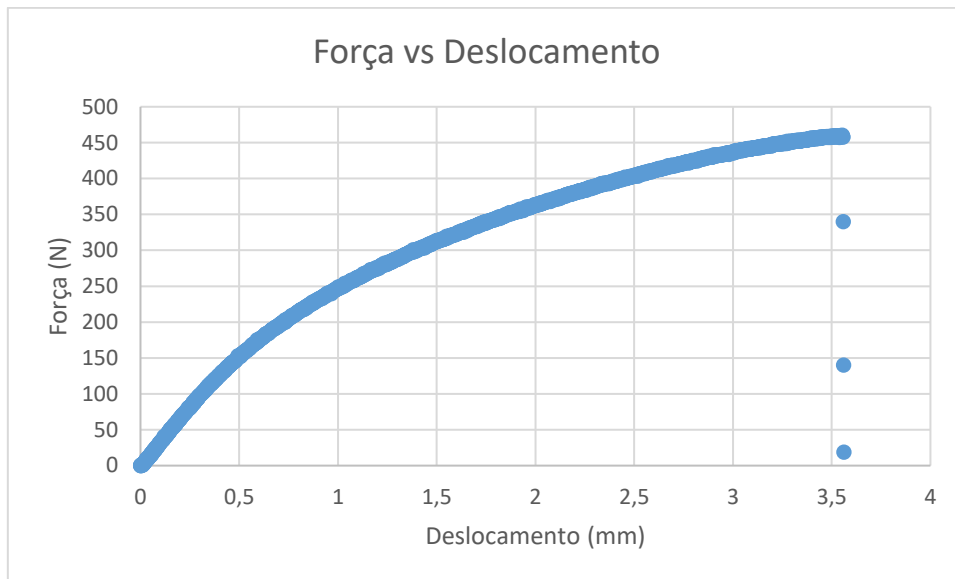


Figura 3-26 – Exemplo de um gráfico Força vs deslocamento obtido num provete de material compósito

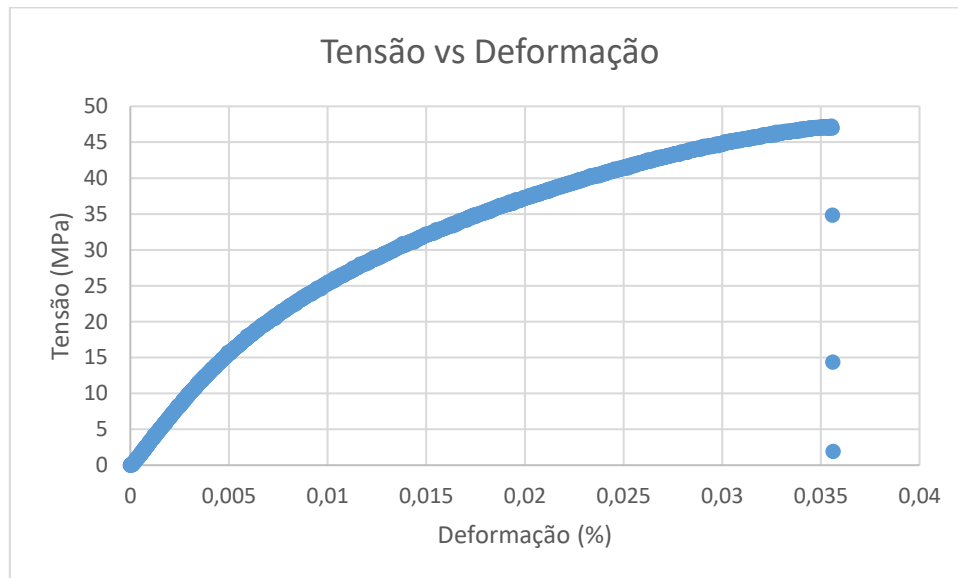


Figura 3-27 - Exemplo de um gráfico Força vs deslocamento obtido num provete de material compósito

O módulo de *young* (ou módulo de elasticidade) é calculado na zona linear do gráfico da tensão vs deformação, que acontece nos momentos iniciais do ensaio de tração. O valor representa a medida de rigidez do material.

Assim, traçou-se um outro gráfico da zona linear do gráfico da Figura 3-27, também ele tensão vs deformação, que compreendeu os valores de deformação de 0,00013% a 0,00079% resultando no gráfico da Figura 3-28.

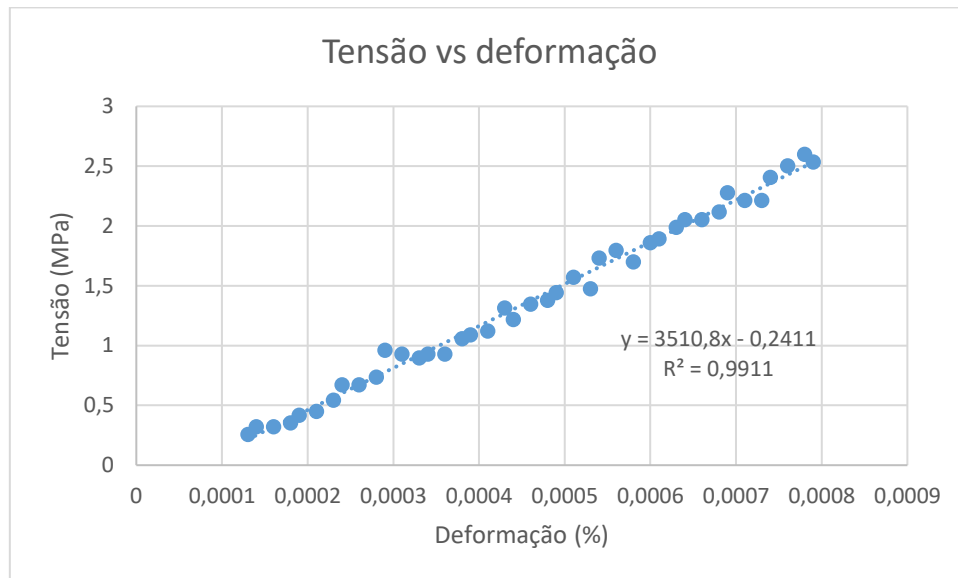


Figura 3-28 – Gráfico tensão v deformação da zona linear do ensaio de tração do material compósito

O declive da reta do gráfico da Figura 3-28 dá o valor do módulo de elasticidade para o material compósito que é de 3,5 GPa.

2. Cálculo do módulo de elasticidade do polímero PMMA

O procedimento é o mesmo que o realizado para o material compósito. Sendo este material bastante comum, também seria possível encontrar na bibliografia/ficha técnica do produto (na ficha de produto deste material não vinha especificado o seu valor), o valor do módulo de elasticidade. O valor do módulo calculado através dos resultados experimentais é de 1,4 GPa, um valor ligeiramente mais baixo do que os encontrados na literatura [66], [67] e [68].

3. Aplicação da lei das misturas

Para aplicar a lei das misturas é preciso saber os valores das frações volúmicas. Para calcular a fração volúmica exata de polímero no papel kraft, é preciso assumir que a espessura do kraft após compressão, é menor que a inicial, ou seja, variável. Desse modo, é necessário fazer o cálculo inverso com base nas gramagens. Se não se tiver em

consideração a compressibilidade do papel kraft, a massa volúmica seria de 640 kg/m³. Com base na Equação 10 calculou-se a massa volúmica das fibras, para uma pressão específica de prensagem de 2 MPa (20 bares).

$$t = G_f * \left(\frac{1}{\rho_f} \right) + \frac{(1 - w_f)}{(\rho_p * w_f)}$$

$$1,13 * 10^{-3} = ((213 * 3) * 10^{-3}) * \left(\frac{1}{\rho_f} \right) + \frac{(1 - 0,544)}{(1140 * 0,544)}$$

$$\rho_f = 968 \text{ kg/m}^3$$

Equação
10

Onde:

ρ_f – massa volúmica das fibras (kg/m³)

ρ_p – massa volúmica do polímero = 1140 (kg/m³)

t – espessura = 1,13 (mm)

w_f – fração mássica de fibras = 0,544

G_f – Gramagem das fibras = 0, 213 (por folha de kraft)(kg/m²)

Como se pode constatar, houve um incremento da massa volúmica de 640 para 968 kg/m³, uma diferença de 328 kg/m³ (34% do valor após prensagem) da massa volúmica das fibras após a compressão, não se podendo desprezar esta propriedade. Fica a nota também que à medida que o valor da compressão durante o processamento aumentar, este valor aumentará. Com a determinação de valor de massa volúmica das fibras podem agora calcular-se as frações volúmicas dos compósitos através da Equação 11.

$$v_f = \frac{\frac{w_f}{\rho_f}}{\frac{w_f}{\rho_f} + \frac{1 - w_f}{\rho_p}}$$

$$v_f = \frac{\frac{0,544}{968}}{\frac{0,544}{968} + \frac{1 - 0,544}{1140}}$$

$$v_f = 0,584$$

Equação
11

Onde:

v_f – fração volúmica de fibras

Tendo todos os dados para aplicação da lei das misturas para determinar o módulo das fibras, o resultado foi obtido através da aplicação da Equação 12.

$$3,5 = 0,584 * E_{f_1} + (1 - 0,584) * 1,4$$

$$E_{f_1} = 5 \text{ GPa}$$

Equação
12

Na bibliografia, os valores do módulo de elasticidade 100% de fibras de celulose andam entre 2 a 8,9 GPa pelo que o valor de 5 GPa obtido pelas fibras celulósicas do papel 8 se encontram no meio [69], [70] e [71]. Comparando esta fibra de origem natural com algumas do mercado, esta é uma das mais baixas, ficando ao nível das fibras de coco (4 a 6 GPa) mas longe de fibras como a Juta (13 a 26,5 GPa) e ainda mais da fibra natural de origem celulósica que maior módulo tem, que são as fibras de rami (24,5 a 128 GPa de módulo de elasticidade) [72].

