



**José Carlos  
Martins de Almeida**

**DESIGN COM COMPÓSITOS CONTENDO RESÍDUOS  
DE MADEIRA**



**José Carlos  
Martins de Almeida**

**DESIGN COM COMPÓSITOS CONTENDO RESÍDUOS  
DE MADEIRA**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais, realizada sob a orientação científica do Professor Dr. Joaquim Manuel Vieira, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro, e co-orientada pelo Mestre Carlos Alberto Ferreira Aguiar Pinto, Professor Associado Convidado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Dedico este trabalho à Margarida, à Carolina e ao Guilherme.

## **o júri**

presidente

**Prof. Dr. Jorge Ribeiro Frade**  
professor catedrático da Universidade de Aveiro

**Prof. Dr. Joaquim Manuel Vieira**  
professor catedrático da Universidade de Aveiro, Orientador

**Prof. Dr. João António Labrincha Batista**  
professor associado com Agregação da Universidade de Aveiro

**Prof. Dr. José Martinho Marques Oliveira**  
professor adjunto da Escola Superior de Design, Gestão e Tecnologia de Produção Aveiro Norte

**Mestre Carlos Alberto Ferreira Aguiar Pinto**  
professor associado convidado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Co-Orientador)

## **agradecimentos**

Quero agradecer ao CICECO - Centro de Investigação em Materiais Cerâmicos e Compósitos, da Universidade de Aveiro, o suporte técnico para o presente trabalho, ao Prof. Dr. José Martinho Marques Oliveira, Professor Adjunto da Escola Superior de Design, Gestão e Tecnologia de Produção Aveiro-Norte, pelo seu apoio com o software CES EduPack, ao Andrew Aitchison da WTL International pela resposta à consulta realizada e pela amabilidade que teve em enviar-me amostras de alguns dos seus produtos, e finalmente aos meus orientadores Prof. Dr. Joaquim Manuel Vieira e Mestre Carlos Alberto Ferreira Aguiar Pinto pela enorme paciência que tiveram e pelo apoio demonstrado desde o início.

**palavras-chave**

Compósitos madeira-plástico, aplicações, propriedades mecânicas, design, bases de dados de materiais, gráficos de selecção de materiais.

**resumo**

Apesar de já serem conhecidos a alguns anos, os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de madeira têm despertado a atenção de inúmeros investigadores nos últimos anos. O principal motor desse interesse tem sido, a necessidade de desenvolvimento de novos materiais assentes em princípios de sustentabilidade. O que se pretendeu com o presente trabalho foi uma catalogação dos trabalhos realizados nos últimos anos com vista a uma definição do seu estado de arte, recolhendo informação suficiente para, do ponto de vista das suas várias propriedades, poder posicioná-los em relação a outras famílias de materiais nas denominadas cartas de selecção de materiais (Materials Selection Charts). Tal posicionamento é fundamental para o trabalho futuro do designer, que necessita de todas as ferramentas que possam auxiliá-lo na escolha do material a empregar no seu projecto. Ao mesmo tempo, pretendeu-se determinar caminhos para futuros desenvolvimentos nesta família de materiais.

O potencial de aplicação destes compósitos em estruturas na orla costeira, como passadiços e cais de atracagem, é um dos elementos de estímulo do autor para um aprofundamento da caracterização destes materiais com vista a adequada compreensão das suas propriedades no desenvolvimento de novos produtos em campos como esse.

**keywords**

wood-plastic composites, mechanical properties, applications, design, materials databases, materials selection charts.

**abstract**

Despite of been well know for many years, wood-polymer composites has developed an increasing interest by materials researchers and designers. This interest has been driven by the need of developing new eco-friendly materials and products based on sustainability principles. Unfortunately the eco-designer will feel that there is a lack in the existing materials databases in respect of wood-polymer composites available data. What was intended with present work was a compilation of the work carried through in the last ones years in order to define the state of art of this type of composites, collecting enough information for, from the point of view of its several properties, locates them in relation to other families of materials in the materials selection charts. Such positioning is basic for the project designer, who will need all the tools that it can assist in choice of the material to use in its work. At the same time, it was intended to determine ways for future developments in this family of materials. The potential application of composites in structures on the coastline, as walkway and wharf for berthing is one factor in persuading the author to a deeper characterization of these materials for proper understanding of their properties in the development of new products in fields as this.

