



Projecto

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

***Estudo comparativo das propriedades físicas e
mecânicas entre a madeira e o Prodelix***

Pedro Miguel Mónico Barreiro

Leiria, Setembro de 2015

Agradecimentos

Agradeço à empresa Vasconcept pelo projeto que me foi entregue e de ter disponibilizado os recursos necessários para a obtenção dos provetes, assim como a possibilidade que proporcionaram de acompanhar uma grande parte do processo de produção.

Agradeço aos meus orientadores, professor Luís Coelho e professor Carlos Capela, por me direccionarem e aconselharem ao longo do projecto.

Agradeço ao Engenheiro Carlos Dias pela paciência e disponibilidade na realização dos ensaios mecânicos e físicos.

Agradeço aos meus colegas e amigos, Cátia Gomes, Paula Ferreira e Pedro Garrido por acompanharem e ajudarem ao longo de todo o processo de redigir este relatório de projecto.

Agradeço a todos os meus amigos mais próximos pela força dada para ir até ao fim e dar o meu melhor.

Agradeço aos meus pais, José Salvador e Maria de Fátima, por serem o pilar de toda a minha vida académica, pela força, motivação e inspiração.

Um bem-haja a todos! Muito Obrigado!

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

O lixo é um dos grandes problemas da sociedade actual, a sua reutilização é fulcral para um futuro sustentado do planeta e, como tal, novos materiais produzidos a partir de lixo, nomeadamente plásticos, são uma solução viável. Outro tema muito falado é a desflorestação e os problemas associados ao abate das árvores. Por forma a aprofundar os conhecimentos sobre a utilização da madeira e dos polímeros foi realizado uma revisão bibliográfica sobre estes temas.

Foi produzido uma feira para extrudir provetes de um material que resultou de uma mistura de lixo, nomeadamente PVC, PEAD, uma mistura de plásticos mistos, Tetra Pak e pó de pedra, que serviu de reforço.

Foram realizados ensaios físicos e mecânicos ao material compósito e à madeira (pinus pinaster) e uma comparação directa para material de substituição em paletes.

Palavras-chave: lixo, madeira, prodelix, compósitos, extrusão, caracterização de materiais.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

Waste is one of the problems in nowadays society, it's reuse is critical for sustained future of the planet and, as such, new materials produced from waste, particularly plastics, are a viable solution. Another issue talked as a problem is deforestation and the problems associated with logging of trees. In order to deepen knowledge on the use of wood and polymers, was carried out a literature review on these topics.

It was produced a die for extruding samples resulting from a mixture of waste, in particular PVC, HDPE, a mixture of mixed plastics, Tetra Pak and stone dust which served as a reinforcement.

It were carried out physical and mechanical tests to composite material and wood (*Pinus pinaster*) and it were discussed the results for replacement of wood on pallets.

Key-Words: *garbage, wood, prodelix, composites, extrusion, Characterisation of materials.*

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice de Figuras

Figura 1: Vista da secção transversal de um tronco (Wood Handbook - Wood as an Engineering Material, 2010).....	3
Figura 2: Representação dos eixos na madeira (Smith, 1990).....	4
Figura 3: representação do descaio (Commonwealth, 2012).....	5
Figura 4: território ocupado por pinheiro bravo (Oliveira, Moura, Pinto, & Providência, 1999).....	6
Figura 5: Tipos de reforços: a) Fibras contínuas; b) Fibras descontínuas e cristais alongados; c) Partículas; d) Tecidos (Kutz, 2006).	8
Figura 6: Estrutura dos elastómeros (Lima)	10
Figura 7: Estrutura dos a) termoplásticos; b) e dos termoendurecíveis (Lima).....	11
Figura 8: Propagação da reacção (Lima)	11
Figura 9: Símbolos utilizados na marcação dos plásticos (PLASTVAL, 2008)	13
Figura 10: Tetra pak	16
Figura 11: Separador por densidades (desenhado pelo autor e produzido pela Vasconcept).....	18
Figura 12: Misturador (desenhado pelo autor e produzido pela Vasconcept).....	19
Figura 13: Extrusora (desenhado pelo autor e produzido pela Vasconcept).....	20
Figura 14: Puxo e corte (desenhado pelo autor e produzido pela Vasconcept).....	21
Figura 15: Sistema de refrigeração (desenhado pelo autor e produzido pela Vasconcept).....	22
Figura 16: Balança Mettler Toledo AG204	24
Figura 17: a) representação esquemática do carregamento em flexão; b) geometria do provete. 25	
Figura 18: Ensaio à flexão de um provete de material compósito Prodelix	26
Figura 19: a) representação esquemática do ensaio à compressão; b) geometria dos provetes.	29
Figura 20: Ensaio de compressão com um provete em material Prodelix.....	29
Figura 21: Provetes de madeira utilizados nos ensaios de compressão: a) com anéis alinhados perpendicularmente à aplicação da carga; b) com anéis alinhados paralelamente à força.....	30
Figura 22: Durómetro Bareiss analógico	31
Figura 23: Gráfico comparativo da densidade dos materiais em estudo	34
Figura 24: Curvas típicas de tensão versus deslocamento para os materiais considerados neste estudo.....	35
Figura 25: Resultados dos módulos de elasticidade à flexão dos materiais ensaiados.	35
Figura 26: Curvas típicas da tensão versus extensão para os diferentes materiais: compósito e madeira (anéis paralelos e perpendiculares).....	37
Figura 27: Resultados dos módulos de elasticidade à compressão dos diferentes materiais ensaiados: madeira e compósito processado	37
Figura 28: Provetes ensaiados à compressão	38

Índice de Tabelas

Tabela 1: Características mecânicas do pinus pinaster (Carballo, Hermoso , & Fernández-Golfín, 2009).....	7
Tabela 2: Classificação dos materiais compósitos (Berthelot, 1999)	9
Tabela 3: Composição utilizada no fabrico do compósito	23
Tabela 4: Materiais e dimensões dos provetes utilizados nos ensaios de flexão	27
Tabela 5: Materiais e dimensões dos provetes utilizados nos ensaios à compressão.....	30
Tabela 6: Resultados da medição da densidade dos dois materiais considerados neste estudo....	33
Tabela 7: Resultados dos ensaios de flexão realizados com o material compósito processado e a madeira	34
Tabela 8: Resultados dos ensaios de compressão realizados com o compósito e a madeira (anéis perpendiculares e paralelos).....	36
Tabela 9: Valores de durezas (Shore D) obtidos com o material compósito.	38

Lista de Siglas

CCC – Compósito de carbono-carbono

CMC – Compósito de matriz cerâmica

CMM – Compósito de matriz metálica

CMP – Compósito de matriz polimérica

ETARI – Estação de tratamento de águas residuais industriais

PEAD – Polietileno de alta densidade

PEBD – Polietileno de baixa densidade

PET – Politereftalato de etileno

PVC – Policloreto de vinilo

REEE – Resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos

RSU – Resíduos sólidos urbanos

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABELAS	VIII
LISTA DE SIGLAS	IX
ÍNDICE	XI
CAPÍTULO I	1
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJECTIVOS	1
1.2 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO	1
CAPÍTULO II	3
2 REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1 INTRODUÇÃO	3
2.2 MADEIRA	3
2.2.1 DIVERSIDADE DA MADEIRA	4
2.2.2 DEFEITOS DA MADEIRA	5
2.2.3 PINHO BRAVO (PINUS PINASTER)	5
2.3 COMPÓSITOS	7
2.3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS	7
2.3.2 COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORÇADA COM PARTÍCULAS	9
2.3.3 POLÍMEROS	10
2.3.4 MISCIBILIDADE DOS POLÍMEROS	11
2.3.5 RECICLAGEM	12
CAPÍTULO III	15
3 PROCESSO DE FABRICO DO PRODELIX	15
3.1 INTRODUÇÃO AO MATERIAL EM ESTUDO	15
3.2 PROCESSO DE FABRICO	16
3.2.1 PREPARAÇÃO DO LIXO	16
3.2.2 PREPARAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS VIRGENS	17
3.2.3 LAVAGEM DE MATÉRIAS-PRIMAS	17
3.2.4 SEPARAÇÃO DOS MATERIAIS	17
3.2.5 PREPARAÇÃO DA MISTURA PARA PRODUÇÃO DO PRODELIX	19

3.2.6	PROCESSO DE EXTRUSÃO.....	19
CAPÍTULO IV.....		23
4	MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	23
4.1	INTRODUÇÃO.....	23
4.2	MATERIAIS	23
4.2.1	PRODELIX.....	23
4.2.2	MADEIRA (PINUS PINASTER).....	24
4.3	MEDIÇÃO DE DENSIDADE.....	24
4.4	ENSAIOS MECÂNICOS	25
4.4.1	ENSAIOS DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS.....	25
4.4.2	ENSAIOS DE COMPRESSÃO.....	29
4.4.3	ENSAIOS DE DUREZA.....	31
CAPÍTULO V.....		33
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	33
5.1	INTRODUÇÃO	33
5.2	RESULTADOS DA MEDIÇÃO DA DENSIDADE.....	33
5.3	ENSAIOS DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS	34
5.4	RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO	35
5.5	RESULTADOS DA DUREZA	38
CAPÍTULO VII.....		39
6	CONCLUSÃO	39
6.1	TRABALHOS FUTUROS.....	39
BIBLIOGRAFIA		41
ANEXOS.....		45
ANEXO A – PROPRIEDADES DO PVC E DO PEAD		46
ANEXO B – DENSIDADE DA ÁGUA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.....		47

1 Introdução

1.1 Objectivos

O objectivo geral é comparar as propriedades mecânicas do Prodelix[®] com a madeira de forma a concluir se é possível a substituição em paletes.

Os esforços aplicados numa paleta, por norma, são o de compressão, no caso dos tacos, e o de flexão no caso das tábuas, como tal, o foco principal na comparação entre ambos os materiais incide sobre o comportamento mecânico destes dois casos.

Outro aspecto relevante no manuseamento da paleta é o seu peso. Muitas destas paletes são manuseadas por porta-paletes, empilhadores ou outras máquinas industriais, mas para o transporte a massa é um factor importante.

1.2 Estrutura e organização

Este trabalho está dividido em seis capítulos. No primeiro capítulo são apresentados o tema e os principais objectivos do projecto.

No segundo capítulo é apresentado uma revisão bibliográfica dos materiais envolvidos no estudo: a madeira e os compósitos poliméricos; onde são abordados os conceitos básicos e conceitos de reciclagem.

No terceiro capítulo é apresentado o processo de fabrico do Prodelix, do compósito em estudo, desde o momento que entra no ciclo como matéria-prima até sair o produto final.

O quarto capítulo tem respeito aos materiais utilizados, equipamentos e procedimentos experimentais.

No quinto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios e medições referidos no capítulo quatro, nomeadamente, os ensaios de compressão e flexão, densidade e dureza da madeira e do compósito em estudo.

No sexto capítulo são apresentadas as considerações finais, conclusões e trabalhos futuros.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

2 Revisão da literatura

2.1 Introdução

Muitos materiais utilizados em inúmeras aplicações de engenharia, estão a ser substituídos por “novos materiais” para responder à forte procura do mercado de produtos cada vez mais leves e com melhores propriedades mecânicas. Os avanços da tecnologia, nomeadamente dos computadores e da internet, permitiram que o conhecimento sobre as propriedades dos materiais fosse armazenado em bases de dados e partilhados ao mundo (Jee & Kang, 1999).

Neste capítulo vai ser abordado o estado da arte dos dois materiais em estudo: a madeira, um material amplamente utilizado desde sempre, e a sua evolução nos últimos anos; e os compósitos, que são o ponto de partida para um novo material ainda em desenvolvimento, o Prodelix.

2.2 Madeira

A madeira é um material orgânico, formado por uma matéria heterógena e anisotrópica (uma certa propriedade física varia com a direcção) , proveniente das árvores.

A madeira é constituída por elementos celulares com direcção predominantemente longitudinal, diferenciados pela função que desempenham. A estrutura anatómica é a “impressão digital” de cada espécie, podendo variar, não só de espécie para espécie, mas derivado ao ambiente redondante e à idade. Na Figura 1 é apresentado a secção transversal de um tronco onde se pode visualizar a estrutura e os raios lenhosos, ou os anéis de crescimento (Cruz & Nunes, 2007).