Para finalização, e de modo a juntar a informação recolhida ao longo dos ensaios descritos no capítulo 3, a massa volúmica final do compósito com o melhor empilhamento (depois dos ensaios expostos nos subcapítulos anteriores), é calculada através da equação 13.

$$\begin{aligned}\rho_c &= v_f \rho_f + (1 - v_f) \rho_p \\ \rho_c &= 0,678 * 968 + (1 - 0,678)1140 \\ \rho_c &= 1023 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

Equação
13

A redução de 1,4 g/cm³ (valores comuns nos produtos HPL) para 1,0 g/cm³ é uma redução bastante significativa e um objetivo atingido. Contudo, é preciso deixar a ressalva que o processo produtivo no futuro vai aplicar uma pressão de 9 MPa para ajudar a impregnação do compósito e, sabendo que o papel kraft é compressível, este valor da massa volúmica tenderá a aumentar ligeiramente visto que os cálculos foram realizados para uma pressão de 2 MPa.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo irão ser enunciadas as principais conclusões e inovações que surgiram deste trabalho, assim como algumas propostas de continuação do trabalho desenvolvido. Por fim irão ser mencionadas algumas formas de divulgações e exposições técnico científicas que já foram realizadas.

4.1 Conclusões

A primeira conclusão que se pode retirar do trabalho aqui exposto é que foi possível desenvolver um material compósito com as características objetivo: termoformável, sustentável e de baixo peso para poder concorrer no mercado dos transportes. A Sonae Indústria de Revestimentos ficou assim habilitada a ser fornecedora de materiais compósitos capazes de assumir formas complexas graças a substituição dos polímeros termoendurecíveis (resina fenólica) para polímeros termoplásticos, cumprindo assim o grande objetivo desta tese. A empresa fica ainda com o *know-how* de qual a melhor combinação de matérias primas, consoante a aplicação pretendida. Alguns materiais não foram escolhidos, por razões económicas, para avançar para estudos mais pormenorizados com determinada matéria prima, mas foram redigidos os dados para na eventualidade de algum cliente pedir um compósito com determinadas propriedades e assim saber quais as matérias primas para usar no *build-up*.

Os objetivos relacionados com a verificação de quais as matérias primas que contribuía para um desempenho mecânico superior foram atingidos. O papel que teve melhores resultados no âmbito dos testes efetuados foi o papel número 4. Contudo, por motivos económicos, foi o papel 8 que seguiu no desenvolvimento do material. No que diz respeito aos polímeros, o polímero escolhido foi o PMMA devido aos problemas de processamento verificados com o PE e PLA. Este polímero apresentou uma razão mássica mais adequada (à volta de 35%). É ainda possível de se afirmar que o compósito

mais económico de ser realizado é aquele que se consegue utilizando-se como matriz o PE; e o compósito mais sustentável de ser realizado é conseguido utilizando-se como matriz o biopolímero PLA. Contudo, fica a ressalva que devia de ser feita uma comparação a nível de propriedades mecânicas dos compósitos com as matrizes de PE e PLA com os parâmetros adequados a cada um dos polímeros.

Do trabalho também se retira a informação que, o papel branqueado, papel este que visualmente é mais apelativo, conduz a compósitos com propriedades mecânicas inferiores, pois a lignina é um composto que ajuda a fortalecer o papel kraft de acordo com os resultados obtidos.

Sabe-se ainda que, a variação de 1,5 mm na espessura de compósito para o mesmo ciclo de prensagem tem um efeito bastante negativo a nível de propriedades mecânicas. É necessário não apressar a produção destas placas pois para estas apresentarem um melhor desempenho precisam de algum tempo no patamar de pressão a quente, não bastando chegar apenas à temperatura de estágio. Fica-se a saber ainda que quanto maior for a porosidade do material fibroso, ou seja, quanto maior for a quantidade de espaços vazios, mais vai influenciar positivamente o processamento do compósito que revelou ter melhores propriedades mecânicas.

Comparando os compactos tradicionais de matriz fenólica com o compacto flexcomp tendo por base a norma EN438, que é dedicada exclusivamente a materiais com resinas termoendurecíveis e que portanto não serve para efeitos de certificação/validação ao material em desenvolvimento mas sim com o propósito de comparar, houve apenas dois testes em que este não superou os resultados objetivo. Um deles foi no teste de imersão em água quente e o outro foi o da resistência ao calor seco. O calor seco, sendo um teste realizado à temperatura de 160°C, perspectivava-se que o compacto não tivesse um comportamento idêntico ao observado no compacto fenólico pela diferença do polímero utilizado (termoendurecível para termoplástico). Outro teste cujo os resultados não foram positivos foi no teste de imersão em água em ebulição onde o compósito desenvolvido falhou, no requisito de variação de espessura. Tendo por base que a temperatura da água em ebulição a pressão atmosférica é de aproximadamente 100°C e que a t_g referenciada na ficha técnica da matriz termoplástica é de 97°C, podia afetar ligeiramente os resultados deste teste. Deve referir-se ainda que, nem todos os provetes reprovaram no teste, revelando que se está muito próximo da linha de reprovação/aceitação. Por outro lado, a resistência ao impacto melhorou

significativamente com a introdução dos polímeros termoplásticos, fator este muito importante quando se falam de aplicações na indústria de transportes, que estão sempre sujeitos a impactos de pequenos objetos aquando do seu uso.

Por aplicação da lei das misturas chegou-se à conclusão que o valor obtido para o módulo de *Young* do compósito (5 GPa) se encontra na média daquilo que se encontra na bibliografia para fibras de celulose em papel mas muito abaixo se se considerarem outras fibras de origem natural como as fibras de ananás, juta, kenaf ou rami. Também se conseguiu provar a redução da densidade do material compósito, obtendo um valor muito interessante de 1,0 g/cm³. Contudo, ficou comprovado que o papel kraft varia a sua massa volúmica consoante a pressão exercida pelo que se espera que este valor aumente ligeiramente quando for processado a 9 MPa em vez de 2 MPa.

4.2 Proposta de trabalhos futuros

Neste trabalho tinha sido um objetivo inicialmente proposto o estudo dos parâmetros de termoformação para o material compósito desenvolvido. Esse estudo ficará para um trabalho subsequente a este, contudo, e como se vai poder ver na Tabela 4-1, o plano de trabalho está pensado e estruturado e pronto para ser colocado em estudo. Ainda assim, foi comprovada a sua capacidade de termoformação, pelos métodos de *vacuum forming* e *pressure forming* para peças de diferentes geometrias, com temperaturas de processamento à volta dos 120°C ± 2. Estes resultados terão ainda que ser validados.

Uma das propostas apresentadas pelo autor, que já tem o parecer positivo da empresa de acolhimento e também por parte da instituição académica para seguimento deste trabalho, é o estudo dos parâmetros de termoformabilidade do material. Os parâmetros de termoformabilidade são informações a nível de tempos, temperaturas, pressões e acima de tudo, raios de deformabilidade possíveis de atingir. Deste modo, o autor idealizou um molde em que se pudesse estudar a influência destes parâmetros. O molde (Figura 4-1) foi desenhado com as seguintes especificidades, que podem ser consultadas na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 – Especificações do molde para estudo da pós deformabilidade do compósito

Taxa de esforço	Curvatura min	Espessura (mm)	Curvatura max	Taxa de esforço
10 ($6 * \underline{10} = 60 = R60$)	R60	6	R15	2,5 ($6 * \underline{2,5} = 15 = R15$)
3 ($3 * \underline{3} = 9 = R9$)	R9	3	R12	4 ($3 * \underline{4} = 12 = R12$)
10 ($3 * \underline{10} = 30 = R30$)	R30	3	R15	5 ($3 * \underline{5} = 15 = R15$)
10 ($1 * \underline{10} = 10 = R10$)	R10	1	R6	6 ($1 * \underline{6} = 6 = R6$)



Figura 4-1 – Molde para o estudo dos raios de curvatura

De acordo com a Tabela 4-1, o molde foi pensado para a prensa existente no ISEP, cujas as dimensões são 300x300mm. Foi dividido equitativamente em 4 partes de modo a ser passível de colocar 4 provetes em simultâneo de 300x75mm. Cada provete vai ser dobrado a um raio diferente, conforme a taxa de esforço aplicada, dando origem a 8 curvaturas em estudo. A taxa de esforço é calculada com base na espessura do provete. Os termolaminados *postforming* com resinas termoendurecíveis tem uma taxa de esforço de 10 vezes a espessura pelo que esse valor é a taxa de esforço maior que será aqui considerada. A taxa de esforço quanto maior for o número assumido, mais fácil será

de dobrar, pelo que a taxa de esforço de 2,5 é a mais difícil de atingir sem o material delaminar ou partir. Foram escolhidas espessuras diferentes e taxas de esforço idênticas (=10) propositadamente para se poder proceder ao estudo de ciclo de termoconformação em função da espessura. O objetivo é criar uma “equação da termoconformação” que permite definir os parâmetros de ciclo (temperatura e tempo) para que uma determinada espessura de material seja termoformada no menor tempo possível mas mantendo a qualidade do mesmo. Com este molde quer-se avaliar também qual a taxa de esforço mais baixa que se pode atingir, o ensaio tem taxas de esforço de 2,5 a 10. Dentro dos provetes com a mesma espessura, poderá ser observado se o material exige tempos diferentes de ciclos para ser passível de ser dobrado a um raio “X”. O ciclo irá mexer em parâmetros como temperatura, tempo e pressão para fazer estes estudos. Este estudo poderá ser feito com polímeros diferentes, a fim de estudar a deformabilidade de cada um, assim como para estudar o material que irá conferir como camada decorativa e ainda materiais reforçados com fibra, seja ela de vidro, carbono ou outra, para ver se pode atingir um equilíbrio entre grandes propriedades mecânicas e geometria complexa.