## Índice

Oportunidade e objectivos do presente trabalho.....	7
1. Compósitos de Plásticos reforçados com Partículas de Madeira.....	9
1.1. Breve História.....	9
1.2. Principais Áreas de Aplicação dos WPC.....	11
1.2.1. Jardins e Exterior.....	17
1.2.2. Construção Civil.....	19
1.2.3. Indústria e Infra-estruturas.....	20
1.2.3. Outras Aplicações.....	22
1.3. Tecnologia de Fabrico.....	24
1.3.1. Matérias-Primas.....	24
1.3.2. Processamento.....	32
1.4. Propriedades e Estrutura dos WPC.....	36
2. Design com Materiais.....	45
3.1. Análise documental sobre os compósitos de polímeros reforçados com madeira.....	53
3.2. Análise de bases de dados sobre materiais, com recolha dos dados existente sobre compósitos de polímeros reforçados com madeira.....	54
3.3. Análise e selecção das propriedades mecânicas, e outras, referidas na bibliografia e nas bases de dados pesquisadas. Compilação e reelaboração dos dados recolhidos.....	55
3.4. Posicionamento dos compósitos plástico-madeira nas cartas de selecção de materiais de Michael Ashby.....	57
4. Resultados.....	59
4.1. Análise das bases de dados sobre materiais.....	59
4.2. Análise dos dados recolhidos nas bases de dados e literatura.....	60
4.3. Posicionamento dos compósitos plástico-madeira nas cartas de selecção de materiais de Michael Ashby.....	71
5. Conclusões e Trabalho Futuro.....	77
Bibliografia:.....	81



## Índice de Figuras

Figura 1: Aplicações conhecidas dos WPC segundo o relatório da WRAP .....	12
Figura 2: Valores passados e previsões de mercado para os artigos de deck e cercas no mercado norte-americano em \$USD. ....	13
Figura 3: Mercado europeu de aplicações de WPC em 2004 (não inclui a industria automóvel).....	15
Figura 4: Evolução das aplicações dos WPC ao longo do tempo. ....	15
Figura 5: Alguns exemplos de aplicações de WPC em exterior (jardins e marinas). .....	18
Figura 6: Paletes em WPC para utilização em instalações fabris (FTI – Products www.futuresoft.net). ....	21
Figura 7: Alguns exemplos de aplicações no sector automóvel (www.werzalit.de). .....	23
Figura 8: Exemplo de aplicação no sector do mobiliário. ....	24
Figura 9: Provável reacção de interacção entre a celulose e o polipropileno-g- anidrido maleico (MAH-PP). ....	30
Figura 10: Gráfico ternário da resistência à tracção (MPa) dos compósitos em função da mistura de HDPE virgem, HDPE (polietileno de alta densidade) reciclado e serragem. ....	37
Figura 11: Gráfico ternário da resistência à flexão (MPa) dos compósitos em função da mistura de HDPE virgem, HDPE (polietileno de alta densidade) reciclado e serragem. ....	38
Figura 12: Resistência ao impacto (a) (J/m) e dureza Shore (b) em função da mistura de HDPE (polietileno de alta densidade) virgem, HDPE reciclado e serragem. ....	38
Figura 13: Resistência à tracção de compósitos de polipropileno reforçado com fibras de madeira macia e de madeira dura, com e sem agentes de acoplamento. Legenda: HW-madeira dura, SW-madeira macia, WF-fibra de madeira, MAH-PP- polipropileno anidro maleico. ....	41
Figura 14: Resistência à flexão de compósitos de polipropileno reforçado com fibras de madeira macia e de madeira dura, com e sem agentes de acoplamento.	