Figura 1: Vista da secção transversal de um tronco (Wood Handbook - Wood as an Engineering Material, 2010)

Os anéis de crescimento indicam a idade da árvore e são um factor importante no estudo da anisotropia da madeira. Posto isto, é importante definir um eixo que correlacione a direcção da árvore com a sua microestrutura como representado na Figura 2 (Smith, 1990).

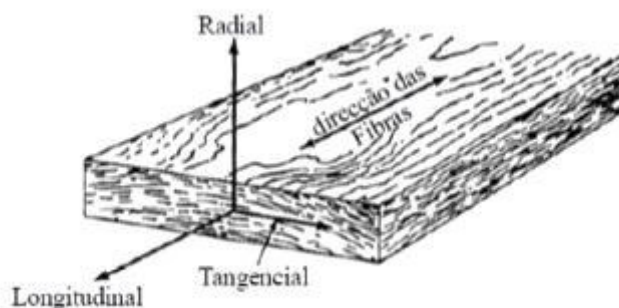


Figura 2: Representação dos eixos na madeira (Smith, 1990)

A composição da parede celular da madeira, nomeadamente a celulose, a hemicelulose e a hidroxila, tornam as células higroscópicas (com tendência para absorver água). No entanto, o elemento ligante das células, a lignina, é uma molécula hidrofóbica comparativamente com as anteriores. Por outras palavras, a parede celular tem uma grande capacidade de absorção de água mas está limitada pela presença da lignina. A água tem um grande impacto nas propriedades da madeira e afecta fortemente a sua utilização em meio industrial (Wood Handbook - Wood as an Engineering Material, 2010). Para além destas propriedades comuns a todas as espécies de plantas lenhosas, a madeira é inflamável quando apresenta baixo teor de humidade e pode sofrer de ataques xilófagos, como fungos e insectos.

2.2.1 Diversidade da madeira

A quantidade de diferentes espécies de plantas lenhosas amplia o leque de escolha na selecção de qual madeira utilizar para determinada aplicação, devido à existência de madeiras pouco resistentes e de pouca durabilidade, como a balsa, e muito resistentes e com durabilidades elevadas, como o pau santo (Cruz & Nunes, 2007).

As árvores são classificadas em duas grandes categorias, as gimnospermas e as angiospermas, vulgarmente denominadas de resinosas (*softwoods*) e folhosas (*hardwoods*), respectivamente. Em traços gerais as madeiras resinosas apresentam propriedades físicas inferiores às folhosas, existindo algumas excepções (Smith, 1990). As diferenças entre os dois grupos são: a sua estrutura anatómica, dos quais as folhosas apresentam vasos comunicantes por onde é transportado os bens essenciais para a sobrevivência da árvore e,

portanto, consideradas porosas e as resinosas, por outro lado, são não porosas; a forma como se reproduzem, dos quais as folhosas protegem as suas sementes no ovário de flores ou frutos, enquanto que nas resinosas isso não se verifica; e a folhagem, dos quais as folhosas apresentam largas folhas que, na maioria dos casos, caem na época do Outono ou Inverno (folhas caduca), enquanto que as resinosas apresentam folha persistente (Wood Handbook - Wood as an Engineering Material, 2010).

2.2.2 Defeitos da madeira

Os tipos de defeitos e a sua distribuição são factores para a determinação da qualidade da madeira. Os defeitos mais significativos são: os nós, o fio inclinado, as fendas e o descaio (Cruz & Nunes, 2007).

Os nós correspondem à base de um ramo inserida no tronco da árvore. A forma do nó depende da orientação do corte da madeira em relação ao ramo. A direcção das fibras dos nós são aproximadamente perpendiculares às fibras do tronco, o que influencia as propriedades mecânicas salientando, assim, a anisotropia da madeira.

O fio inclinado surge quando existe um ângulo entre a direcção geral dos fios e o eixo longitudinal da peça. Este defeito pode advir de um crescimento curvado do tronco ou de uma serragem oblíqua. As desvantagens deste tipo de defeito prendem-se com o desvio das condições ideais de aplicação de esforços paralelamente ao fio da madeira (secção longitudinal).

As fendas criam descontinuidade na madeira e a sua influência nas propriedades mecânicas variam consoante a dimensão, a localização, a direcção da aplicação da força e da junção de outros defeitos. As fendas podem surgir através de secagens bruscas com elevados gradientes de teor de água, criando fendas que são desenvolvidas a partir da periferia do tronco para o meio. Podem também surgir com o crescimento devido a forças de flexão elevadas, como ventos fortes.

O descaio é um defeito de produção que se caracteriza por falta de madeira quando cortado o tronco como é mostrado na Figura 3.

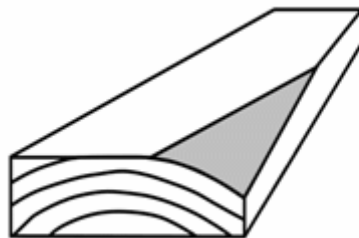


Figura 3: representação do descaio (Commonwealth, 2012)

2.2.3 Pinho Bravo (*Pinus Pinaster*)

O pinheiro bravo (*Pinus Pinaster*) é uma espécie resinosa que pode atingir os 40 metros de altura e apresenta uma copa caracteristicamente piramidal. Esta é uma das espécies

de árvores predominantes em Portugal continental, apenas precedido pelo eucalipto e pelo sobreiro (Figueiredo, et al.). Conforme mostra a Figura 4 o território ocupado por pinheiro bravo, tendo por base o clima, o solo, a altitude e a existência da espécie, é o norte e centro do país.



Figura 4: território ocupado por pinheiro bravo (Oliveira, Moura, Pinto, & Providência, 1999)

Apesar de poder chegar aos 200 anos de idade, o pinheiro bravo não costuma ultrapassar os 80 a 100 anos. O ciclo de vida até poder ser cortado oscila entre os 30 a 35 anos na Galiza, entre os 40 a 50 anos no pinhal privado português e os 60 a 70 anos na região de Leiria (Oliveira, Moura, Pinto, & Providência, 1999).

O pinheiro bravo é utilizado para produção de pasta de papel, madeira de construção civil, mobiliário, painéis de madeira, embalagens, paletes entre outras. Para além da utilização da madeira, é também explorado a produção de resina ao longo da vida da árvore (Figueiredo, et al.).

Para determinar qual o material para uma aplicação é importante conhecer as propriedades mecânicas e físicas, assim sendo, é apresentado na Tabela 1 os resultados de alguns testes realizados ao pinheiro bravo. É de realçar que os valores são meramente indicativos e servem apenas para comparação pois as propriedades dependem do solo, do clima, da idade, do tipo de defeitos existentes.

Tabela 1: Características mecânicas do pinus pinaster (Carballo, Hermoso, & Fernández-Golfín, 2009)

Área de Secção [mm ²]	Tensão máxima f_m [N/mm ²]	Coefficiente de variação	Módulo de elasticidade E_{mg}	Coefficiente de variação [%]	Densidade ρ_m [kg/m ³]	Coefficiente de variação [%]
100x50	58	25%	10909	17%	593	11%
150x40	49	39%	12107	21%	565	11%
150x50	63	29%	12966	19%	583	10%
150x70	51	34%	11172	25%	572	13%
200x50	51	38%	12586	20%	556	10%
200x70	62	23%	13603	17%	574	10%
TOTAL	55	32%	12161	21%	573	11%

2.3 Compósitos

Um compósito pode ser definido como uma combinação de dois ou mais materiais que resultam numa melhoria das propriedades quando comparados com os componentes individualmente (Campbell, 2010).

Os materiais compósitos apresentam propriedades físicas e mecânicas capazes de se enquadrar nas exigências actuais das mais diversas funções, sendo processados de forma a integrar as características desejadas para determinada aplicação. Muitos destes materiais possuem boa resistência à corrosão, oxidação e desgaste e os processos de produção estão bem definidos e otimizados para o desenvolvimento de estruturas complexas com um custo relativamente baixo (Cerva, 2010).

2.3.1 Classificação dos materiais compósitos

Os materiais sólidos podem ser divididos em quatro categorias: polímeros, metais, cerâmicos e carbonos. A última categoria é considerada uma classe distinta devido às propriedades únicas que apresentam. Cada uma destas categorias pode ser utilizada para servir de reforço ou de matriz, possibilitando a criação de uma quantidade de materiais diferentes com propriedades únicas que materiais monolíticos não apresentariam (Kutz, 2006).

Na maior parte dos casos um material compósito consiste numa ou mais fases descontínuas distribuídas numa fase contínua. Compósitos com várias fases descontínuas são considerados híbridos. A fase descontínua apresenta, geralmente, propriedades mecânicas superiores que a fase contínua. A fase contínua é usualmente chamada de matriz e a descontínua de reforço (Berthelot, 1999).

Segundo Kutz os compósitos são normalmente classificados pelo tipo de material utilizado na matriz. Assim sendo, os quatro tipos principais de compósitos são: compósitos de matriz polimérica (CMP); compósito de matriz metálica (CMM); compósito de matriz cerâmica (CMC); e compósito de carbono-carbono (CCC). Actualmente o compósito mais utilizado é o CMP, no entanto já existem aplicações importantes para os restantes compósitos enaltecendo o potencial para aplicações de engenharia.

Os principais tipos de reforços utilizados nos materiais compósitos, representados na Figura 5, são: fibras contínuas, fibras descontínuas, cristais alongados (*whiskers*), partículas, e uma panóplia de formas fibrosas produzidas através de tecnologia têxtil. Estes reforços podem ser usados simultaneamente com o objectivo de obter uma maior eficiência e redução de custos (Kutz, 2006).

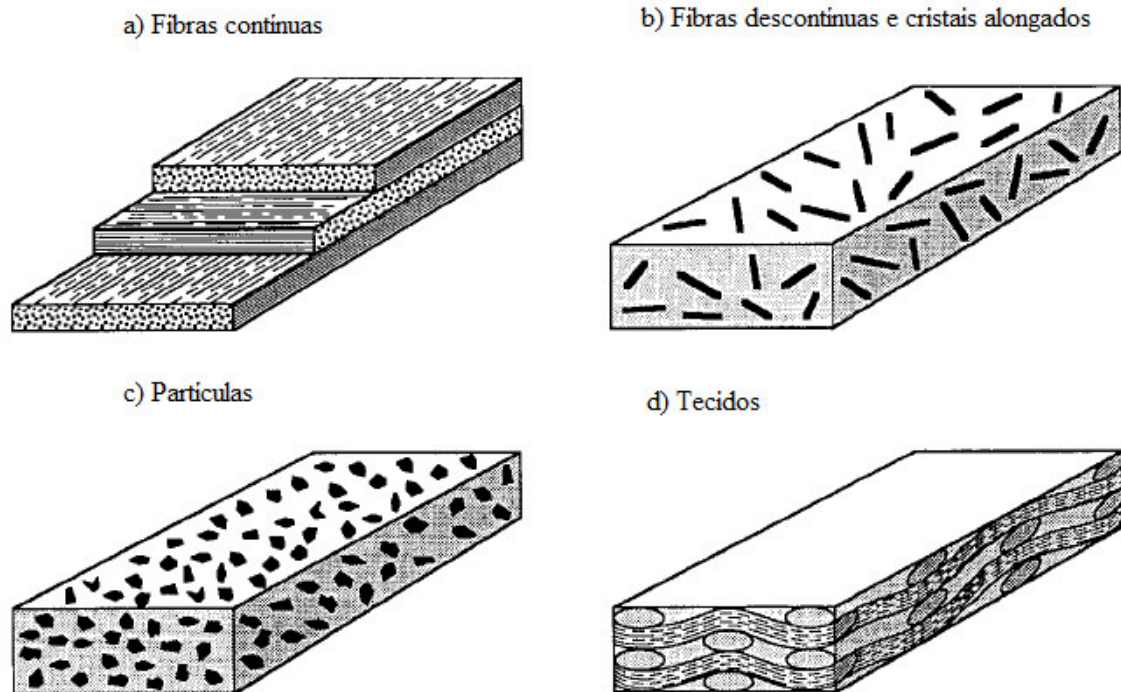


Figura 5: Tipos de reforços: a) Fibras contínuas; b) Fibras descontínuas e cristais alongados; c) Partículas; d) Tecidos (Kutz, 2006).