O autor propõe a realização de dois ensaios de caracterização complementares, nomeadamente os ensaios de *Shear test*, com base na norma ASTM D3163 “*Standard Test Method for determining strength of adhesively bonded rigid plastic Lap-Shear Joints in shear by Tension Loading*” e ainda ensaios de resistência de adesão com base na ASTM D1876 “*Standard Test Method for Peel Resistance of Adhesives (T-Peel Test)*” [73] [74].

O autor ainda propõe o uso da técnica de análise dielétrica (DEA), que permite ver durante (em tempo real) o processamento do compósito a transição das propriedades térmicas do polímero em tempo real. Este método consegue verificar as modificações propriedades reológicas através da resistência elétrica do mesmo e com isto seria muito mais fácil definir qual a duração dos ciclo seria mais adequado conforme o polímero que está a ser utilizado pois.

4.3 Artigos científicos, patentes e exposições

O projeto flexcomp deu origem a 3 artigos científicos que foram divulgados em diferentes conferências internacionais. Os artigos intitulam-se da seguinte maneira:

1. *“Conception and characterization of different properties from a composite thermoformable with polymeric matrix and cellulosic fibres”* – apresentado na 4th *International Conference on Natural Fibers (ICNF)* realizada em Julho de 2019 no Porto.
2. *“Biodegradability index determination of thermoplastic composites reinforced with kraft Paper”* - apresentado na 4th *International Conference on Natural Fibers* realizada em Julho de 2019 no Porto.
3. *“Study of the Influence of surface treatments in kraft paper for the compatibilization with thermoplastic polymers.”* – apresentado na conferência *Matcomp19* realizado em Julho de 2019, organizado pela AEMAC (*Asociación Española de Materiales Compuestos*)

O produto desenvolvido encontra-se no presente em processo de pedido provisório de patente nacional.

A nível de exposição de produto, para além de ter sido exposto na ICNF 2019 (Figura 4-2) teve a sua grande exposição e apresentação oficial por parte da empresa em Maio de 2019, através de uma aplicação deste produto a uma parede, onde se colocou luz led por traz da peça e ficou com o efeito demonstrado na Figura 4-3.



Figura 4-2 – Peça Flexcomp em exposição na ICNF 2019



Figura 4-3 – Flexcomp em exposição na feira Interzum 2019, em colônia, Alemanha

Bibliografia e outras fontes de informação

- [1] Sonae Indústria, “Sobre nós,” Sonae Indústria, 2017. [Online]. Available: <http://www.sonaeindustria.com/page.php?ctx=2,0,17>. [Acesso em Julho 2018].
- [2] Sonae Arauco, “Sonae Arauco,” Sonae Arauco, 2018. [Online]. Available: <https://www.sonaearauco.com/pt/>. [Acesso em 6 Julho 2018].
- [3] Winwood, “Veneered Chipboard,” Winwood, 2018. [Online]. Available: http://www.winwood-products.com/eng/timber-products/veneer/veneered_chipboard_supplies.htm. [Acesso em 1 Agosto 2018].
- [4] Indiamart, “Wooden Flooring,” [Online]. Available: <https://www.indiamart.com/proddetail/mdf-base-wooden-flooring-13001548388.html>. [Acesso em 6 Julho 2018].
- [5] Surforma, “Surforma CPL - COntinuous Pressure Laminates,” Sonae Indústria, 2020. [Online]. Available: https://www.surforma.com/media/filer_public/fa/df/fadfeb9c-8453-4ced-8b0a-c150e0650323/tds_surforma_cpl_en.pdf. [Acesso em 30 Janeiro 2020].
- [6] EGGER, “Technical leaflet,” 2020. [Online]. Available: https://www.egger.com/get_download/29dd4884-7c55-4ba1-808f-8eb1592c76b8/Technical_leaflet_Laminate_comparison_CPL_HPL.pdf. [Acesso em 30 Janeiro 2020].
- [7] M. F. d. Moura, A. B. d. Morais e A. G. d. Magalhães, *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*, Porto: Publindústria, Produção de Comunicação, Lda., 2011.
- [8] Bourban et al, “Composites part A, vol32,” 2001.
- [9] Craftech Industries, “13 HIGH PERFORMANCE PLASTICS USED IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY,” CRAFTTECH INDUSTRIES, 2018. [Online]. Available:

- <http://www.craftechind.com/13-high-performance-plastics-used-in-the-automotive-industry/>. [Acesso em 22 Novembro 2018].
- [10] International Committee of the decorative laminates Industry, HPL Compendium, ICDLI, 2020.
- Professional Plastics, “Baquelite (Phenolic ou Micarta),” Professional Plastics, [Online]. Available:
- [11] https://www.professionalplastics.com/pt/BAKELITE.html?&search_id=3809778. [Acesso em 10 Agosto 2020].
- [12] C. Chandrasekaran, “14 - Technoeconomic Aspects of Nonrubber Linings—Glass, FRP, and Lead,” em *Anticorrosive Rubber Lining*, Elsevier, 2017, pp. 115-127.
- [13] A. B.Figueiredo, D. V.Evtuguin, J. Monteiro, E. F.Cardoso, P. C.Mena e P. Cruz, “Structure-Surface Property Relationships of kraft Papers: Implication on impregnation with Phenol-Formaldehyde Resin,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011.
- [14] J. M.Martins, M.Almeida, C.Coelho e J. e. L.H.Carvalho, “A New Methodology to Evaluate the Cure of ResinImpregnated Paper for HPL,” *Journal of Adhesion*, vol. 91, pp. 792-800, 2015.
- [15] European Standard, “High-pressure decorative laminates (HPL) - Sheets based on thermosetting resins (usally called laminates),” European Standard, Bruxelas, 2016.
- [16] M. Thebault, A. Kandelbauer, U. Mueller, E. Zikulnig-Rusch e H. Lammer, “Factors influencing the processing and technological properties of laminates based on phenolic resin impregnated papers,” *European Journal of Wood and wood products*, vol. 75, pp. 785-806, 2017.
- [17] J. F. Silva, “Introduction to Structural composites,” Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2018.
- [18] M. Ashby, *Materials Selection*, 2000.
- [19] I. M.Daniel e O. Ishai, *Engineering Mechanics of Composite Materials*, New York: Oxford University Press, 1994.

- Carbon composites, "Composites Market Report 2017," 2017. [Online].
- [20] Available: <https://www.carbon-composites.eu/media/2997/ccev-avk-market-report-2017.pdf>. [Acesso em 14 Julho 2020].
- J. Gotro, "Characterization of Thermosets Part 20: Tensile Testing Part One," Polymer Innovation Blog, 2 Outubro 2017. [Online]. Available:
- [21] <https://polymerinnovationblog.com/characterization-thermosets-part-20-tensile-testing-part-one/>. [Acesso em 21 Janeiro 2020].
- R. Shishoo, Technical Textiles - Technological and Market Developments and Trends, India: ResearchGate, 1997.
- [22]
- TA Instruments, "Materials Characterization by thermal Analysis (DSC&TGA), Rheology, and Dynamic Mechanical Analysis," 2017. [Online]. Available:
- [23] http://www.tainstruments.com/wp-content/uploads/Materials_Characterization_Part1.pdf. [Acesso em 12 March 2019].
- [24] CES EduPack, "PF (Phenol Formaldehyde)," CES EduPack, 2017.
- [25] CesEduPack 2017, "MF (Melamine Formaldehyde)," Ces EduPack, 2017.
- Azo Materials, "Thermoplastics - An Introduction," 14 February 2001. [Online].
- [26] Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=83>. [Acesso em 11 March 2019].
- [27] Ces EduPack 2017, "PE-HD (High Molecular Weight)," Ces EduPack, 2017.
- [28] Ces EduPack, "PP (Polypropylene)," Ces EduPack, 2017.
- [29] Ces EduPack, "PMMA (Polymethylmethacrylate/acrylic)," Ces EduPack, 2017.
- GreyB Services, "SWOT analysis of Polylactic acid [Includes Existing Solutions to drawbacks of PLA]," GreyB Services, 2020. [Online]. Available:
- [30] <https://www.greyb.com/pla-properties/>. [Acesso em 30 Janeiro 2020].
- [31] CesEduPack, ABS (Extrusion), CesEduPack, 2017.
- DynalonLabware, "Plastic Properties of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)," DynalonLabware, [Online]. Available:
- [32] https://www.dynalon.com/PublicStore/pages/ABS_Properties.aspx. [Acesso em 22 Agosto 2019].