---

Legenda: HW-madeira dura, SW-madeira macia, WF-fibra de madeira, MAH-PP-polipropileno anidro maleico.....	42
Figura 15: Módulo elástico em flexão de compósitos de polipropileno reforçado com fibras de madeira macia e de madeira dura, com e sem agentes de acoplamento. Legenda: HW-madeira dura, SW-madeira macia, WF-fibra de madeira, MAH-PP-polipropileno anidro maleico.....	42
Figura 16: Micrografias obtidas por SEM de compósitos de WPC contendo fibras de madeira macia, obtidos pelo processo de moldagem por compressão sem (a) e com (b) a adição de agentes de acoplamento.....	43
Figura 17: Diagrama do processo de desenvolvimento de produto segundo Ashby. ....	46
Figura 18: Ordenamento dos dados requeridos pelo designer industrial para o processo de selecção de materiais, segundo o estudo de Karana e outros. ....	48
Figura 19: Carta de selecção de materiais, relacionando a densidade e o módulo de Young.....	51
Figura 20: Amostras oferecidas por cortesia da WTL International.....	56
Figura 21: Valores do módulo de elasticidade E dos compósitos de WPC (dados da MatWeb).....	63
Figura 22: Valores do módulo de elasticidade E dos compósitos de WPC (dados da MatWeb).....	63
Figura 23: Valores da energia de impacto do ensaio Izod dos compósitos de WPC, provetes entalhados (dados da MatWeb). ....	64
Figura 24: Valores da energia de impacto do ensaio Izod dos compósitos de WPC, provetes entalhados (dados da MatWeb). ....	64
Figura 25: Dependência exponencial do módulo de Young, E, com a fracção em peso de fibras nos WPC, (dados da MatWeb). Legenda: PP-polipropileno, PS-poliestireno, HDPE-polietileno de alta densidade, MI-moldagem por injeccção, EX-extrusão.....	67
Figura 26: Dependência do produto do módulo de Young pela energia de impacto Izod (provetes entalhados), $ExE_{Izod}$ , com a fracção em peso de fibras nos WPC, (dados da MatWeb). Legenda: PP-polipropileno, PS-poliestireno, HDPE-polietileno de alta densidade, MI-moldagem por injeccção, EX-extrusão. ....	68

---

Figura 27: Dependência da resistência à tracção e da resistência à flexão com a fracção em peso de fibras nos WPC, (dados da MatWeb). Legenda: PP-polipropileno, PS-poliestireno, HDPE-polietileno de alta densidade, MI-moldagem por injecção, EX-extrusão. ....	68
Figura 28: Valores do módulo de elasticidade E para compósitos Natraplast® da WTL-INTERNATIONAL.....	69
Figura 29: Valores da energia de impacto do ensaio Charpy para compósitos Natraplast® da WTL-INTERNATIONAL, para provetes entalhados.....	69
Figura 30: Carta de selecção de materiais densidade x módulo de Young, a partir dos limites propostos definidos na Tabela 2.....	72
Figura 31: Carta de selecção de materiais densidade x resistência à tensão, com a selecção dos materiais feita a partir dos limites definidos na Tabela 2. ....	72
Figura 32: Carta de selecção de materiais resistência à tensão x módulo de Young, com a selecção dos materiais feita a partir dos limites definidos na Tabela 2. ....	73
Figura 33: Carta de selecção de materiais resistência à tensão x módulo de Young, com a selecção dos materiais feita a partir dos limites definidos na Tabela 2, entrando em consideração com os limites propostos para os preços dos peletizados de WPC.....	75

## Índice de Tabelas

Tabela 1: Valores obtidos a partir da bibliografia e das bases de dados.....	62
Tabela 2: Valores máximos e mínimos de algumas propriedades dos WPC retirados da Tabela 1.....	71

## Lista de Abreviaturas

AA – agente de acoplamento

ABS – acrilonitrilo-butadieno-estireno

CBA– *chemical blowing agents* – agentes químicos de formação de espuma

CCA – crómio-cobre arsenato

E – módulo de Young

$E_m$  – módulo de Young da matriz

$E_p$  – módulo de Young das partículas de reforço

$E_{Izod}$  – energia de impacto no ensaio Izod

EX – extrusão

Fb – fibra de madeira

FM – farinha de madeira

HDPE – polietileno de alta densidade

HW – madeira dura

LDPE – polietileno de baixa densidade

MAH-PP – polipropileno anidrido-maleico

MDF – medium density fiberboard

MI – moldagem por injeção

OSB – oriented strand board

PBA – *physical blowing agents* – agentes físicos de formação de espuma

PE – polietileno

PLA – ácidos poliláctidos

PHA – polihidroxicanoatos

PP – polipropileno

PS – poliestireno

PVC – policloreto de vinilo

SW – madeira macia

WPC – *wood plastic composites* – compósitos de matriz polimérica reforçados com Madeira

### **Nota do Autor**

A metodologia seguida para a apresentação das referências bibliográficas ao longo do texto em nota de rodapé visa facilitar a consulta rápida da mesma, estando esta repetida no final do trabalho para as referências bibliográficas científicas e técnicas.