Por outro lado Berthelot (1999), apesar de dividir os compósitos pela sua matriz, divide de forma diferente do autor anterior, classificando por: compósito de matriz orgânica, compósito de matriz mineral, compósito de matriz metálica e compósitos *sandwichs*. Na Tabela 2 é apresentada a classificação dos materiais compósitos por natureza de matriz com os constituintes e aplicações.

Tabela 2: Classificação dos materiais compósitos (Berthelot, 1999)

Natureza	Materiais Compósitos	Constituintes	Aplicações
Compósito de matriz orgânica	Papel e cartão	Resinas, aditivos e fibras de celulose	Livros, embalagens
	Painéis de partículas	Resinas e aparas de madeira	Mobília, paletes
	Painéis de fibras	Resinas e fibras de madeira	Construção civil
	Telas	Resina e Tecido	Desporto e construção civil
	Materiais impermeáveis	Elastómeros, betume e têxteis	Coberturas e terraplanagens
	Pneus	Borracha, tecido e aço	Automóveis
	Laminados	Resinas, aditivos, fibras de vidro e fibras de carbono, etc	Múltiplas áreas
Compósito de matriz mineral	Plásticos reforçados	Resinas e microesferas	Múltiplas áreas
	Betão	Cimento, areia e gravilha	Construção civil
	Compósito carbono-carbono	Carbono e fibras de carbono	Indústria aeronáutica e aeroespacial e biomedicina
Compósito de matriz metálica	Compósitos cerâmicos	Cerâmica e fibras de cerâmica	Componentes termomecânicos
	-	Alumínio e fibras de boro	Indústria aeroespacial
Sandwiches	-	Alumínio e fibras de carbono	Indústria aeroespacial
	Revestimento	Metais, laminados, etc	Múltiplas áreas
	Núcleo	Espumas, “favos de mel”, plásticos reforçados com balsa, etc	Múltiplas áreas

2.3.2 Compósitos de matriz polimérica reforçada com partículas

As partículas, ao contrário das fibras, não apresentam uma direcção privilegiada e são usadas, geralmente, com o intuito de melhorar as propriedades do material, como a rigidez, o comportamento com temperatura, resistência à abrasão ou redução da contracção. Em muitos dos casos as partículas são utilizadas apenas para encher sem que as propriedades se alterem, sendo conhecidos como “*fillers*” (Berthelot, 1999).

Para lidar com as limitações dos polímeros, como por exemplo a baixa rigidez e resistência, e para expandir as aplicações por diferentes sectores, partículas inorgânicas como micro-/nano-SiO₂, vidro, Al₂O₃, Mg(OH)₂ e CaCO₃ são muitas vezes adicionadas para processar compósitos poliméricos, que por norma combina as vantagens dos constituintes das fases.

As propriedades mecânicas dos compósitos de matriz polimérica reforçada com partículas dependem fortemente do tamanho das partículas, da interface de adesão da partícula-matriz e da carga de partículas. Por exemplo, quanto mais pequenas forem as partículas de carbonato de cálcio maior tenacidade terá o polietileno de alta densidade (PEAD) (Fu, Feng, Lauke, & Mai, 2008).

2.3.3 Polímeros

A palavra polímero advém do grego *poly* e *meros*, que significa “muitas” e “partes”, respectivamente. Alguns cientistas preferem usar o termo de macromoléculas, pois os polímeros são vários conjuntos de pequenas moléculas, os monómeros, que se ligam entre si por ligações covalentes (Carragher, 2010).

Os polímeros podem ser classificados de várias formas, mas a mais utilizada é a baseada na sua origem, naturais, artificiais ou sintéticos. Outras classificações baseiam-se na estrutura do polímero, mecanismo de polimerização ou comportamento térmico.

Todos os polímeros extraídos directamente da natureza são classificados como sendo naturais e como exemplo disso temos o latex. Por outro lado os polímeros artificiais (ou semi-sintéticos) são os polímeros produzidos com envolvimento humano, através de reacções químicas, mas com polímeros de origem natural.

Os polímeros sintéticos, são aqueles que são produzidos por acção do Homem através de reacções químicas de derivados do petróleo. Dentro deste grupo podem ser ainda divididos em dois grupos distintos: os termoplásticos e os termoendurecíveis. Os dois grupos de polímeros sintéticos foram assim classificados pela sua capacidade de serem repetidamente fundidos e solidificados mantendo ou não as suas propriedades fundamentais.

Os elastómeros quando submetidos a pequenas tensões, deformam significativamente, mas devido ao elevado grau de elasticidade destes polímeros esta deformação é reversível, voltando à forma inicial quando interrompidas as tensões. A estrutura macromolecular desta família de polímeros está apresentada na Figura 6, onde se pode ver algumas reticulações do qual o número influencia a sua rigidez final.

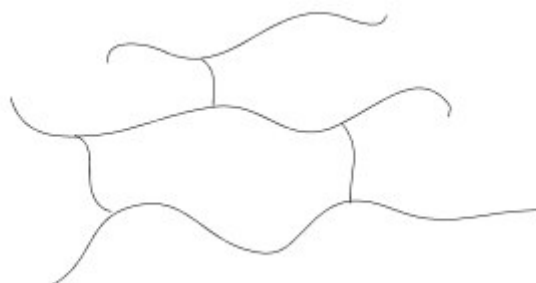


Figura 6: Estrutura dos elastómeros (Lima)

Os termoplásticos têm a capacidade de não alterar significativamente as suas propriedades ao longo do ciclo de fusões e solidificações a que são sujeitos. São constituídos por macromoléculas lineares ou com poucas ramificações, contendo ligações químicas fracas, como demonstrado na Figura 7a).

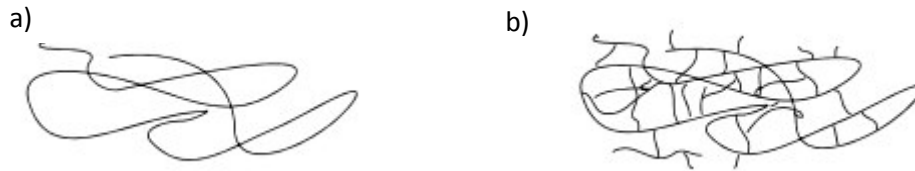


Figura 7: Estrutura dos a) termoplásticos; b) e dos termoendurecíveis (Lima)

Por fim, os termoendurecíveis, ao contrário dos termoplásticos, após o primeiro ciclo térmico e assumindo a sua forma final, já não permitem que um novo ciclo seja repetido sem que as suas características se alterem significativamente. Para este grupo a estrutura é muito ramificada e com ligações químicas fortes como é representado na Figura 7b).

A reacção química que junta vários monómeros para se formar um polímero chama-se polimerização. Existem várias reacções de polimerização dentro dos quais por adição ou radicalar e por crescimento em etapas (passo-a-passo ou condensação).

Na reacção de polimerização por adição os responsáveis pela formação da cadeia de monómeros são os radicais, que são moléculas com um electrão desemparelhado. Através de um centro activo a reacção é iniciada e a propagação é realizada em cadeia, isto é, o resultado da última reacção vai reagir com um monómero a partir do mesmo processo radicalar (Figura 8). O término do crescimento da cadeia polimérica acontece quando o centro activo é destruído.



Figura 8: Propagação da reacção (Lima)

A reacção de polimerização por etapas engloba as reacções onde o monómero liberta moléculas de baixa massa molecular, como por exemplo, H₂O, nas várias etapas da sua polimerização. Mas isto nem sempre é verdade. Uma excepção é o poliuretano em que não é libertado quaisquer moléculas. O que caracteriza este tipo de reacção é que apenas reagem entre si grupos funcionais tendo como consequência uma polimerização mais lenta que por adição.

Se os grupos funcionais se encontrarem nas extremidades das moléculas intervenientes, formam-se polímeros lineares, caso isso não se verifique, formam-se polímeros ramificados ou mesmo reticulados. (Lima)

2.3.4 Miscibilidade dos polímeros

Com a evolução da ciência dos polímeros, com a descoberta de novos materiais e novas técnicas de processamento, a mistura de dois ou mais polímeros é uma realidade presente nos nossos dias. Esta mistura foi realizada pela necessidade de melhorar as propriedades mecânicas, nomeadamente a resistência ao impacto a preços mais acessíveis,

melhorar o desempenho dos polímeros de engenharia e até mesmo permitir a reciclagem de alguns dos plásticos.

Na verdade grande parte dos polímeros produzidos nos nossos dias é a partir das misturas. Em 2001, aproximadamente 10% de todos os termoplásticos e 75% dos elastómeros eram preparados à base de misturas (Silva, 2009). No entanto, é raro encontrar uma verdadeira solubilidade nas misturas de dois polímeros, isto devido há lenta cinemática de separação.

Dois polímeros são miscíveis quando a energia livre da mistura é negativa, tendo em conta que isto varia consoante vários factores como a temperatura, a pressão, a composição da mistura e variáveis termodinâmicas.

Desde 1960 que é sabido que determinada adição de blocos ou polímeros enxertados na mistura de polímeros imiscíveis podem tornar possível a compatibilidade entre si. É importante ter em conta que miscibilidade é diferente de compatibilidade de forma em que o primeiro tem raízes termodinâmicas e o segundo é definido em termos operacionais. A mistura pode ser mais ou menos compatível dependendo da miscibilidade (Utracki, 2002).

2.3.5 Reciclagem

Segundo (Brognoli, 2006) a reciclagem de materiais plásticos pode ser classificada em quatro categorias: primária, secundária, terciária e quaternária.

A reciclagem primária consiste no processamento de resíduos poliméricos industriais de forma a obter um produto com características equivalentes ao original produzido com material virgem. A reciclagem secundária é a conversão dos resíduos poliméricos provenientes dos resíduos sólidos urbanos (RSU) com vista à utilização de produtos de menor exigência que o produto obtido com o polímero virgem.

A reciclagem primária e secundária são conhecidas como reciclagem mecânica ou física, tendo em conta que o que diferencia a primeira da segunda é que na primeira é feita uma reciclagem pós-industrial e na segunda pós-consumo.

A reciclagem terciária é o processo tecnológico de produção de consumíveis químicos ou combustíveis a partir de resíduos poliméricos. Este tipo de reciclagem é também conhecido por reciclagem química.

A reciclagem quaternária é o processo tecnológico de recuperação de energia de resíduos poliméricos por incineração controlada. É também designada como reciclagem energética.

Não saindo do conceito, (Achilias, 2012), refere a reciclagem primária como a reciclagem de material de histórico controlado, contemplando apenas lixo limpo e sem contaminantes.

A reciclagem secundária, ou mecânica, o lixo passa por todo um processo de separação e lavagem para voltar a reprocessar em grãos que, por sua vez, pode ser repetidamente extrudido sem que se perca as características principais do polímero. A grande desvantagem deste tipo de reciclagem é a deterioração das propriedades do material ao longo dos ciclos.

A reciclagem terciária, ou química, é conhecido como o processo mais utilizado para a despolimerização do Politereftalato de etileno (PET), do qual inverte o processo da

polimerização, voltando a ter monómeros que posteriormente podem sofrer polimerização, regenerando o polímero original.

Reciclagem quaternária, ou recuperação de energia, refere-se à recuperação da energia que os polímeros contêm. Os polímeros são uma enorme fonte de energia do qual pode ser aproveitada através de inceneração, o que trás controvérsia no que toca a impactos ambientais devido às toxinas enviadas para a atmosfera.

Para a separação do lixo é necessário identificar primeiro os diferentes plásticos pois a aparência é semelhante. De forma a facilitar esta identificação criou-se símbolos de marcação.

Em Portugal não existe a obrigação legal de marcação dos plásticos. A marcação é voluntária e a sua prática auxilia o consumidor e particularmente o operador de triagem a identificar o tipo de plástico (PLASTVAL, 2008).

A Figura 9 contém os símbolos utilizados na marcação assim como o tipo de plástico inerente a cada um.