- [33] Design inSite, "The designer's guide to manufacturing - ABS - acrylonitrile butadiene styrene," Design inSite, 2018. [Online]. Available: <http://designinsite.dk/htmsider/m0007.htm>. [Acesso em 22 Agosto 2019].
- [34] Adreco Plastics, "ABS plastic properties," Adreco Plastics, [Online]. Available: <https://www.adrecoplastics.co.uk/abs-plastic-properties-and-application/>. [Acesso em 20 Agosto 2019].
- [35] Diffen, "Hardwood vs Softwood," Diffen, [Online]. Available: https://www.diffen.com/difference/Hardwood_vs_Softwood. [Acesso em 12 February 2019].
- [36] M. Hubbe, "Mini-Encyclopedia of Papermaking Wet-End Chemistry," NC State University, [Online]. Available: <https://projects.ncsu.edu/project/hubbepaperchem/FIBR.htm>. [Acesso em 28 Julho 2020].
- [37] CELPA - Associação da Indústria Papeleira, "Boletim Estatístico 2017," CELPA - Associação da Indústria Papeleira, Lisboa, 2018.
- [38] R. A. M. Preto, Estudo experimental do comportamento mecânico de compósitos em fibras de basalto, Lisboa: Técnico de Lisboa, 2013.
- [39] GRANTA, CesEduPack 2017 - Basalt (f), 2017.
- [40] Nealstroy, "Material de basalto retardante de fogo - características e vantagens do produto. Material retardador de fogo basalto rolo," 2019. [Online]. Available: <https://nealstroy.ru/pt/basalt-flame-retardant-material-features-and-product-advantages-material-basaltic-flame-retardant-roll/>. [Acesso em 30 Agosto 2019].
- [41] Castro Composites, "Fibras de reforço - Basalto," Castro Composites, 2019. [Online]. Available: <https://www.castrocompositesshop.com/pt/146-basalto>. [Acesso em 20 Agosto 2019].
- [42] Castro Composites, "Fibras de Reforço - Carbono," Castro Composites, 2019. [Online]. Available: <https://www.castrocompositesshop.com/pt/29-carbono>. [Acesso em 1 Agosto 2019].
- [43] Plastiform, "What's the Difference Between Thermoforming and Injection Molding?," Plastiform - Precision Formed Plastics, 2020. [Online]. Available:

- <https://plastiform-dallas.com/whats-the-difference-between-thermoforming-and-injection-molding/>. [Acesso em 8 Julho 2020].
- EGGER, "Processing Instructions," 10 Janeiro 2016. [Online]. Available:
- [44] http://www.buonmezzi.com/pdf/1_18022_VH_EGGER-Schichtstoffe_EN.pdf. [Acesso em 10 Agosto 2020].
- Intertek, "Thermogravimetric Analysis (TGA) ASTM E1131, ISO 11358," Intertek,
- [45] 2019. [Online]. Available: <https://www.intertek.com/polymers/testlopedia/tga-astm-e1131/>. [Acesso em 25 Setembro 2019].
- [46] R. A. Díaz, Thermal Analysis. Fundamentals and applications to material characterization, Coruña: Universidade da Coruña, 2005.
- [47] S. R.Sousa, Ensaios de micro-caracterização, Porto: Isep, 2019.
- D. A. S. Azevedo, "Sistema para determinação da temperatura de transição vítrea de adesivos," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto,
- [48] 2014.
- [49] J. F. Silva, Introduction to structural composite materials - Thermoplastic matrix composites, Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2017.
- J. F. M. G. d. Silva, Pré-impregnados de matriz termoplástica: Fabrico e transformação por compressão a quente e enrolamento filamentar, Porto:
- [50] Faculdade de Engenharia do Porto, 2005.
- [51] F. Shi e B. Morreale, Novel Materials for Carbon Dioxide Mitigation Technology, Elsevier, 2015.
- G. Fernlund, J. Wells, L. Fahrang, J. Kay e A. Poursartip, Causes and remedies for porosity in composite manufacturing, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016.
- [52]
- [53] ISO, ISO 5636-5:2013 "Paper and board - Determination of air permeance (medium range) - Part 5: Gurley Method, ISO, 2013.
- TAPPI, "Air resistance of paper (Gurley method)," 14 Junho 2006. [Online].
- [54] Available: <https://www.tappi.org/content/sarg/t460.pdf>. [Acesso em 15 Julho 2020].

- SGS-IPS Testing, "ISO 5636-5 Porosity (Gurley)," SGS-IPS Testing, 2020. [Online].
- [55] Available: <https://ipstesting.com/find-a-test/iso-test-methods/iso-5636-5-porosity-gurley/>. [Acesso em 29 Janeiro 2020].
- RedStar, "No.323 GURLEY TYPE DENSOMETER," RedStar, 2015. [Online].
- [56] Available: <http://en.redstarvietnam.com/may-do-do-tham-khi-thu-cong-yasuda-no323.html>. [Acesso em 30 Agosto 2019].
- Perkinelmer, "MP,Tg and Structure of Common Polymers," [Online]. Available:
- [57] https://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/44-74863TCH_MPTGAndStructureOfCommonPolymers.pdf. [Acesso em 01 Janeiro 2020].
- S. K. a. R. Margaraphan, "Thermal and mechanical properties of polylactic acid (PLA) and bagasse carboxymethyl cellulose (CMCB) composite by adding isosorbide diesters," em *AIP Conference Proceedings 1664, 060006*, 2015.
- [58]
- G.F.Brito e E. M. A. T. J. A. M. P. Agrawal, "Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes," *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, vol. v.6.2, pp. 127-139, 2011.
- [59]
- ASTM, ASTM D882 - Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting, ASTM, 2018.
- [60]
- Ingternational Organization for standardization, ISO 527-3:2018 - Plastics - Determination of tensile properties - Part 3: Test conditions for films and sheets, ISO, 2018.
- [61]
- Omnexus, "Polymer Properties," Omnexus, [Online]. Available:
- [62] <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/strength-at-break-tensile>. [Acesso em 31 Janeiro 2020].
- M. S. Rabelo, V. L. Silva, D. P. d. Barros, J. L. Colodette, V. M. Sacon e M. R. d. Silva, "Branqueamento de polpa celulósica kraft de eucalipto com peróxido ácido ativado por molibdênio," 2009. [Online]. Available:
- [63] https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_isoref&pid=S0100-40422009000500002&lng=en&tlng=pt. [Acesso em 30 Janeiro 2020].
- [64] ISO, ISO 14125:1998 - Fibre-Reinforced plastic composites - Determination of flexural properties, ISO, 1998.

- Guangzhou Hongce equipment co.,LTD., "ISO4532 HPL Tester For Resistance To Impact By Small-Diameter Ball With Energy 0~90 N / CM," Guangzhou Hongce equipment co.,LTD., 2020. [Online]. Available:
- [65] <http://www.iectestingequipment.com/sale-10018347-iso4532-hpl-tester-for-resistance-to-impact-by-small-diameter-ball-with-energy-0-90-n-cm.html>. [Acesso em 1 Fevereiro 2020].
- [66] Ces Edupack, PMMA (Impact modified), Ces Edupack, 2017.
Massachusetts Institute of Technology, "Material Property Database - PMMA," Massachusetts Institute of Technology, [Online]. Available:
- [67] http://www.mit.edu/~6.777/matprops/pmma.htm?fbclid=IwAR2DHjvQBj4AvXxlBdEcZuHYHw13TuOmxR7SEft34bijaC8hstG7pEB_gIY. [Acesso em 22 Junho 2020].
- Sonelastic, "Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson de materiais poliméricos," Sonelastic, [Online]. Available:
- [68] <https://sonelastic.com/pt/fundamentos/tabelas-propriedades-materiais/polimeros.html#>. [Acesso em 22 Junho 2020].
- [69] CesEdupack, Paper (cellulose based), CesEdupack.
- [70] CEEdupack, Cardboard, CesEdupack, 2017.
- D. A. Kotz, Ensaios Mecânicos, elétricos e térmicos em piezoresistores de grafite em substratos de papel, Estado do Rio Grande do Sul: Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2019.
- [71]
- [72] D. Zhang, Lightweight Materials from Biofibers and Biopolymers, Washington DC: American Chemical Society, 2014.
- ASTM International, D3163 - Standard Test Method for Determining Strength of Adhesively Bonded Rigid Plastic Lap-Shear Joints in Shear by Tension Loading, ASTM International, 2014.
- [73]
- [74] ASTM International, D1876 - Standard Test Method for Peel Resistance of Adhesives (T-Peel Test), ASTM International, 2015.

ANEXOS

ANEXOS

Nos anexos pode-se encontrar alguns dos dados, a título de exemplo, que foram usados para o desenvolvimento desta tese. Nem todos os dados serão aqui expostos por razões de confidencialidade.

Anexo 1 -Ensaio dos resultados dos ensaios de tração

Anexo 1.1 - Aos papeis kraft

Mondi 160 gsm

Palavra-chave	Nome do produto		
Nome do arquivo do ensaio	Jorge Tex_20190711_1853.xtas	Nome do arquivo do método	Jorge Tex.xmas
Data do relatório	11-07-2019	Data do ensaio	11-07-2019
Modo de ensaio	Simplex	Tipo de ensaio	Tração
Velocidade	5mm/min	Placa	Placa
Lote No:	1	Sub-Lote No:	8

Nome	YP(%FS)_Força	YP(%FS)_Tensão	YP(%FS)_Deslocamento	YP(%FS)_Desloc. da deform.
Parâmetros	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unidade	N	N/mm2	mm	%
1_1	--	--	--	--
1_2	--	--	--	--
1_3	--	--	--	--
1_4	--	--	--	--
1_5	--	--	--	--
1_6	--	--	--	--
1_7	--	--	--	--
1_8	--	--	--	--
Média	--	--	--	--
DesvioPadrão	--	--	--	--
Faixa	--	--	--	--

Nome	YP(%FS)_Deformação	Ruptura_Força	Ruptura_Tensão	Ruptura_Deslocamento
Parâmetros	0,1 %	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10
Unidade	%	N	N/mm2	mm
1_1	--	74,8730	935,912	2,07987
1_2	--	60,1101	751,376	2,06407
1_3	--	73,9145	923,932	1,94563
1_4	--	71,5208	894,010	1,97240
1_5	--	--	--	--
1_6	--	--	--	--
1_7	--	--	--	--
1_8	--	--	--	--
Média	--	70,1046	876,308	2,01549
DesvioPadrão	--	4,45852	55,7316	0,04349
Faixa	--	14,7629	184,536	0,13424

Nome	Ruptura_Desloc. da deform.	Ruptura_Deformação	Máx_Força	Máx_Tensão
Parâmetros	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas
Unidade	%	%	N	N/mm2
1_1	2,07987	2,07987	75,9316	949,144
1_2	2,06407	2,06407	75,4150	942,687
1_3	1,94563	1,94563	74,3198	928,998
1_4	1,97240	1,97240	71,8769	898,461
1_5	--	--	30,4031	380,039
1_6	--	--	28,1858	352,323
1_7	--	--	31,8654	398,318
1_8	--	--	31,5078	393,848
Média	2,01549	2,01549	52,4382	655,477
DesvioPadrão	0,04349	0,04349	23,5177	293,971
Faixa	0,13424	0,13424	47,7458	596,821