No que diz respeito aos *websites* consultados, apenas os que dizem respeito à informação de carácter técnico-científico figuram em rodapé, com a respectiva data da última consulta. Não se entendeu necessário proceder da mesma forma para os *websites* comerciais, pela sua natureza, apesar de pontualmente poderem ser indicados sucintamente no texto.

---

## Oportunidade e objectivos do presente trabalho.

Apesar de já serem conhecidos desde a aplicação pioneira da Rolls-Royce de 1916, os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de madeira conhecem actualmente um interesse renovado ditado, sem dúvida, pela necessidade de desenvolvimento de novos materiais assentes em princípios de sustentabilidade. De facto, a partir do Relatório Brundtland – elaborado pela Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, em 1987, é definido o conceito de desenvolvimento sustentável (pode ser consultado em [www.un-documents.net/wced-ocf.htm](http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm)). Segundo o relatório, sustentabilidade é: "*a satisfação das necessidades das gerações presentes sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras satisfazerem as suas*". A partir daí surgem conceitos como o *eco-design*, ou o *design sustentável*, ou ainda o *green-design*.

As empresas que têm aproveitado o conceito de sustentabilidade para promover o aparecimento de novos produtos respondem às novas oportunidades criadas pelo marketing ecológico. Às vantagens técnicas dos compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de madeira, soma-se a possibilidade de serem produzidos com matérias-primas recicladas. Aos produtos de WPC têm sido atribuídos prémios e menções pelas características de sustentabilidade destes, e tal informação é útil nas campanhas de marketing das empresas que os fabricam e os comercializam.

Este interesse crescente dos últimos 25 anos tem produzido artigos científicos, despoletado o aparecimento de empresas e de novos produtos. Constatou-se, porém, que toda essa produção de informação se mantém muito dispersa, a tal ponto que são poucos os dados existentes, sobre as propriedades e aplicações dos WPC, nas bases de dados mais conhecidas e investigadas. Tal facto leva a que os WPC passem despercebidos aos designers de produto quando estes pretendem inovar com a utilização criativa de novos materiais.

---

Foi objectivo determinante do presente trabalho reunir parte dessa informação dispersa, tentando definir o presente estado de arte destes materiais, recolhendo informação suficiente para, do ponto de vista das suas múltiplas propriedades, poder posicionar os WPC em relação a outras famílias de materiais nas chamadas cartas de selecção de materiais (Materials Selection Charts) desenvolvidos por Michael Ashby<sup>1</sup>. Espera-se assim, produzir um documento que sirva de base para o futuro trabalho do designer de produto, integrando o WPC.

Durante o processo de investigação das diversas fontes bibliográficas e de dados, verificou-se que a dispersão da pouca informação existente é uma realidade, o que reforçou a convicção da oportunidade do presente trabalho.

O potencial de aplicação destes compósitos em estruturas na orla costeira, como passadiços e cais de atracagem, é um dos elementos de estímulo do autor para um aprofundamento da caracterização destes materiais com vista à compreensão das suas propriedades no desenvolvimento de novos produtos em campos como esse.

---

<sup>1</sup> Ashby, M. and K. Johnson, *Materials and Design, The Art and Science of Material Selection in Product Design*. 2002, Oxford: Butterworth & Heinemann.

---

## 1. Compósitos de Plásticos reforçados com Partículas de Madeira

A designação “*compósitos de plástico reforçados com madeira*” é hoje aceite como dizendo respeito aos materiais compósitos de matriz termoplástica reforçados com partículas, ou fibras, de madeira. De uma forma geral, a designação mais comum é o acrónimo inglês WPC, abreviatura de “*wood-plastic composite*”. De fora ficam outros materiais também eles representando compósitos reforçados com partículas de madeira, mas em que a matriz é um plástico termoendurecível, como são os casos dos aglomerados estruturais (OSB - oriented strand board), dos aglomerados convencionais (particleboard), do MDF (medium density fiberboard), e do contraplacado (plywood).