Símbolo	Tipo de Plástico	Exemplo de Aplicação
	PET (Politereftalato de Etileno)	Garrafas de água, refrigerantes
	PEAD (Polietileno de Alta Densidade)	Higiene, detergentes
	PVC (Policloreto de Vinilo)	Tubos, detergentes
	PEBD (Polietileno de Baixa Densidade)	Sacos, filme de paletes
	PP (Polipropileno)	Caixas de CD's
	PS (Poliestireno)	Iogurte, caixa de ovos
	Outros	

Figura 9: Símbolos utilizados na marcação dos plásticos (PLASTVAL, 2008)

Nos centros de valorização de resíduos em Portugal, apesar de toda a tecnologia existente, o processo de triagem ainda necessita de meios humanos. Consequentemente a separação dos resíduos é, em parte, dependente da separação feita em casa de todos os cidadãos.

Uma vez que os plásticos têm um aspecto visual semelhante, por vezes os erros na sua separação acontecem, dificultando ou até mesmo impossibilitando a reciclagem desse lote ou fardo.

Com as novas tecnologias, através de sensores ópticos, separadores balísticos, separadores magnéticos e sistemas de aspiração é possível separar os seguintes materiais de forma mais eficiente e com mais condições de trabalho para os colaboradores (Valor Ambiente, 2015):

- Embalagens de Cartão para Alimentos Líquidos;
- PEAD - Polietileno de Alta Densidade;
- PET - Politereftalato de Etileno;
- Filme plástico;
- Plásticos mistos;
- Metais ferrosos;
- Metais não ferrosos.

Apesar de todo o processo automático, ainda existe um controlo de qualidade manual para assegurar que a separação mantém os parâmetros definidos.

3 Processo de fabrico do Prodelix

3.1 Introdução ao material em estudo

O nome Prodelix deriva da expressão “provém do lixo”. O nome foi idealizado tendo em conta a sua origem que, como a expressão o indica, é feito a partir do lixo. O intuito da utilização deste material é o facto de no seu processo o input ser o lixo em bruto e o output o material totalmente tratado e pronto a utilizar, referenciando que todo o lixo é considerado matéria-prima.

O objectivo de reduzir o lixo com destino a aterros faz com que os primeiros passos no desenvolvimento sejam feitos a nível regional. Como tal, o lixo utilizado para a obtenção do material em estudo é proveniente da Valorlis. A Valorlis (Valorlis, 2007) tem uma estação de triagem onde o lixo reciclável e não reciclável (refugo) é separado manualmente nas seguintes fracções:

Papel e cartão;

Sacos e vasilhames de polietileno de alta e baixa densidade (PEBD e PEAD);

Embalagens de politereftalato e etileno (PET);

Embalagens de policloreto de vinilo (PVC);

Metais ferrosos e não ferrosos previamente separados.

No material em estudo os metais ferrosos e não ferrosos não são utilizados, sendo que todos os restantes são passivos de ser utilizados na mistura. Sendo assim a grande fonte de matéria-prima provém do lixo local, separado, lavado e triturado.

Outros resíduos possíveis de serem aproveitados, são os resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos (REEE) que após a trituração e separação dos metais, são aproveitados todos os plásticos para obtenção de matéria-prima.

O tetra pak também é um resíduo que desempenha um papel importante na produção do Prodelix, servindo de ligante entre os plásticos envolvidos e é um resíduo do qual a reciclagem apenas contempla cerca de 25% da quantidade produzida em 2013 (Tetra Pak). O tetra pak é vulgarmente encontrado nas embalagens de sumos e leites e é constituído por várias camadas de polietileno que protege o interior contra a humidade exterior e permite aderir o cartão à folha de alumínio que tem como objectivo proteger o interior contra a luz e oxigénio (Figura 10: Tetra pak).

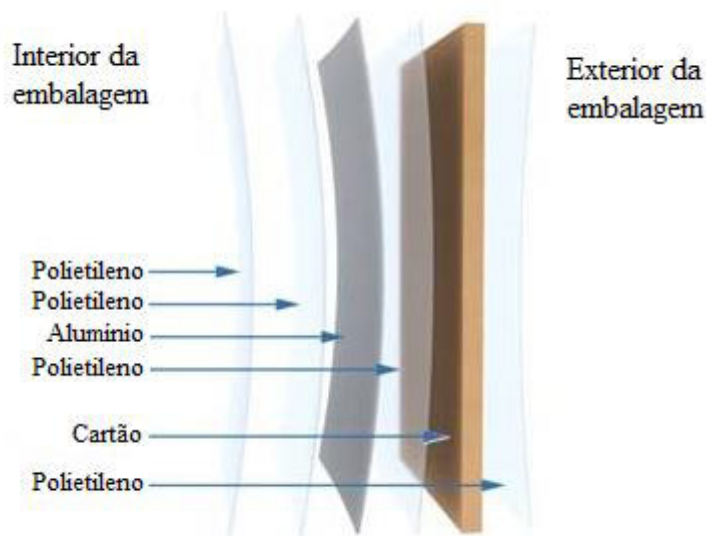


Figura 10: Tetra pak

Inicialmente era utilizada serradura para fazer de ligação, mas com o desenvolvimento do produto percebeu-se que o tetra pak faz as vezes da serradura de uma forma eficaz.

Por fim, a matéria-prima que altera de uma forma mais notória as propriedades do produto final é o pó de pedra. Quanto mais deste material a mistura tiver mais frágil será o produto final, tornando-se até impossível de pregar um prego sem ruptura.

3.2 Processo de fabrico

O processo de transformação deste material é feito sem intervenção de meios humanos, sendo todo ele feito inteiramente num único estabelecimento, entrando o lixo em bruto e saindo o material acabado.

Isto é feito através de máquinas automatizadas com sistemas pneumáticos controlados por válvulas e por tubos ventilados que permitem o transporte do granulado de matéria-prima entre máquinas.

Para que isto seja possível o material tem de passar pelas seguintes etapas:

- Preparação das matérias-primas;
- Lavagem de matérias-primas;
- Separação dos materiais;
- Lavagem e secagem das matérias-primas;
- Armazenamento;
- Dosagem ou composição da fórmula;
- Extrusão / produção do produto;
- Arrefecimento, corte e embalamento.

3.2.1 Preparação do lixo

Devido às variadas origens do lixo e aos diversos tipos de materiais plásticos, é necessária uma preparação prévia antes da sua inserção no processo.

O material ao chegar ao local é descarregado para tinas embutidas no chão onde a água lava os produtos, libertando-o de qualquer contaminação ou sujidade que possa danificar as máquinas a jusante. Uma pré-selecção é feita nesta etapa, separando os plásticos indiferenciados, tecidos e fibras, e madeiras para diferentes tinas.

Após a lavagem, uma garra mecânica transporta o material, desfazendo os objectos de maiores dimensões e colocando-os sob um transportador de tela que faz encaminhar para um destroçador. Para um controlo dimensional utiliza-se uma peneira, garantindo que os grãos que seguem no processo encontram-se nas dimensões exigidas.

Para os plásticos a volumetria exigida após destroçamento encontra-se compreendida entre 2 a 3cm³. Como esta granulometria não é a desejada, o material é encaminhado para um moinho onde as dimensões das partículas são de novo reduzidas para um intervalo entre os 2,5mm³ e os 4mm³. Após este processo os plásticos estão prontos para a separação.

Para a madeira a granulometria não pode ser superior a 20cm³ após sair do destroçador e, após passar pelo moinho, o material deve ter dimensões compreendidas entre 5 e 7 mm³.

3.2.2 Preparação das matérias-primas virgens

As matérias-primas consideradas virgens são aquelas que não sofrem processos internos de transformação antecedente ao da produção do produto final, seguindo directamente para o armazenamento.

As matérias-primas virgens necessárias para o processo são o pó de pedra proveniente de micronização de rochas calcárias e serradura originária do corte e polimento de madeira.

3.2.3 Lavagem de matérias-primas

O método de lavagem é realizado nas tinas embutidas no chão, para onde são descarregadas as matérias-primas em bruto, ou seja, o material ainda por separar.

A existência de várias tinas de descarga de material permite que uma pré-separação do material seja feita tendo em conta a sua natureza. Sendo assim os materiais que exijam mais cuidados a nível químico ou que acarretam perigos de contaminação possam ser separados dos outros materiais que apenas necessitam de uma lavagem geral.

Os produtos contaminantes neste processo devem ser eliminados dos materiais assim como todas as lamas e resíduos indesejáveis, de forma a não contaminar o produto final e não danificar os equipamentos que se encontram ao longo de todo o processo de produção.

A água utilizada na lavagem do material provém de um circuito fechado. Este circuito contém uma estação de tratamento de águas residuais industriais (ETARI), onde são retiradas as lamas, óleos e outros contaminantes para depois devolver água limpa para a repetição do processo.

3.2.4 Separação dos materiais

Um dos principais objectivos da separação dos materiais é a remoção de todos os metais residentes que não irão entrar na fórmula do produto final, assim como a separação dos diferentes polímeros.

Existem dois tipos principais de separação de plásticos, separação a molhado e separação a seco. A separação a molhado nasceu com o estudo da flutuação dos plásticos numa solução preparada e a separação a seco utiliza o ar como meio de separação. Ambos os tipos de separação baseiam-se na densidade dos plásticos para os separar (Dodbiba & Fujita, 2004).

Para o processo em estudo o método utilizado é a separação por meio de flutuação a molhado. Numa primeira fase, um separador magnético retira todos os metais que são atraídos passando posteriormente por um processo de separação por densidades juntamente com todos os materiais compósitos numa mistura anteriormente triturada para dimensões reduzidas. Este processo é realizado numa máquina (Figura 11) com quatro tinas em que cada tina contém uma solução previamente preparada com uma densidade superior ao material que se pretende extrair. Esta solução é controlada através do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), também conhecido por cal hidratada, presente na mistura. A quantidade de Ca(OH)_2 inserida na mistura vai ditar a densidade da mesma, permitindo assim a separação dos polímeros por gamas.

Após a separação dos polímeros, estes são encaminhados para silos onde são decantados todos os vestígios de solução presente. Posteriormente passam por um processo de secagem antes de serem ensilados nos silos de armazenamento das matérias-primas.

No final da linha apenas restarão os metais que irão sempre ao fundo e serão encaminhados para um contentor e removidos do processo principal de fabrico.

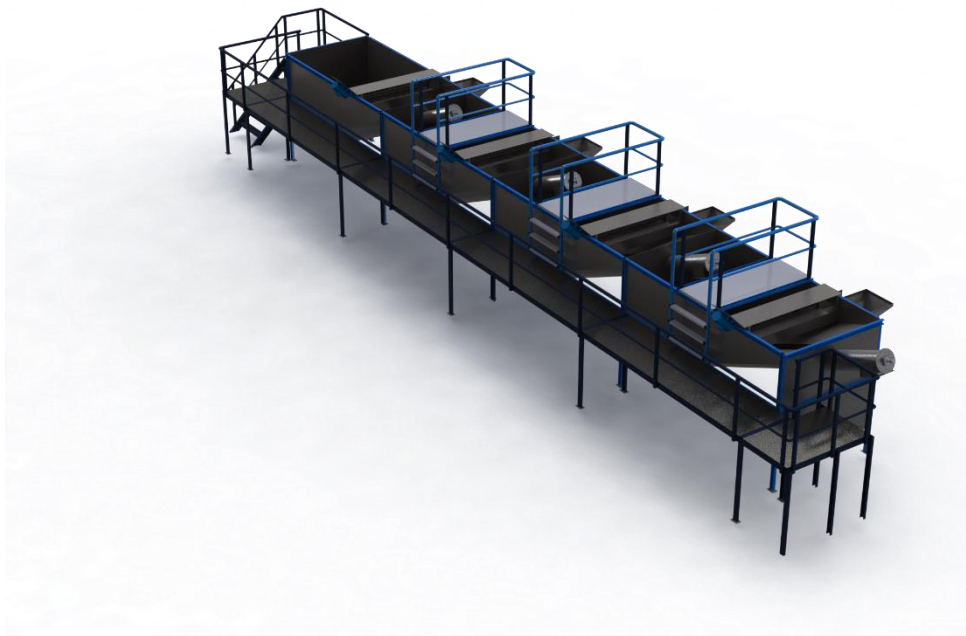


Figura 11: Separador por densidades (desenhado pelo autor e produzido pela Vasconcept)

3.2.5 Preparação da mistura para produção do Prodelix

Após a preparação de todas as matérias-primas, elas são ensiladas separadamente conforme as densidades de cada uma, permitindo assim um leque de diferentes receitas em conformidade com o pretendido.