Nome	Máx_Deslocamento	Máx_Desloc. da deform.	Máx_Deformação
Parâmetros	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas
Unidade	mm	%	%
1_1	2,04720	2,04720	2,04720
1_2	1,96300	1,96300	1,96300
1_3	1,93063	1,93063	1,93063
1_4	1,95647	1,95647	1,95647
1_5	4,25217	4,25217	4,25217
1_6	3,31063	3,31063	3,31063
1_7	4,20397	4,20397	4,20397
1_8	4,44230	4,44230	4,44230
Média	3,01330	3,01330	3,01330
DesvioPadrão	1,15934	1,15934	1,15934
Faixa	2,51167	2,51167	2,51167

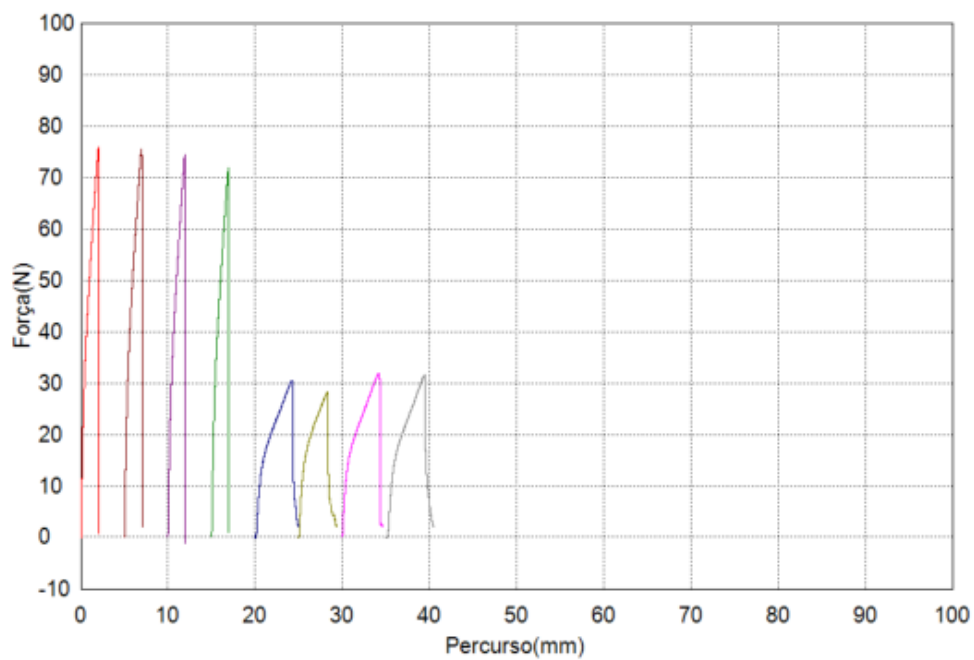


Figura - Anexo 1- Resultados do ensaio de tração fornecidos pelo equipamento

Koktamills 213 gsm

Palavra-chave		Nome do produto	
Nome do arquivo do ensaio	Jorge Tex 20190711_1806.xtas	Nome do arquivo do método	Jorge Tex.xmas
Data do relatório	11-07-2019	Data do ensaio	11-07-2019
Modo de ensaio	Simplex	Tipo de ensaio	Tração
Velocidade	5mm/min	Placa	Placa
Lote No:	1	Sub-Lote No:	8

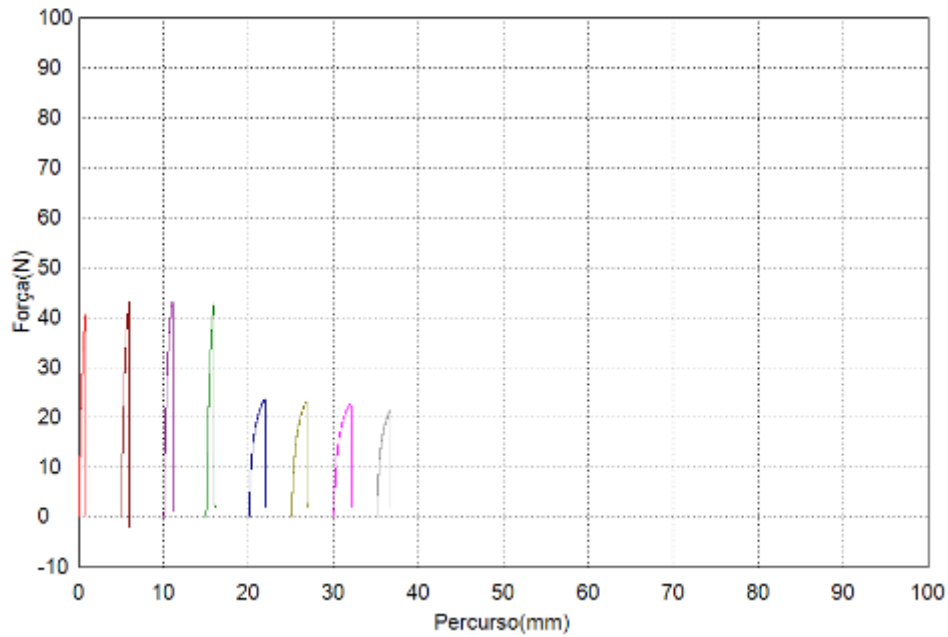
Nome	YP(%FS)_Força	YP(%FS)_Tensão	YP(%FS)_Deslocamento	YP(%FS)_Desloc. da deform.
Parâmetros	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unidade	N	N/mm2	mm	%
1_1	--	--	--	--
1_2	--	--	--	--
1_3	--	--	--	--
1_4	--	--	--	--
1_5	--	--	--	--
1_6	--	--	--	--
1_7	--	--	--	--
1_8	--	--	--	--
Média	--	--	--	--
Desvio Padrão	--	--	--	--
Faixa	--	--	--	--

Nome	YP(%FS)_Deformação	Ruptura_Força	Ruptura_Tensão	Ruptura_Deslocamento
Parâmetros	0,1 %	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10
Unidade	%	N	N/mm2	mm
1_1	--	--	--	--
1_2	--	--	--	--
1_3	--	--	--	--
1_4	--	--	--	--
1_5	--	--	--	--
1_6	--	--	--	--
1_7	--	--	--	--
1_8	--	--	--	--
Média	--	--	--	--
Desvio Padrão	--	--	--	--
Faixa	--	--	--	--

Nome	Ruptura_Desloc. da deform.	Ruptura_Deformação	Máx_Força	Máx_Tensão
Parâmetros	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas
Unidade	%	%	N	N/mm2
1_1	--	--	40,7298	509,123
1_2	--	--	43,0965	538,707
1_3	--	--	43,0012	537,515
1_4	--	--	42,8406	535,508
1_5	--	--	23,5494	294,368
1_6	--	--	23,1059	288,824
1_7	--	--	22,6132	282,665
1_8	--	--	21,1938	264,923
Média	--	--	32,5163	406,454
Desvio Padrão	--	--	10,6312	132,890
Faixa	--	--	21,9027	273,784

Nome	Máx_Deslocamento	Máx_Desloc. da deform.	Máx_Deformação
Parâmetros	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas
Unidade	mm	%	%

1_1	0,79230	0,79230	0,79230
1_2	0,91480	0,91480	0,91480
1_3	1,00557	1,00557	1,00557
1_4	0,96217	0,96217	0,96217
1_5	1,87640	1,87640	1,87640
1_6	1,81143	1,81143	1,81143
1_7	1,96220	1,96220	1,96220
1_8	1,65403	1,65403	1,65403
Média	1,37236	1,37236	1,37236
DesvioPadrão	0,49609	0,49609	0,49609
Faixa	1,16990	1,16990	1,16990



Kraft 220 Hans Schmid

Palavra-chave		Nome do produto	
Nome do arquivo de ensaio	Jorge Tex_20190711_1540.xtas	Nome do arquivo de método	Jorge Tex.xmas
Data do relatório	11-07-2019	Data do ensaio	11-07-2019
Modo de ensaio	Simples	Tipo de ensaio	Tração
Velocidade	5mm/min	Placa	Placa
Lote No:	1	Sub-Lote No:	8