É sobre os compósitos de matriz termoplástica reforçada com partículas/fibras de madeira que nos vamos centrar no presente trabalho. De maneira a facilitar a leitura, os materiais deste grupo de compósitos serão daqui para frente designados apenas pelo acrónimo WPC.

Os compósitos de termoplásticos reforçados com madeira (WPC) são, de uma forma geral, e como descrito à frente, obtidos dispersando partículas de madeira, normalmente finas, chamadas de serrim ou serradura na linguagem comum, ou fibras de madeira, num termoplástico levado ao estado líquido por fusão, utilizando técnicas de fabrico como a extrusão e a moldagem por injeção.

### 1.1. Breve História

Clemons<sup>2</sup>, num breve resumo sobre a história dos compósitos plástico-madeira, refere que a primeira utilização comercial conhecida destes compósitos foi o punho da manete de mudanças de alguns modelos da Rolls-Royce em 1916, num material cuja matriz era um plástico termoendurecível, a Bakelite<sup>®</sup>. Apesar dos compósitos com matriz de plásticos termoendurecíveis terem sido notícia tão

---



cedo, no passar do século XX, apenas no decorrer da década de 70 é que os compósitos de matriz termoplástica reforçados com partículas de madeira começaram verdadeiramente a ter importância. Este autor justifica tal lapso temporal com a grande separação de processos e diferenças tecnológicas entre as duas indústrias envolvidas: a dos plásticos e a das madeiras. Os WPC surgem na interface destas duas indústrias na década de 70. Em 1975 a companhia sueca SONESSON PLAST AB (Malmo, Suécia) desenvolve um compósito de policloreto de vinilo (PVC) reforçado com partículas de madeira, sob a marca registada “SONWOOD”, sendo este um dos primeiros compósitos comerciais de WPC<sup>3</sup>.

Em 1983 a empresa AMERICAN WOODSTOCK, actualmente integrante do grupo LEAR (Sheboygan, Wisconsin, USA), inicia a produção e comercialização de compósitos contendo 50% de polipropileno (PP) e 50% de serradura, em peso, destinados a substratos de painéis para interiores de automóveis, utilizando tecnologia italiana de extrusão com prensagem posterior. No início dos anos 90 a empresa Advanced Environmental Recycling Technologies (Junction, Texas, USA) e uma divisão da Mobil Chemical Company, que mais tarde deu origem à empresa Trex (Winchester, Virgínia, USA), iniciam a produção e comercialização de compósitos contendo 50% de fibras de madeira e 50% polietileno (PE), em peso, destinados a pavimentos para deck, cercas de jardim, bancos e mesas de pic-nic, e pisos industriais. Na mesma época, a empresa Strandex Corporation (Madison, Wisconsin, USA), patenteia uma tecnologia que permite a extrusão, já na forma final pretendida, de misturas contendo altos teores de fibras de madeira. Em 1993 a empresa Andersen Corporation (Bayport, Minnesota, USA) inicia a produção e a comercialização de uma linha de portas e janelas em PVC reforçado com fibras de madeira<sup>4</sup>.

---

<sup>2</sup> Clemons, C., *Wood-Plastic Composites in the United States The Interfacing of Two Industries*. Forest Products Journal, 2002. **52**(6): p. 10-18.

<sup>3</sup> Jiang, H. and D.P. Kamdem, *Development of Poly(vinyl chloride)/Wood Composites. A Literature Review*. Journal of Vinyl & Additive Technology, 2004. **10**(2): p. 59-69.

<sup>4</sup> Clemons, C., *Wood-Plastic Composites in the United States The Interfacing of Two Industries*. Forest Products Journal, 2002. **52**(6): p. 10-18.

---

## 1.2. Principais Áreas de Aplicação dos WPC.

Actualmente, contam-se numerosas aplicações, já desenvolvidas, ou em desenvolvimento, para os WPC<sup>5,6,7,8</sup>. Da revisão das fontes consultadas (artigos científicos, artigos de divulgação, websites, catálogos, etc.) agrupamos as possíveis aplicações para os WPC, da seguinte forma:

- Jardim e exterior (inclui os materiais para “deck” de jardim e piscina e cercas);
- Construção civil (inclui os perfis para janelas e portas)
- Aplicações industriais e infra-estruturas (marinas e linhas férreas)
- Outras aplicações (indústria automóvel, mobiliário)
- Nichos (indústria da embalagem)

O quadro da Figura 1 apresenta as várias aplicações indicadas na literatura.