A mistura é produzida num silo com um sem-fim, como apresentado na Figura 12, para onde os diferentes componentes são encaminhados. O sem-fim ao ser accionado pelo motor vai empurrar o material para cima, misturando todo o seu conteúdo.

Após a mistura estar concluída é encaminhada para silos de produto final, onde fica armazenado até ser necessária para a extrusão.



Figura 12: Misturador (desenhado pelo autor e produzido pela Vasconcept)

3.2.6 Processo de Extrusão

Extrusão é um processo de produção de um produto, o extrudido, forçando o material a passar por um orifício ou uma fieira. Para extrudir um material primeiro é necessário amolecê-lo para que possa ser moldado, que é normalmente feito com auxílio de calor (Whelan & Dunning, 1988).

A extrusão é o processo mais utilizado para o processamento de termoplásticos. A extrusora (Figura 13) é a base fundamental do processo e é utilizada para fundir o plástico, misturá-lo, homogeneizá-lo e injectá-lo através de uma fieira que dá a forma final. Existem dois tipos de extrusoras: fusos simples e duplos (G. & I., 2014).

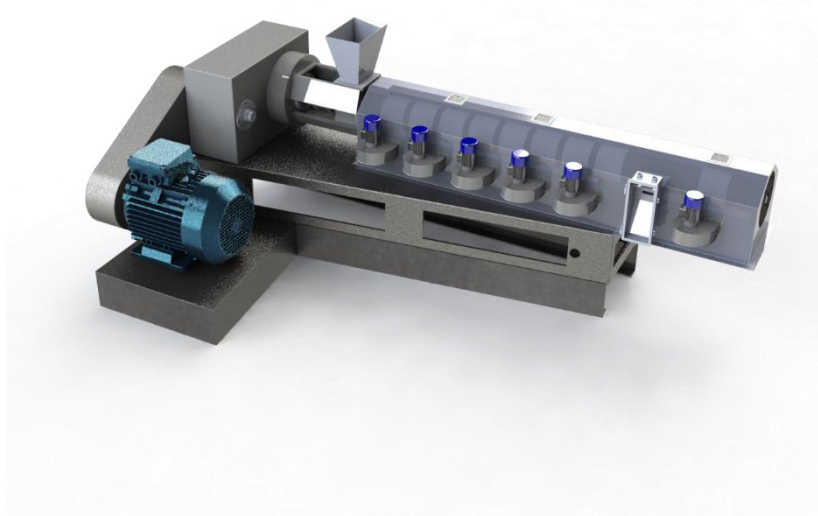


Figura 13: Extrusora (desenhado pelo autor e produzido pela Vasconcept)

A matéria-prima entra por efeito gravítico através de uma tremonha para garantir a distribuição uniforme da mistura. Os polímeros devem ser previamente secados para evitar a degradação.

Após o abastecimento da extrusora, e ao entrar na câmara, o material começa a fundir ao mesmo tempo que é empurrado para a frente. Por norma, só a partir do quinto ou sexto diâmetro do fuso, a contar da entrada do material, é que o material se encontra fundido. O aquecimento da câmara é feito através de resistências colocadas à volta da câmara.

A última fase da extrusão passa por dar a geometria da secção transversal desejada ao extrudido através de uma feira. Quando o material sai da feira, as moléculas dos polímeros que estavam orientadas pela área de contacto que as forçava a comprimir, relaxam e rearranjam-se, causando dilatação do extrudido que fica com uma secção transversal maior que a da feira.

Colocar um puxo (Figura 14) no final da linha ajuda a extrusão do material. A velocidade aplicada pelo puxo influenciará as dimensões finais pelo que deve ser ajustado (Wagner, Giles, & Mount, 2005).



Figura 14: Puxo e corte (desenhado pelo autor e produzido pela Vasconcept)

Na Figura 14 tem, também, representado a zona onde o corte do perfil é executado. Um encoder faz a medição do comprimento desejado que, após atingido, emite um sinal para que a serra inicie o processo de corte.

O material quando chega ao puxo e corte já deve ir totalmente arrefecido, como tal após a feira encontram-se sistemas de refrigeração (Figura 15). É utilizada água com temperaturas compreendidas entre os 6° e os 8°C que é distribuída por tubos e pulverizada por chuveiros que criam um efeito de “leque”. A razão pela qual foi escolhido este método ao invés da refrigeração por submersão em água é a eficiência, visto que neste sistema com chuveiros a água circula muito mais depressa mantendo as temperaturas baixas.



Figura 15: Sistema de refrigeração (desenhado pelo autor e produzido pela Vasconcept)

4 Materiais e procedimentos experimentais

4.1 Introdução

Quando um projecto tem um foco num objectivo muito específico, é importante perceber se o material utilizado tem características e propriedades viáveis à concretização. Para refutar ou aprovar determinadas características dos materiais realizam-se ensaios mecânicos e físicos.

Neste capítulo aborda-se os componentes presentes na mistura e os métodos utilizados na execução dos ensaios mecânicos e físicos dos materiais.

4.2 Materiais

4.2.1 Prodelix

Os provetes destinadas aos ensaios mecânicos foram extrudidas numa máquina de extrusão com um fuso simples e as temperaturas de extrusão variaram ao longo da câmara entre os 180°C e os 220°C.

As feiras utilizadas foram concebidas em aço inoxidável, uma com geometria quadrada de 40x40mm e outra com geometria rectangular de 15x100. Estas geometrias foram escolhidas devido à aproximação das cotas entre a feira e as necessárias para os provetes.

Como o material foi retirado da feira após o arrefecimento as dimensões finais do extrudido para a feira de 40x40mm foi de 36x36mm.

A mistura foi realizada no local com granulado de PVC, PEAD, uma mistura de plásticos mistos e indiferenciados fornecida pela sociedade ponto verde, pó de pedra e tetra pak com os valores indicados Tabela 3.

Tabela 3: Composição utilizada no fabrico do compósito

Material utilizado na composição do prodelix	Composição	
	Massa [kg]	Volume [Lt]
PVC	2,2	4
PEAD	0,9	2
Mistura de plásticos mistos	2	20
Pó de pedra	2,6	2
Tetra Pak	0,6	12
TOTAL	8,3	40

4.2.2 Madeira (*Pinus Pinaster*)

A madeira utilizada nos ensaios é proveniente do pinheiro bravo (*Pinus Pinaster*). Os provetes foram retirados de uma tábua de madeira seca e maquinados para as medidas. Uma vez que as paletes são utilizadas com a madeira já seca na maior parte da sua vida e para efeitos de comparação utilizou-se também madeira seca neste estudo.

4.3 Medição de densidade

Para determinar a densidade de cada material considerou-se o princípio de Arquimedes (“todo o corpo completa ou parcialmente imerso num fluido experimenta uma força de impulsão para cima, cujo valor é igual ao peso do fluido deslocado”). Foi considerada a norma ASTM D 792, norma para a determinação da densidade e densidade relativa de plásticos por deslocamento do fluido. Tendo por base a norma, as dimensões dos provetes para este ensaio foram de 10x10x10mm. A balança utilizada para o ensaio foi a Mettler Toledo AG204 representada na Figura 16, com precisão até quatro casas decimais da grama.



Figura 16: Balança Mettler Toledo AG204

No cálculo da densidade foi necessário medir a massa aparente dos provetes antes de os imergir em água destilada (m_1) e a massa aparente imersa em água (m_2). Para determinar a densidade do material utilizou-se a seguinte equação (ASTM, D 792 - 00, 2000):

$$d = \frac{m_1}{m_1 - m_2} d_{\text{água}} \quad (1)$$

onde:

m_1 é a massa do provete a seco, em g;

m_2 é a massa do provete emerso, em g;

$d_{\text{água}}$ é a densidade da água à temperatura registada, em °C.

A temperatura da água destilada encontrava-se a 18°C, o que representa uma densidade de 0,9986 g/ml conforme apresentado na tabela presente no anexo B.

4.4 Ensaios mecânicos

4.4.1 Ensaios de flexão em três pontos

A flexão em três pontos consiste na aplicação de uma força direccionada entre dois pontos distanciados de acordo com a norma, obtendo os valores da força exercida e o deslocamento (Figura 17).

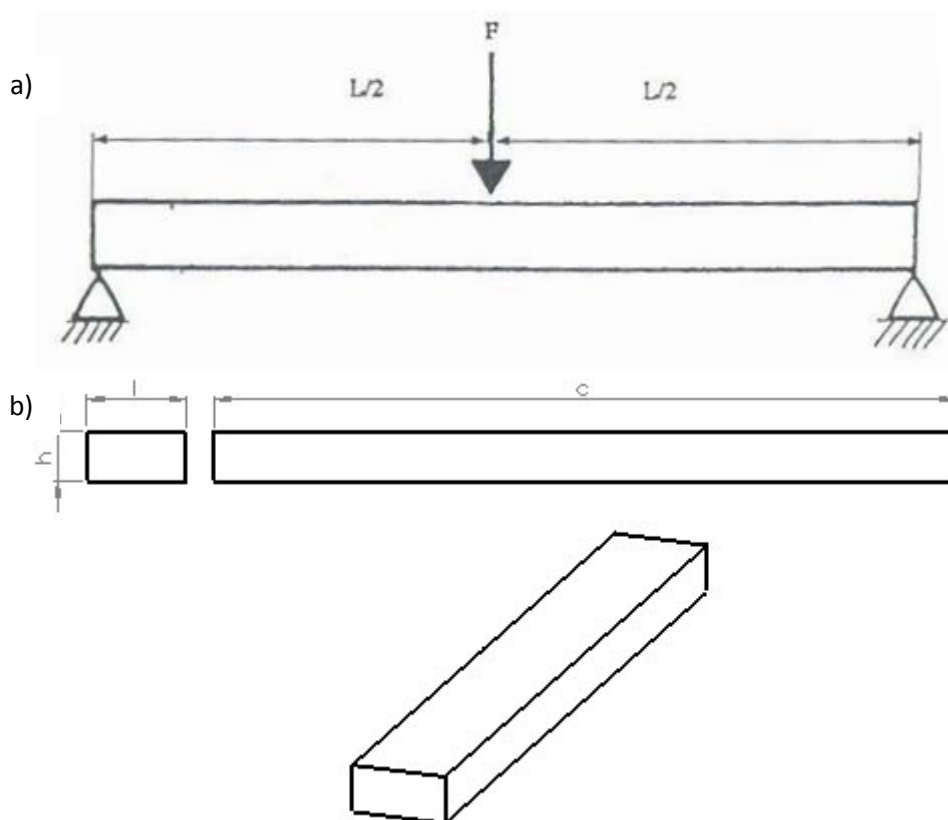


Figura 17: a) representação esquemática do carregamento em flexão; b) geometria do provete

A máquina utilizada para este ensaio é uma Zwick Z100 com células de carga de 10 kN. O raio dos suportes utilizados, é de $5 \pm 0,2$ mm pois a espessura dos provetes é maior que

3 mm. O vão considerado nestes ensaios com o material compósito foi de 64 mm e para a madeira de 100 mm.

Na Figura 18 é possível visualizar a posição do provete no ensaio de flexão em três pontos do material compósito.