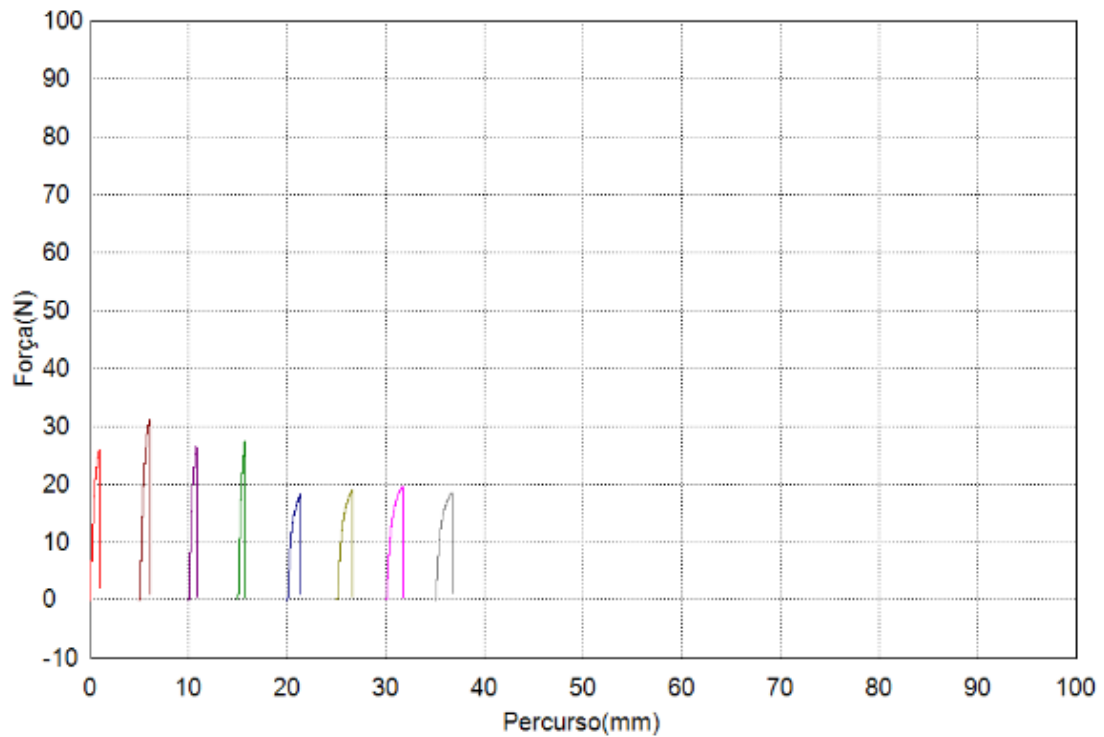
Nome	YP(%FS)_Força	YP(%FS)_Tensão	YP(%FS)_Deslocamento	YP(%FS)_Desloc. da deform.
Parâmetros	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unidade	N	N/mm2	mm	%
1_1	--	--	--	--
1_2	--	--	--	--
1_3	--	--	--	--
1_4	--	--	--	--
1_5	--	--	--	--
1_6	--	--	--	--
1_7	--	--	--	--
1_8	--	--	--	--
Média	--	--	--	--
DesvioPadrão	--	--	--	--
Faixa	--	--	--	--

Nome	YP(%FS)_Deformação	Ruptura_Força	Ruptura_Tensão	Ruptura_Deslocamento
Parâmetros	0,1 %	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10
Unidade	%	N	N/mm2	mm
1_1	--	--	--	--
1_2	--	--	--	--
1_3	--	--	--	--
1_4	--	--	--	--
1_5	--	--	--	--
1_6	--	--	--	--
1_7	--	--	--	--
1_8	--	--	--	--
Média	--	--	--	--
DesvioPadrão	--	--	--	--
Faixa	--	--	--	--

Nome	Ruptura_Desloc. da deform.	Ruptura_Deformação	Máx_Força	Máx_Tensão
Parâmetros	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas
Unidade	%	%	N	N/mm2
1_1	--	--	25,9399	324,249
1_2	--	--	31,2042	390,053
1_3	--	--	26,4502	330,627
1_4	--	--	27,4102	342,627
1_5	--	--	18,1707	227,134
1_6	--	--	18,9575	236,968
1_7	--	--	19,4613	243,266
1_8	--	--	18,4027	230,034
Média	--	--	23,2496	290,620
DesvioPadrão	--	--	5,07274	63,4093
Faixa	--	--	13,0335	162,919

Nome	Máx_Deslocamento	Máx_Desloc. da deform.	Máx_Deformação
Parâmetros	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas
Unidade	mm	%	%

1_1	0,91140	0,91140	0,91140
1_2	0,99057	0,99057	0,99057
1_3	0,75300	0,75300	0,75300
1_4	0,66970	0,66970	0,66970
1_5	1,31823	1,31823	1,31823
1_6	1,58227	1,58227	1,58227
1_7	1,65153	1,65153	1,65153
1_8	1,64390	1,64390	1,64390
Média	1,19008	1,19008	1,19008
DesvioPadrão	0,40856	0,40856	0,40856
Faixa	0,98183	0,98183	0,98183



Mondi 160 gsm

Palavra-chave		Nome do produto	
Nome do arquivo de ensaio	Jorge Tex_20190711_1853.xtas	Nome do arquivo de método	Jorge Tex.xmas
Data do relatório	11-07-2019	Data do ensaio	11-07-2019
Modo de ensaio	Simples	Tipo de ensaio	Tração
Velocidade	5mm/min	Placa	Placa
Lote No:	1	Sub-Lote No:	8

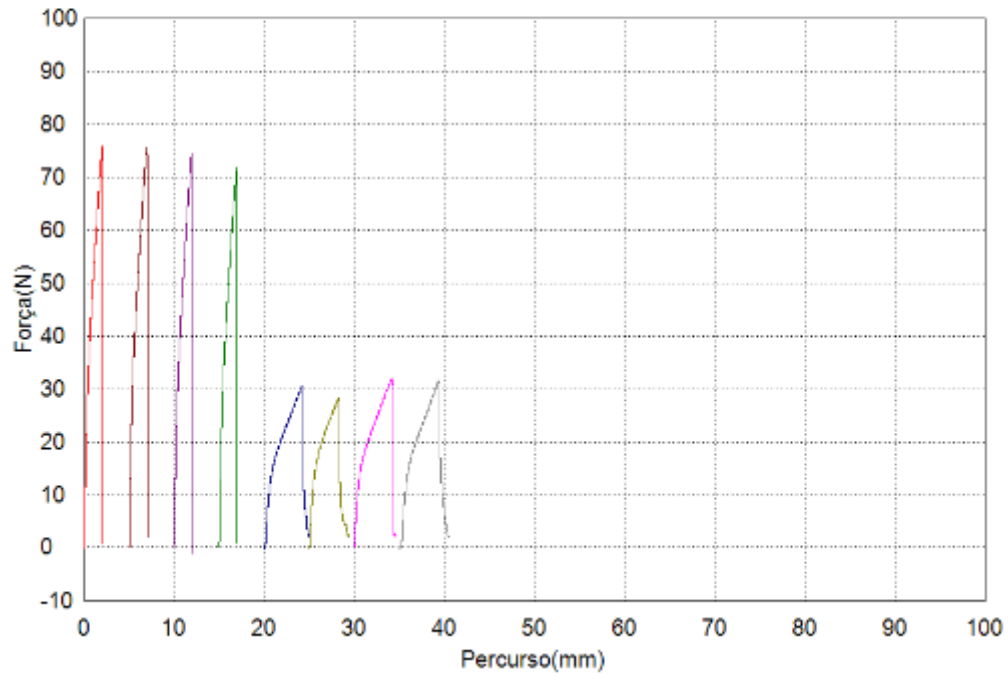
Nome	YP(%FS)_Força	YP(%FS)_Tensão	YP(%FS)_Deslocamento	YP(%FS)_Desloc. da deform.
Parâmetros	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unidade	N	N/mm2	mm	%
1_1	--	--	--	--
1_2	--	--	--	--
1_3	--	--	--	--
1_4	--	--	--	--
1_5	--	--	--	--
1_6	--	--	--	--
1_7	--	--	--	--
1_8	--	--	--	--
Média	--	--	--	--
Desvio Padrão	--	--	--	--
Faixa	--	--	--	--

Nome	YP(%FS)_Deformação	Ruptura_Força	Ruptura_Tensão	Ruptura_Deslocamento
Parâmetros	0,1 %	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10
Unidade	%	N	N/mm2	mm
1_1	--	74,8730	935,912	2,07987
1_2	--	60,1101	751,376	2,06407
1_3	--	73,9145	923,932	1,94563
1_4	--	71,5208	894,010	1,97240
1_5	--	--	--	--
1_6	--	--	--	--
1_7	--	--	--	--
1_8	--	--	--	--
Média	--	70,1046	876,308	2,01549
Desvio Padrão	--	4,45852	55,7316	0,04349
Faixa	--	14,7629	184,536	0,13424

Nome	Ruptura_Desloc. da deform.	Ruptura_Deformação	Máx_Força	Máx_Tensão
Parâmetros	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas
Unidade	%	%	N	N/mm2
1_1	2,07987	2,07987	75,9316	949,144
1_2	2,06407	2,06407	75,4150	942,687
1_3	1,94563	1,94563	74,3198	928,998
1_4	1,97240	1,97240	71,8769	898,461
1_5	--	--	30,4031	380,039
1_6	--	--	28,1858	352,323
1_7	--	--	31,8654	398,318
1_8	--	--	31,5078	393,848
Média	2,01549	2,01549	52,4382	655,477
Desvio Padrão	0,04349	0,04349	23,5177	293,971
Faixa	0,13424	0,13424	47,7458	596,821

Nome	Máx_Deslocamento	Máx_Desloc. da deform.	Máx_Deformação
Parâmetros	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas
Unidade	mm	%	%

1_1	2,04720	2,04720	2,04720
1_2	1,96300	1,96300	1,96300
1_3	1,93063	1,93063	1,93063
1_4	1,95647	1,95647	1,95647
1_5	4,25217	4,25217	4,25217
1_6	3,31063	3,31063	3,31063
1_7	4,20397	4,20397	4,20397
1_8	4,44230	4,44230	4,44230
Média	3,01330	3,01330	3,01330
DesvioPadrão	1,15934	1,15934	1,15934
Faixa	2,51167	2,51167	2,51167



Anexo 1.2 - Aos polímeros

Ao PMMA (5mm/min)

Palavra-chave		Nome do produto	
Nome do arquivo de ensaio	Jorge Tex_20190711_1218.xtas	Nome do arquivo de método	Jorge Tex.xtas
Data do relatório	11-07-2019	Data do ensaio	11-07-2019
Modo de ensaio	Simplex	Tipo de ensaio	Tração
Velocidade	5mm/min	Placa	Placa
Lote No:	1	Sub-Lote No:	8

Nome	YP(%FS)_Força	YP(%FS)_Tensão	YP(%FS)_Deslocamento	YP(%FS)_Desloc. da deform.
Parâmetros	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unidade	N	N/mm2	mm	%
1_1	--	--	--	--
1_2	--	--	--	--
1_3	--	--	--	--
1_4	--	--	--	--
1_5	--	--	--	--
1_6	--	--	--	--
1_7	--	--	--	--
1_8	--	--	--	--
Média	--	--	--	--
Desvio Padrão	--	--	--	--
Faixa	--	--	--	--