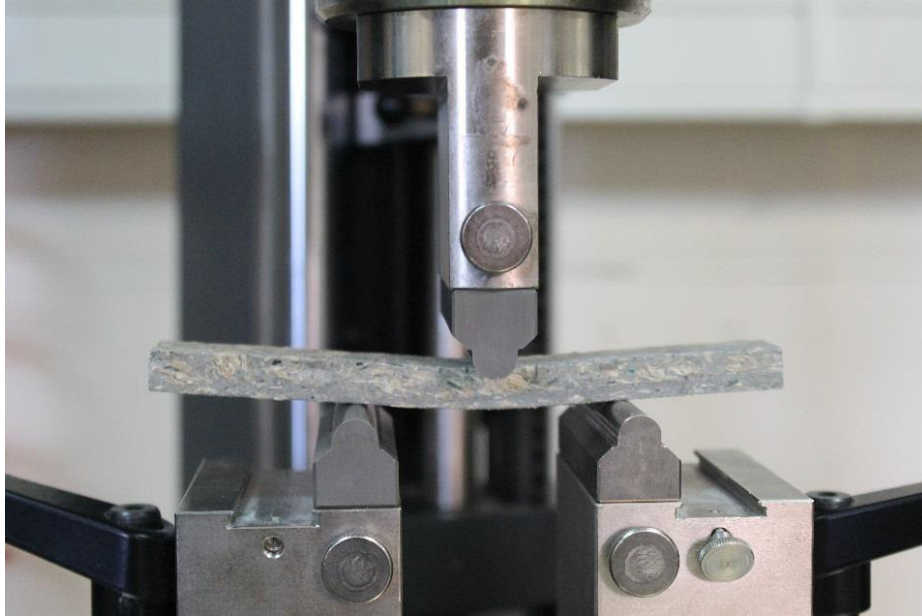


Figura 18: Ensaio à flexão de um provete de material compósito Prodelix

Na Tabela 4 são apresentadas as dimensões dos provetes utilizados nos ensaios de flexão em três pontos.

Tabela 4: Materiais e dimensões dos provetes utilizados nos ensaios de flexão

Material: Prodelix			
Referência	c [mm]	l [mm]	h [mm]
Provete 1	150	20	10
Provete 2	150	20	10
Provete 3	150	20	10
Material: Madeira			
Referência	c [mm]	l [mm]	h [mm]
Provete 4	150	20	10
Provete 5	150	20	10
Provete 6	150	20,1	10
Provete 7	150	20,4	10,1

A velocidade de aplicação de carga nos ensaios foi de 5 mm/min para o material compósito e de 2 mm/min para a madeira. Para a determinação do módulo de elasticidade à flexão foi utilizada a seguinte equação (2):

$$E_f y = \frac{P.L^3}{48I} \quad (2)$$

onde:

L é a distância entre os dois suportes ou o vão, em mm;

I é o momento de inércia da secção transversal do provete, mm^4 ;

P é a carga exercida sobre o provete, em N;

y é a distância do eixo neutro ao centróide, em mm;

A resistência à flexão é um elemento importante na selecção dos materiais para as diversas aplicações. A equação utilizada para calcular a resistência à flexão foi a seguinte (3):

$$\sigma_f = \frac{M.y}{I} [N.mm^{-2}] \quad (3)$$

onde:

σ_f é a resistência à flexão, em MPa;

M é o momento máximo de flexão, em N.m;

I é o momento de inércia da secção transversal do provete, em mm^4 .

O momento máximo de flexão é dado pela equação (4):

$$M = \frac{P_{\text{máx}}.L}{4} [N.mm] \quad (4)$$

onde:

$P_{máx}$ é a carga máxima aplicada, em N;

L é a distância entre apoios, em mm.

O momento de inércia de uma secção transversal rectangular é dada pela seguinte equação (5):

$$I = \frac{b.h^3}{12} [mm^4] \quad (5)$$

onde:

b é a largura do provete, em N;

h é a espessura do provete, em mm.

Deduzindo e simplificando as equações anteriores obtém-se a equação (6) para o cálculo da tensão máxima à flexão :

$$\sigma_{\max \text{ flexão}} = \frac{3P_{máx}L}{2bh^2} [N.mm^{-2}] \quad (6)$$

4.4.2 Ensaio de Compressão

Na Figura 19 está representado de forma esquemática o tipo de carregamento bem como a geometria considerada neste tipo de ensaio. A máquina utilizada nestes ensaios é da marca Zwick Z100. Na Figura 20 pode-se observar o ensaio de compressão realizado num dos ensaios efectuados.

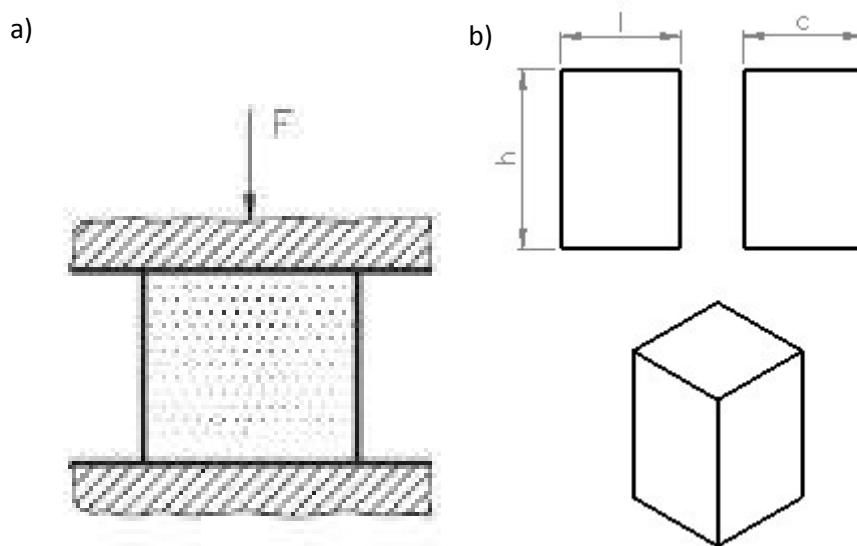


Figura 19: a) representação esquemática do ensaio à compressão; b) geometria dos provetes.

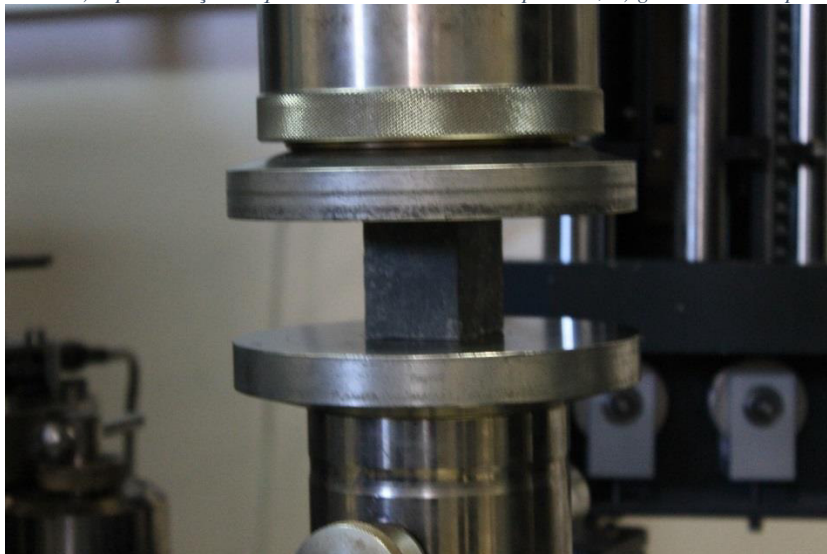


Figura 20: Ensaio de compressão com um provete em material Prodelix.

Na Tabela 5 são apresentadas as dimensões dos provetes utilizados nos ensaios de compressão.

Tabela 5: Materiais e dimensões dos provetes utilizados nos ensaios à compressão

Material: Compósito			
Referência	c[mm]	l[mm]	h[mm]
Provete 8	36	36	40
Provete 9	36	36	40
Provete 10	36	36	40
Provete 11	36	36	40
Material: Madeira direccionada com os anéis paralelos à força			
Referência	c [mm]	l [mm]	h [mm]
Provete 12	20	20	30
Provete 13	20	20	30
Provete 14	20	20	30
Material: Madeira direccionada com os anéis perpendiculares à força			
Referência	c [mm]	l [mm]	h [mm]
Provete 15	20	20	40
Provete 16	20	20	40

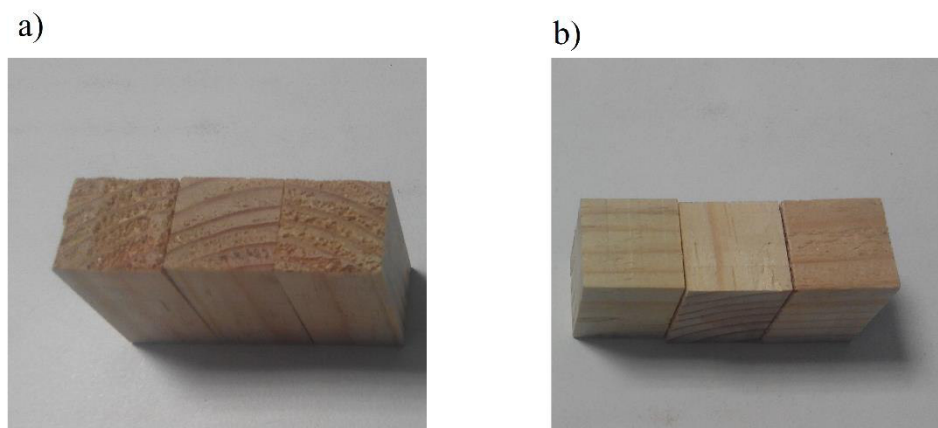


Figura 21: Provetes de madeira utilizados nos ensaios de compressão: a) com anéis alinhados perpendicularmente à aplicação da carga; b) com anéis alinhados paralelamente à força

A velocidade de carregamento considerada nestes ensaios foram de 5 mm/min para o material compósito e para a madeira de 2 mm/min.

O módulo de elasticidade é determinado através de uma regressão linear da curva do gráfico tensão/extensão. Para calcular a extensão utilizou-se a seguinte equação (7):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (7)$$

onde:

ΔL_0 é a deformação sofrida pelo provete, em mm;

L_0 é o comprimento do provete, em mm.

Para o cálculo das tensões foi utilizado a seguinte equação (8):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (8)$$

onde:

F é a força exercida, expressa em N;

A é a área da secção, expressa em mm².

4.4.3 Ensaios de dureza

Na determinação da dureza (shore D) dos materiais considerados neste estudo foi considerada a norma ASTM D 2240. O durómetro utilizado nos ensaios foi um Bareiss analógico, Figura 22. Antes de cada ensaio foi ajustado a agulha para uma distância de cerca de 25mm do provete para respeitar a norma. Foram feitas 5 determinações para o compósito.



Figura 22: Durómetro Bareiss analógico

Os valores foram retirados directamente do durómetro e feita uma média de todas as medições para a obtenção do valor médio.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

5 Análise e discussão de resultados

5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados referentes às propriedades físicas e mecânicas dos ensaios de flexão em três pontos, compressão, medição de densidade e de dureza shore D para o compósito.

5.2 Resultados da medição da densidade

Na Tabela 6 são apresentados os resultados das medições realizadas com amostras dos dois tipos de materiais (compósito e madeira).

Tabela 6: Resultados da medição da densidade dos dois materiais considerados neste estudo

Compósito	
Referência	Densidade
Provetete 13	1,32
Provetete 14	1,27
Provetete 15	1,24
Média	1,28
Desvio Padrão	0,04
Madeira	
Provetete 24	0,57
Provetete 25	0,55
Provetete 26	0,55
Média	0,56
Desvio Padrão	0,01

Na Figura 23 são apresentados os resultados de densidade obtidos com o material compósito processado e a madeira.

A partir da análise dos valores indicados na Tabela 6 e Figura 23 pode-se concluir que o material compósito processado apresenta, naturalmente, valores de densidade superiores o que, para o tipo de aplicação pretendida é uma desvantagem. No entanto, a reutilização/reciclagem é um aspecto importante a considerar nos dias de hoje.