Nome	YP(%FS)_Deformação	Ruptura_Força	Ruptura_Tensão	Ruptura_Deslocamento
Parâmetros	0,1 %	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10
Unidade	%	N	N/mm2	mm
1_1	--	--	--	--
1_2	--	--	--	--
1_3	--	--	--	--
1_4	--	--	--	--
1_5	--	--	--	--
1_6	--	--	--	--
1_7	--	--	--	--
1_8	--	--	--	--
Média	--	--	--	--
Desvio Padrão	--	--	--	--
Faixa	--	--	--	--

Nome	Ruptura_Desloc. da deform.	Ruptura_Deformação	Máx_Força	Máx_Tensão
Parâmetros	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas
Unidade	%	%	N	N/mm2
1_1	--	--	11,1659	139,574
1_2	--	--	10,1360	126,700
1_3	--	--	10,5063	131,329
1_4	--	--	11,7954	147,442
1_5	--	--	12,6966	158,707
1_6	--	--	11,0992	138,740
1_7	--	--	10,1280	126,600
1_8	--	--	12,4788	155,985
Média	--	--	11,2508	140,635
Desvio Padrão	--	--	0,99877	12,4845
Faixa	--	--	2,56860	32,1070

Palavra-chave		Nome do produto	
Nome do arquivo de ensaio	Jorge Tex_20190711_1218.xtas	Nome do arquivo de método	Jorge Tex.xmas
Data do relatório	11-07-2019	Data do ensaio	11-07-2019
Modo de ensaio	Simplex	Tipo de ensaio	Tração
Velocidade	5mm/min	Placa	Placa
Lote No:	1	Sub-Lote No:	8

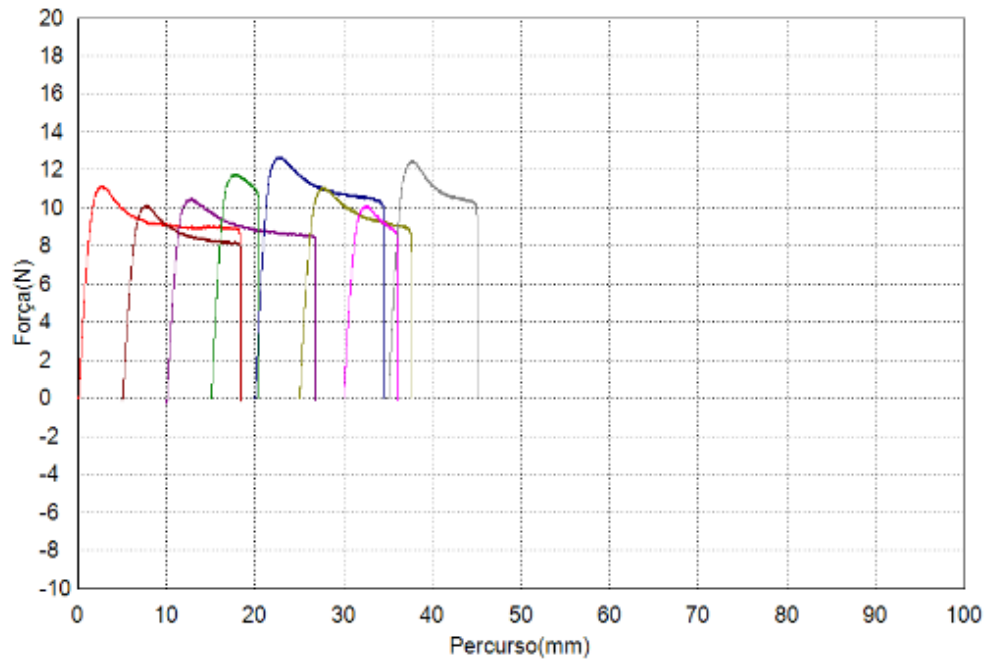
Nome	YP(%FS)_Força	YP(%FS)_Tensão	YP(%FS)_Deslocamento	YP(%FS)_Desloc. da deform.
Parâmetros	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unidade	N	N/mm2	mm	%
1_1	--	--	--	--
1_2	--	--	--	--
1_3	--	--	--	--
1_4	--	--	--	--
1_5	--	--	--	--
1_6	--	--	--	--
1_7	--	--	--	--
1_8	--	--	--	--
Média	--	--	--	--
Desvio Padrão	--	--	--	--
Faixa	--	--	--	--

Nome	YP(%FS)_Deformação	Ruptura_Força	Ruptura_Tensão	Ruptura_Deslocamento
Parâmetros	0,1 %	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10
Unidade	%	N	N/mm2	mm
1_1	--	--	--	--
1_2	--	--	--	--
1_3	--	--	--	--
1_4	--	--	--	--
1_5	--	--	--	--
1_6	--	--	--	--
1_7	--	--	--	--
1_8	--	--	--	--
Média	--	--	--	--
Desvio Padrão	--	--	--	--
Faixa	--	--	--	--

Nome	Ruptura_Desloc. da deform.	Ruptura_Deformação	Máx_Força	Máx_Tensão
Parâmetros	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas
Unidade	%	%	N	N/mm2
1_1	--	--	11,1659	139,574
1_2	--	--	10,1360	126,700
1_3	--	--	10,5063	131,329
1_4	--	--	11,7954	147,442
1_5	--	--	12,6966	158,707
1_6	--	--	11,0992	138,740
1_7	--	--	10,1280	126,600
1_8	--	--	12,4788	155,985
Média	--	--	11,2508	140,635
Desvio Padrão	--	--	0,99877	12,4845
Faixa	--	--	2,56860	32,1070

Nome	Máx_Deslocamento	Máx_Desloc. da deform.	Máx_Deformação
Parâmetros	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas
Unidade	mm	%	%

1_1	2,67387	2,67387	2,67387
1_2	2,77140	2,77140	2,77140
1_3	2,87397	2,87397	2,87397
1_4	2,94313	2,94313	2,94313
1_5	2,93557	2,93557	2,93557
1_6	2,67137	2,67137	2,67137
1_7	2,49397	2,49397	2,49397
1_8	2,71303	2,71303	2,71303
Média	2,75954	2,75954	2,75954
DesvioPadrão	0,15387	0,15387	0,15387
Faixa	0,44916	0,44916	0,44916



Ao PMMA (25mm/min)

Nome do produto	g	Nome do arquivo do método	Jorge-flexcomp.xmas
Operador	Paula Venda	Data do ensaio	06-03-2019
Modo de ensaio	Simplex	Tipo de ensaio	Tração
Velocidade	25mm/min	Lotc No:	1
Sub-Lote No:	10		

Nome	Máx_Força	Máx_Tensão	Máx_Deslocamento	Máx_Desloc. da deform.
Parâmetros	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas
Unidade	N	N/mm2	mm	%
1_1	19,5789	42,8892	3,27677	6,55353
1_2	16,6559	36,4861	2,45567	4,91133
1_3	14,0079	30,6854	1,69740	3,39480
1_4	17,9974	39,4248	3,05610	6,11220
1_5	16,5494	36,2529	2,84750	5,69500
1_5	17,1185	37,4994	2,87253	5,74507
1_5	15,9756	34,9959	2,59327	5,18653
1_5	17,1471	37,5620	3,19333	6,38667
Média	16,8788	36,9745	2,74907	5,49814
DesvioPadrão	1,59854	3,50174	0,50870	1,01739
Máximo	19,5789	42,8892	3,27677	6,55353
Mínimo	14,0079	30,6854	1,69740	3,39480
Faixa	5,57100	12,2038	1,57937	3,15873
Média	16,8872	36,9928	2,86002	5,72004

Nome	Máx Percurso	YS1_Força	YS1_Tensão	YS1_Deslocamento
Parâmetros	Cálculo de áreas completas	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unidade	mm	N	N/mm2	mm
1_1	3,27677	--	--	--
1_2	2,45567	--	--	--
1_3	1,69740	--	--	--
1_4	3,05610	--	--	--
1_5	2,84750	--	--	--
1_5	2,87253	--	--	--
1_5	2,59327	--	--	--
1_5	3,19333	--	--	--
Média	2,74907	--	--	--
DesvioPadrão	0,50870	--	--	--
Máximo	3,27677	--	--	--
Mínimo	1,69740	--	--	--
Faixa	1,57937	--	--	--
Média	2,86002	--	--	--

Nome	YP(%FS)_Força	YP(%FS)_Deslocamento	YP(%FS)_Desloc. da deform.	Ruptura_Força
Parâmetros	0,1 %	0,1 %	0,1 %	Sensibilidade: 10
Unidade	N	mm	%	N
1_1	--	--	--	--
1_2	--	--	--	--
1_3	--	--	--	--
1_4	--	--	--	--
1_5	--	--	--	--
1_5	--	--	--	--
1_5	--	--	--	--
1_5	--	--	--	--
Média	--	--	--	--
DesvioPadrão	--	--	--	--
Máximo	--	--	--	--
Mínimo	--	--	--	--

Faixa	--	--	--	--
Média	--	--	--	--

Nome	Ruptura_Tensão	Ruptura_Deslocamento	Ruptura_Desloc. da deform.	Ruptura_Percurso
Parâmetros	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10
Unidade	N/mm2	mm	%	mm
1_1	--	--	--	--
1_2	--	--	--	--
1_3	--	--	--	--
1_4	--	--	--	--
1_5	--	--	--	--
1_5	--	--	--	--
1_5	--	--	--	--
1_5	--	--	--	--
Média	--	--	--	--
DesvioPadrão	--	--	--	--
Máximo	--	--	--	--
Mínimo	--	--	--	--
Faixa	--	--	--	--
Média	--	--	--	--