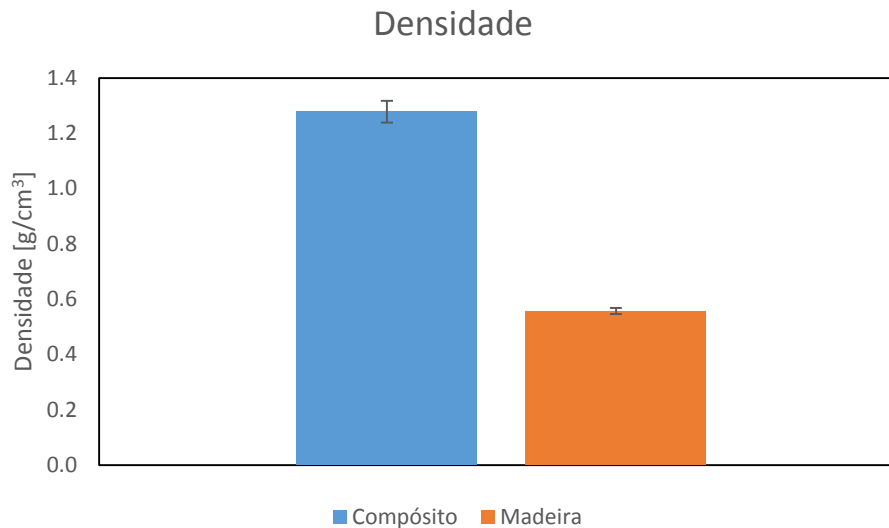


Figura 23: Gráfico comparativo da densidade dos materiais em estudo

5.3 Ensaio de flexão em três pontos

Na Tabela 7 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios à flexão (tensão máxima e o módulo de elasticidade) com o material compósito e a madeira.

Tabela 7: Resultados dos ensaios de flexão realizados com o material compósito processado e a madeira

Compósito			
Referência	Tensão máxima [MPa]	E [MPa]	R²
Provet 1	28,1	1652,9	0,981
Provet 2	25,7	2421,4	0,985
Provet 3	30,5	2409,8	0,986
Média	28,1	2161,4	0,984
Desvio Padrão	2,4	440,4	0,003
Madeira			
Provet 4	65,4	4957,7	0,9992
Provet 5	53,1	4044,3	0,9954
Provet 6	73,9	5118,3	0,9939
Provet 7	65,4	4071,0	0,9935
Média	64,5	4547,8	0,996
Desvio Padrão	8,6	579,3	0,003

Na Tabela 7 e na Figura 24 é possível observar que a madeira apresenta valores de resistência mecânica em flexão em três pontos superiores aos valores obtidos com o material compósito processado.

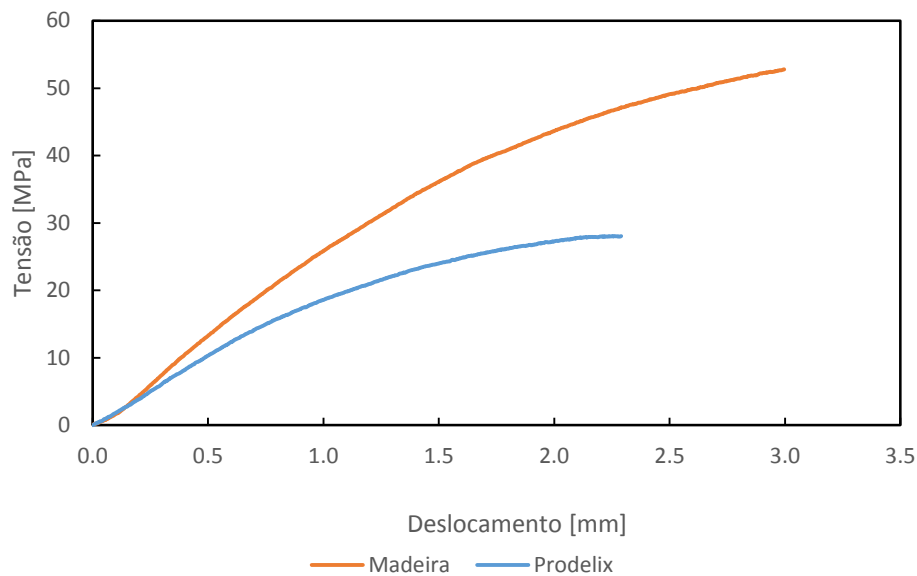


Figura 24: Curvas típicas de tensão versus deslocamento para os materiais considerados neste estudo.

Na Figura 25 e na Tabela 7 são apresentados os resultados relativos ao módulo de elasticidade para os materiais ensaiados, bem como o desvio padrão. Podem-se observar que os valores de rigidez da madeira são muito superiores aos do material compósito processado.

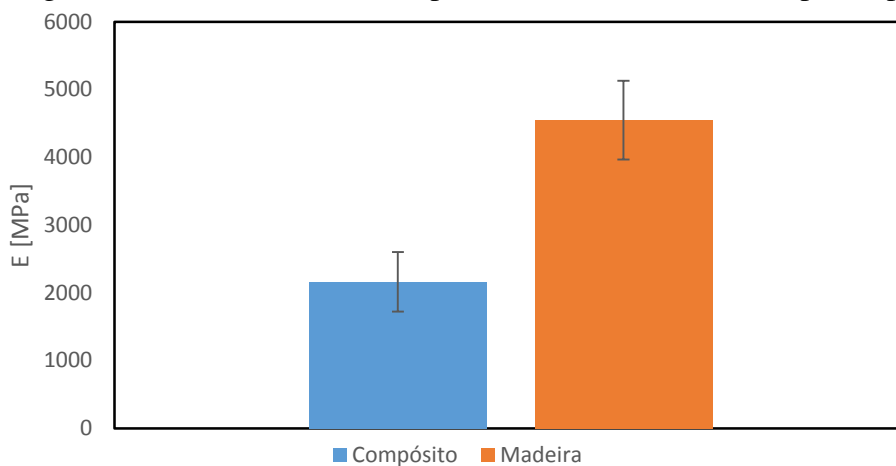


Figura 25: Resultados dos módulos de elasticidade à flexão dos materiais ensaiados.

Os valores relativos ao comportamento mecânico do material compósito são inferiores aos obtidos com a madeira

5.4 Resultados obtidos nos ensaios de compressão

Na Tabela 8 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios à compressão com os materiais considerados neste estudo, nomeadamente a tensão máxima e o módulo de elasticidade.

Tabela 8: Resultados dos ensaios de compressão realizados com o compósito e a madeira (anéis perpendiculares e paralelos).

Compósito			
Material/referência	Tensão máxima (MPa)	E (MPa)	R²
Provet 7	20,0	673,1	0,9990
Provet 8	20,9	722,0	0,9992
Provet 9	21,0	680,6	0,9986
Provet 10	20,7	666,0	0,9987
Média	20,6	685,4	0,9989
Desvio Padrão	0,4	25,1	0,0003
Madeira ⊥ anéis			
Provet 19	45,2	1177,7	0,9299
Provet 20	46,4	1121,1	0,9425
Média	45,8	1149,4	0,9362
Desvio Padrão	0,9	40,0	0,0089
Madeira // anéis			
Provet 21	6,8	330,3	0,9894
Provet 22	8,2	272,6	0,9870
Provet 23	6,2	343,9	0,9977
Média	7,0	315,6	0,9914
Desvio Padrão	1,0	37,8	0,0056

Na Figura 26 são apresentadas as curvas típicas da tensão versus extensão relativas aos ensaios de compressão realizados com o material compósito e a madeira (com anéis paralelos e perpendiculares).

Na Tabela 8, Figura 26 e Figura 27 pode-se observar que os valores de resistência mecânica e de rigidez à compressão dos diferentes materiais ensaiados. A madeira com os anéis perpendiculares apresenta valores de tensão máxima e de módulo de elasticidade superiores aos do material compósito processado e muito superiores aos da madeira com anéis paralelos. Naturalmente, a madeira com os anéis perpendiculares à aplicação de carga apresenta um comportamento mecânico (Tensão máxima e módulo de elasticidade) superior à madeira com os anéis paralelos.

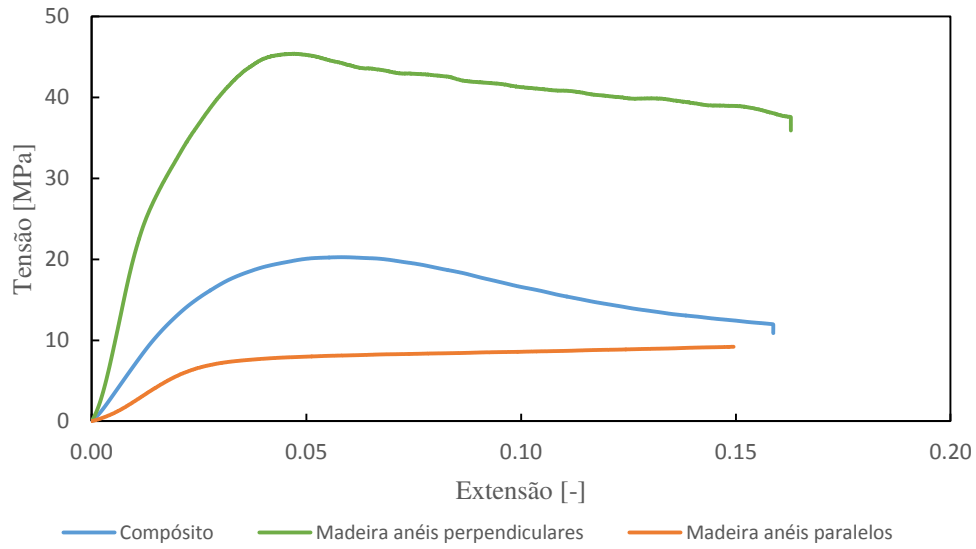


Figura 26: Curvas típicas da tensão versus extensão para os diferentes materiais: compósito e madeira (anéis paralelos e perpendiculares)

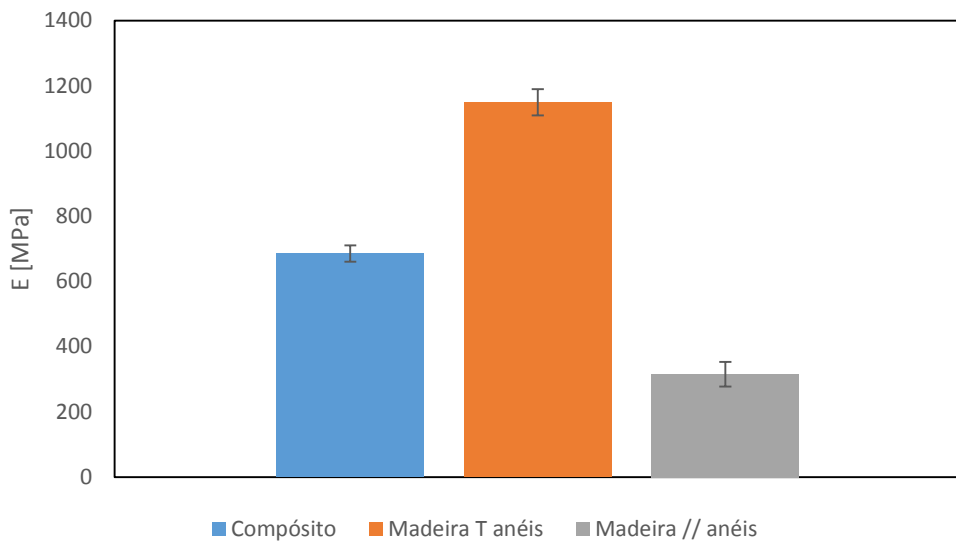


Figura 27: Resultados dos módulos de elasticidade à compressão dos diferentes materiais ensaiados: madeira e compósito processado

Na Figura 28 pode-se observar os provetes de material compósito ensaiado à compressão.





Figura 28: Provetes ensaiados à compressão

5.5 Resultados da dureza

Os resultados obtidos nos ensaios à dureza foram directamente retirados no durómetro. Foram realizados ensaios à camada exterior do extrudido e à secção cortada para comparação entre a dureza da camada superficial para o interior.

Os resultados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Valores de durezas (Shore D) obtidos com o material compósito.

Material	Dureza (Shore D)	
	Camada exterior	Secção interior
Compósito		
	60	54
	60	60
	61	61
	61	40
	56	59
Média	59,6	54,8
Desvio Padrão	2,1	3,8

6 Conclusão

Neste projecto é analisado o comportamento mecânico da madeira e do prodelix quando sujeitos à compressão e à flexão, assim como é analisado as diferenças físicas entre ambos ao nível das densidades.

Os provetes de prodelix foram produzidos através do processo de extrusão.