Nome	Max_Displ_Força	Espessura	Mín_Força	Elástico
Parâmetros			Cálculo de áreas completas	Força 10 – 20 N
Unidade	N	mm	N	N/mm2
1_1	-0,0540	0,0913	-0,0747	--
1_2	-0,1685	0,0913	-0,1685	--
1_3	-0,2591	0,0913	-0,2702	--
1_4	-0,0032	0,0913	-0,0620	--
1_5	0,04450	0,0913	-0,0111	--
1_5	0,03656	0,0913	-0,0461	--
1_5	0,01748	0,0913	-0,0111	--
1_5	0,01589	0,0913	-0,0413	--
Média	-0,0463	0,0913	-0,0856	--
DesvioPadrão	0,11031	0,00000	0,08964	--
Máximo	0,04450	0,0913	-0,0111	--
Mínimo	-0,2591	0,0913	-0,2702	--
Faixa	0,30360	0,00000	0,25910	--
Média	0,00635	0,0913	-0,0541	--

Anexo 1.3 - Fibras celulósicas + matriz polimérica

Tabela - Anexo 1 – Exemplo do cálculo do ensaio de tração para comparação de parâmetros de prensagem

Provete	Papel	Gramagem (g/m ²)	Polimero	Espessura (mm)	Largura (mm)	Ciclo de prensagem	Força (N)	Tensão normal (MPa)	Força/(largura*gramagem)
1	8	213	Pmma	0,49	18,43	1	314,70	34,61	80,17
2	8	213	Pmma	0,50	19,11	1	322,19	33,73	79,17
3	8	213	Pmma	0,60	18,67	1	318,13	28,56	80,00
4	8	213	Pmma	0,49	19,88	1	319,38	32,56	75,42
5	8	213	Pmma	0,51	19,39	1	320,63	32,42	77,62
1	8	213	Pmma	0,45	20,15	2	Fissurou aquando da colocação em teste		
2	8	213	Pmma	0,43	20,84	2	445,63	49,35	100,41
3	8	213	Pmma	0,41	20,78	2	413,44	48,53	93,41
4	8	213	Pmma	0,50	21,16	2	460,31	43,79	102,11
5	8	213	Pmma	0,51	20,08	2	399,06	38,97	93,32
1	6	220	Pmma	0,49	19,81	1	255,00	26,27	58,52
2	6	220	Pmma	0,50	20,35	1	233,75	22,97	52,21
3	6	220	Pmma	0,49	20,10	1	218,75	22,06	49,46
4	6	220	Pmma	0,51	19,48	1	246,25	24,78	57,45
5	6	220	Pmma	0,62	19,26	1		0,00	0,00

Anexo 2 - Exemplo de cálculo dos ensaios de flexão (com base na norma ISO 14125)

Antes de realizar o ensaio foi necessário estudar a norma para que os ensaios podem ser validados teoricamente pela mesma. Foi preciso medir o comprimento (l), a largura (b) e a espessura dos provetes (h). Para a medição do comprimento e da largura recorreu-se a um paquímetro e para a espessura um micrómetro. O comprimento médio dos provetes foi de 150 mm, a largura média de 25mm. A espessura era variável [1;3] milímetros, pois seria alvo de estudo. A velocidade arbitrada para o ensaio foi de 2 mm/min (v). O método A foi o escolhido para ser aplicado nesta bateria de ensaios (o método A é o ensaio de flexão a três apoios). O valor de “span”(L), que é o valor entre apoios e tomou o valor de 80 mm. Na Figura - Anexo 2 pode-se ver um dos ensaios de flexão realizados.

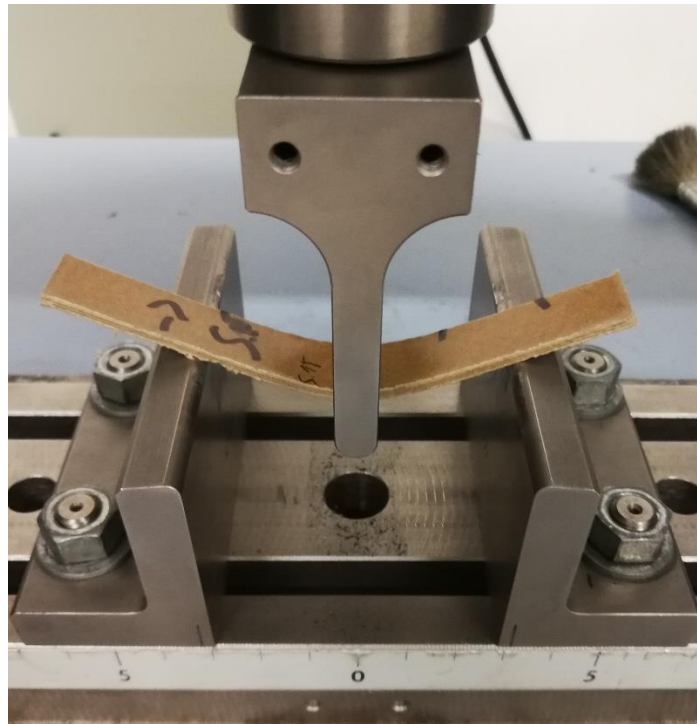


Figura - Anexo 2 – Imagem representativa dos ensaios de flexão

No que diz respeito ao tratamento de resultados, começa-se por achar a resistência à flexão através da seguinte equação:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Equação A 1

Onde:

σ_f – Resistência à flexão (MPa)

F – Força (N)

L – *span* (mm)

h – espessura do provete (mm)

b – largura do provete

A título de exemplo:

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot 25,034 \cdot 80,0}{227,32 \cdot 1,58^2} = 43,9 \text{ MPa} \quad \text{Equação A 2}$$

Como a deflexão do provete é muito grande ($> 0,1 \cdot L$), é necessário fazer uma correção do valor obtido na Equação A 2. Assim tem que se aplicar a seguinte equação:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \left(1 + 6 \cdot \left(\frac{s}{L} \right)^2 - 3 \left(\frac{sh}{L^2} \right) \right) \quad \text{Equação A 3}$$

Onde:

S – *beam mid point deflection* em mm

Assim vem que:

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot 25,034 \cdot 80,0}{227,32 \cdot 1,58^2} \left(1 + 6 \cdot \left(\frac{15,2503}{80,0} \right)^2 - 3 \left(\frac{15,2503 \cdot 1,58}{80,0^2} \right) \right) = 53,0 \text{ MPa} \quad \text{Equação A 4}$$

Para o cálculo do módulo, é necessário usar a seguinte equação:

$$E_f = \frac{L^3}{4bh^2} \left(\frac{\Delta F}{\Delta s} \right) \quad \text{Equação A 5}$$

Onde:

E_f - Módulo elástico de flexão em MPa

Δs - Diferença de deflexão de s'' para s'

ΔF - Diferença de força em S'' e s'

Para calcular s' e s'' vai -se pela seguinte equação:

$$s' = \frac{\varepsilon_f' L^2}{6h} \text{ e } s'' = \frac{\varepsilon_f'' L^2}{6h} \quad \text{Equação A 6}$$

Onde:

ε'_f – deformação de valor igual a 0,0005

ε''_f – deformação de valor igual a 0,0025

A título de exemplo:

$$s' = \frac{0,0005 \cdot 80,0^2}{6 \cdot 1,58} = 0,3 \text{ e } s'' = \frac{0,0025 \cdot 80,0^2}{6 \cdot 1,58} = 1,7 \quad \text{Equação A 7}$$

Para estas defleções procura-se a força correspondente no ensaio. Pode ser feito diretamente por leitura direta, ou construir um gráfico força vs flecha e verificar no intervalo de s' e s'' e verificar qual é o declive da reta desse gráfico. A título de exemplo:

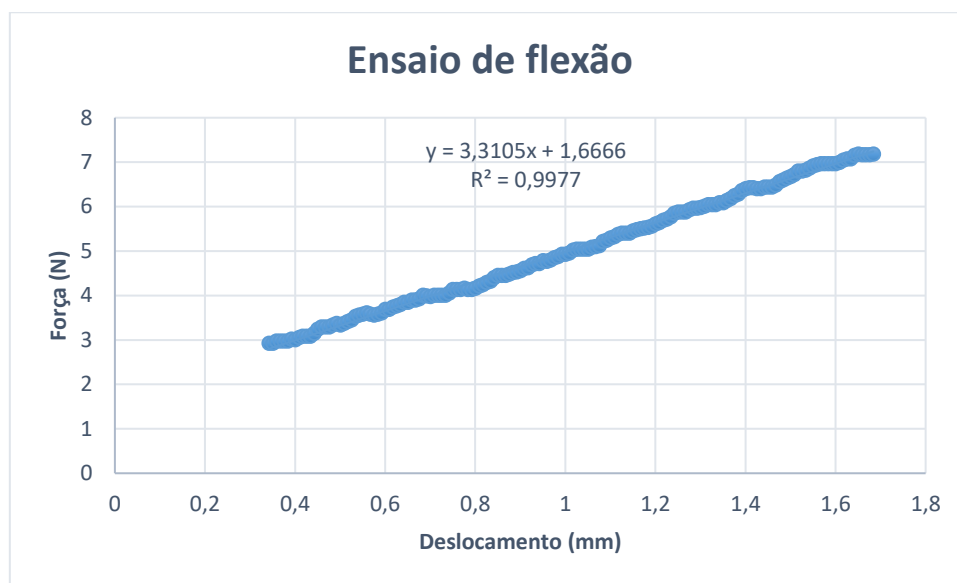


Figura - Anexo 3 – Gráfico exemplo da recta compreendida entre s' e s''

O declive da recta representa $\left(\frac{\Delta F}{\Delta s}\right)$ que neste exemplo corresponde a 3,3105 N/mm.

Assim vem que a Equação A 5 se aplica da seguinte forma:

$$E_f = \frac{80,0^3}{427,32 \cdot 1,58^2} * 3,3105 = 3913,3 \text{ MPa} \quad \text{Equação A 8}$$