A diferença de densidades entre a madeira e o prodelix é mais do dobro, levando à conclusão que para uma palete com a mesma geometria e dimensão a massa do material compósito irá ser mais do dobro, trazendo desvantagens no transporte e manuseamento.

Nos ensaios mecânicos de flexão em três pontos o material compósito também apresentou valores mais desvantajosos que a madeira (módulo de young e resistência mecânica à flexão).

Nos ensaios à compressão, e devido à natureza anisotrópica dos materiais, a madeira apenas apresenta valores vantajosos quando a carga é direccionada perpendicularmente aos anéis.

O material compósito apresenta vantagens ambientais, uma vez que é produzido a partir de lixo com destino a aterros. Para além da possível diminuição do lixo nos aterros, potencia a diminuição do abate de árvores, pois apesar de não ser o substituto perfeito para paletes pode ainda ser transformado para outro tipo de aplicações como estacas para vedações.

6.1 Trabalhos futuros

Estudar as alterações nas propriedades físicas e mecânicas do prodelix com diferentes percentagens de componentes na sua composição.

Estudar as condições ideais de extrusão do prodelix.

Estudar a capacidade de isolamento térmico e sonoro do Prodelix para o uso na construção civil.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Bibliografia

- (APIP), C. (1988). NP 2257. *Materiais plásticos reforçados com fibra de vidro - Determinação das características em tracção*. Lisboa, Portugal: Instituto Português da Qualidade.
- Wood Handbook - Wood as an Engineering Material*. (2010). Madison, Estados Unidos da América: Forest Products Laboratory.
- Achilias, D. S. (2012). *MATERIAL RECYCLING TRENDS AND PERSPECTIVES*. Croácia: InTech.
- ASTM. (2000). D 792 - 00. *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of plastics by Displacement*. West Conshohocken, Pennsylvania, United States: ASTM International.
- ASTM. (2002). *Standard Test Methods for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Base Structural Material. Standard Test Methods for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Base Structural Material*. West Conshohocken, United States: ASTM International.
- ASTM. (2003). D 2240 - 03. *Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness*. West Conshohocken, Pennsylvania, United States: ASTM International.
- Berthelot, J.-M. (1999). *Composite Materials, Mechanical Behavior and Structural Analysis*. New York: Springer-Verlag.
- Broglioli, R. (2006). *Desenvolvimento da qualidade na reciclagem de plásticos*. Brasil: Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas .
- Campbell, F. (2010). *Structural Composite Materials*. ASM International.
- Carballo, J., Hermoso, E., & Fernández-Golfín, J. (2009). *Mechanical properties of structural maritime pine sawn timber from Galicia (Pinus pinaster Ait. ssp. atlantica)*. Madrid, Espanha: Laboratorio de Estructuras, Departamento de Productos Forestales (CIFOR-INIA).
- Carraher, J. C. (2010). *Introduction to Polymer Chemistry*. New York: CRC Press.
- Cerva, A. G. (2010). *Concepção e desenvolvimento de uma cadeira de lazer*. Aveiro: Universidade de Aveiro.
- Commonwealth. (2012). *Want and wane*. Obtido de national vet content: https://nationalvetcontent.edu.au/alfresco/d/d/workspace/SpacesStore/b2f0fcee-47cb-4650-b248-f533d73d5428/13_05/toolbox13_05/unit7_assembling_wall_frames/section2_putting_the_frame_together/lesson3_want_and_wane.htm (Acedido em Abril de 2015)

- Cruz, H., & Nunes, L. (2007). *A madeira como material de construção*. Portugal: Núcleo de Estruturas de Madeira. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Dodbiba, G., & Fujita, T. (Outubro de 2004). *Progress in Separating Plastic Materials for Recycling*. Japão.
- European Pallet Association, e. (Março de 2015). *Load-bearing capacity*. Obtido de Epal: <http://www.epal-pallets.org/uk/produkte/tragfaehigkeit.php>
- Figueiredo, A., Pedro, L., Barroso, J., Trindade, H., Sanches, J., Oliveira, C., & Correia, M. (s.d.). *Pinus Pinaster Aiton e Pinus Pinea L. silvicultura*.
- Fu, S.-Y., Feng, X.-Q., Lauke, B., & Mai, Y.-W. (2008). *Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites*. Elsevier.
- G., B. D., & I., C. D. (2014). *Polymer Processing, Principles and Design*. New Jersey: Wiley.
- Green, D. W., Winandy, J. E., & E., D. K. (1999). *Mechanical Properties of Wood*.
- Instituto da conservação da natureza e florestas. (s.d.). *ICNF*. Obtido de ICNF: <http://www.icnf.pt/portal/florestas/gf/ps/rp/p-pinaster> (Acedido em Março de 2015)
- ISO. (2002). *ISO 604. Plastics - Determination of compressive properties*. Geneva, Switzerland: ISO.
- Jee, D.-H., & Kang, K.-J. (Setembro de 1999). *Materials & Design. A method for optimal material selection aided with decision making theory*. Coreia do Sul: Elsevier.
- Kutz, M. (2006). *Materials and Mechanical Design, Mechanical Engineers' Handbook*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Lima, C. (s.d.). *Polímeros e Materiais Poliméricos*. Obtido de Educa: <http://educa.fc.up.pt/ficheiros/noticias/69/documentos/108/Manual%20Pol%20A1meros%20e%20Materiais%20polimericos%20NV.pdf>, Acedido em Maio de 2015
- Mettler-Toledo. (2004). *Operating Instructions*. Laboratory & Weighing Technologies.
- Normung, D. D. (1998). *DIN EN ISO 14125. Fibre-reinforced plastic composites - Determination of flexural properties*. Berlin, German: Beuth Verlag GmbH.
- Oliveira, Â., Moura, P., Pinto, M., & Providência, F. (1999). *Boas práticas florestais para o pinheiro bravo, manual*. Porto: Associação para a valorização da floresta de pinho.
- Plastics International. (2015). *HDPE (High Density Polyethylene)*. Obtido de Plastics International: <http://www.plasticsintl.com/datasheets/HDPE.pdf>, Acedido a Agosto de 2015
- Plastics International. (2015). *PVC (Polyvinyl Chloride)*. Obtido de Plastics International: <http://www.plasticsintl.com/datasheets/PVC.pdf>, Acedido em Agosto de 2015
- PLASTVAL. (2008). *Identificação de plásticos*. Obtido de PLASTVAL: <http://www.plastval.pt/index.asp?info=reciclagem/identificacao>

- Rauwendaal, C. (2014). *Polymer Extrusion 5E*. Munique: Hanser Publishers.
- Santos, P. M. (2014). *Patente N.º PT 106528*. Portugal.
- Silva, J. M. (2009). *The role of interfacial elasticity on the rheological behaviour of polymer blends*. Minho: Universidade do Minho.
- Smith, W. F. (1990). *Principles of Materials science and engineering*. Singapura: McGraw-Hill Book Co.
- Tetra Pak. (s.d.). *Recolha e Reciclagem*. Obtido em Janeiro de 2015, de Tetra Pak:
<http://www.tetrapak.com/pt/meio-ambiente/recolha-e-reciclagem>
- Utracki, L. A. (2002). *POLYMER BLENDS HANDBOOK*. Holanda: Kluwer Academic Publishers.
- Valor Ambiente. (2015). *Edifício de Triagem*. Obtido de Valor Ambiente:
<http://www.valorambiente.pt/Instala%C3%A7%C3%B5es/ETZL-ET-do-Porto-Novo/Edif%C3%ADcio-de-Triagem>
- Valorlis. (2007). *Estação de Triagem*. Obtido em Janeiro de 2015, de Valorlis:
<http://www.valorlis.pt/#/2,true,reciclaveis,2/>
- Wagner, J. R., Giles, H. F., & Mount, E. M. (2005). *Extrusion The Definitive Processing Guide and Handbook*. Norwich, NY: William Andrew, Inc.
- Whelan, T., & Dunning, D. (1988). *The Dynisco Extrusion Processors Handbook*. Londres: Dynisco Inc.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Anexos

Anexo A – Propriedades do PVC e do PEAD

Tabela A.1: Policloreto de vinilo (PVC) (Plastics International, 2015)

Propriedades	Valor
Propriedades físicas	
Densidade	1,42g/cm ³
Dureza	115 Rockwells
Absorção de água	0,06%
Propriedades mecânicas	
Resistência à tracção	51,7 MPa
Módulo de elasticidade à tracção	2,82GPa
Resistência à flexão	88,2 MPa
Módulo de elasticidade à flexão	3,3 GPa
Propriedades térmicas	
Ponto de amolecimento (Vicat)	100,5°C
Coefficiente de expansão linear	3,2x10 ⁻⁵ in/in/°F

Tabela A.2: Polietileno de alta densidade (PEAD) (Plastics International, 2015)

Propriedades	Valor
Propriedades físicas	
Densidade	0.96g/cm ³
Dureza	67 Shore D
Absorção de água	Desprezível
Propriedades mecânicas	
Resistência à tracção	29,5kPa
Módulo de elasticidade à tracção	1,55GPa
Módulo de elasticidade à flexão	1,15Gpa
Propriedades térmicas	
Ponto de fusão	126-130°C

Anexo B – Densidade da água em função da temperatura

Tabela B.1: Densidade da água em g/cm³ da água destilada em função da temperatura (Mettler-Toledo, 2004)

		Casa decimal da temperatura									
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Temperatura [°C]	10	0,99973	0,99972	0,99971	0,99970	0,99969	0,99968	0,99967	0,99966	0,99965	0,99964
	11	0,99963	0,99962	0,99961	0,99960	0,99959	0,99958	0,99957	0,99956	0,99955	0,99954
	12	0,99953	0,99951	0,99950	0,99949	0,99948	0,99947	0,99946	0,99944	0,99943	0,99942
	13	0,99941	0,99939	0,99938	0,99937	0,99935	0,99934	0,99933	0,99931	0,99930	0,99929
	14	0,99927	0,99926	0,99924	0,99923	0,99922	0,99920	0,99919	0,99917	0,99916	0,99914
	15	0,99913	0,99911	0,99910	0,99908	0,99907	0,99905	0,99904	0,99902	0,99900	0,99899
	16	0,99897	0,99896	0,99894	0,99892	0,99891	0,99889	0,99887	0,99885	0,99884	0,99882
	17	0,99880	0,99879	0,99877	0,99875	0,99873	0,99871	0,99870	0,99868	0,99866	0,99864
	18	0,99862	0,99860	0,99859	0,99857	0,99855	0,99853	0,99851	0,99849	0,99847	0,99845
	19	0,99843	0,99841	0,99839	0,99837	0,99835	0,99833	0,99831	0,99829	0,99827	0,99825
	20	0,99823	0,99821	0,99819	0,99817	0,99815	0,99813	0,99811	0,99808	0,99806	0,99804
	21	0,99802	0,99800	0,99798	0,99795	0,99793	0,99791	0,99789	0,99786	0,99784	0,99782
	22	0,99780	0,99777	0,99775	0,99773	0,99771	0,99768	0,99766	0,99764	0,99761	0,99759
	23	0,99756	0,99754	0,99752	0,99749	0,99747	0,99744	0,99742	0,99740	0,99737	0,99735
	24	0,99732	0,99730	0,99727	0,99725	0,99722	0,99720	0,99717	0,99715	0,99712	0,99710
	25	0,99707	0,99704	0,99702	0,99699	0,99697	0,99694	0,99691	0,99689	0,99686	0,99684
	26	0,99681	0,99678	0,99676	0,99673	0,99670	0,99668	0,99665	0,99662	0,99659	0,99657
	27	0,99654	0,99651	0,99648	0,99646	0,99643	0,99640	0,99637	0,99634	0,99632	0,99629
	28	0,99626	0,99623	0,99620	0,99617	0,99614	0,99612	0,99609	0,99606	0,99603	0,99600
	29	0,99597	0,99594	0,99591	0,99588	0,99585	0,99582	0,99579	0,99576	0,99573	0,99570
30	0,99567	0,99564	0,99561	0,99558	0,99555	0,99552	0,99549	0,99546	0,99543	0,99540	

Esta página foi intencionalmente deixada em branco