---

<sup>5</sup> WRAP, *WOOD PLASTIC COMPOSITES STUDY - TECHNOLOGIES AND UK MARKET OPPORTUNITIES*, T.W.a.R.A. Programme, Editor. 2003: Oxon.

<sup>6</sup> McGraw, D.F. and P.M. Smith, *Opportunities for woodfiber-plastic composites in the U.S. recreational bridge market*. Forest Products Journal, 2007. **57**(3): p. 76-83.

<sup>7</sup> Yadama, V., *Residential Opportunities for Wood-Plastic Composites*, in SMALLWOOD 2006. 2006: Richmond, Virginia.

<sup>8</sup> Clemons, C., *Wood-Plastic Composites in the United States The Interfacing of Two Industries*. Forest Products Journal, 2002. **52**(6): p. 10-18.

---

Sector	Construction	Interiors / Internal Finishes	Automotive	Garden / Outdoor	Industrial / Infrastructure	Other
End Market Applications	Cladding - exterior horizontal and vertical	Balustrades	Door and head liners	Decking	Handrails	Black Piano Keys
	Doorframes and components	Blinds / shutters	Ducting	Fencing and fence posts	Industrial packaging	Hot tubs
	Ducting	Coving	Interior panels	Garden Furniture	Marine pilings / bulkheads	
	Fascias, soffits and barge boards	Dado rails	Rear Shelves	Outhouses (sheds, etc)	Pallets/Crates/totes	
	Pre-finished floorboards	Decorative profiles	Spare tyre covers	Park benches	Piers / docks	
	Roofline products	Interior panels	Truck floors	Playground equipment	Railings	
	Shingles (roof tiles)	Kitchen Cabinets		Playground surfaces	Railway sleepers	
	Stairs	Laminate flooring			Rubbish Bins	
	Timber	Office Furniture			Signage	
	Window frames and components	Shelving				
		Skirting boards				
		Sound proofing				
		Worktops				

Figura 1: Aplicações conhecidas dos WPC segundo o relatório da WRAP<sup>9</sup>

Apesar dos primeiros produtos comerciais de WPC estarem ligados à indústria automóvel, foi com a sua aplicação em produtos de jardim e exterior, que este grupo de materiais despertou um interesse crescente. São as preocupações ambientais, a tomada de consciência sobre os stocks presentes e futuros de madeira virgem e a pressão dos grupos ecologistas que faz com que surjam iniciativas, neste âmbito, do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América e das indústrias da madeira e das florestas. Além disso, a publicação de normas mais apertadas sobre a utilização de madeiras como o cedro e sequóias, madeiras tradicionalmente utilizadas nos Estados Unidos em produtos de jardim e exterior de alta qualidade, fez com que as empresas que os produziam procurassem materiais alternativos que pudessem, ao mesmo tempo, apresentar uma qualidade igual, ou mesmo superior, e que traduzissem a preocupação do sector com as questões ambientais<sup>10</sup>.

<sup>9</sup> WRAP, *WOOD PLASTIC COMPOSITES STUDY - TECHNOLOGIES AND UK MARKET OPPORTUNITIES*, T.W.a.R.A. Programme, Editor. 2003: Oxon.

<sup>10</sup> Ibid.

Ao se posicionarem como materiais alternativos à madeira, os WPC passam a ocupar uma fatia do mercado, e consolidado, dos materiais fabricados em polímeros. Entretanto, o facto de os WPC poderem ser maquinados, aparafusados, e até acabados, como a madeira, tem feito com que estes produtos estejam, cada vez mais, a ganhar mercado. A Figura 2 apresenta dados passados e previsões de volume de vendas de artigos em WPC no mercado norte-americano. São poucos, porém, os dados acerca do mercado europeu, apesar de se terem encontrado referências aos estudos efectuados por consultoras como a Principia Partners<sup>11</sup>, a AMI Consulting<sup>12</sup>, e o Hackwell Group<sup>13</sup>.

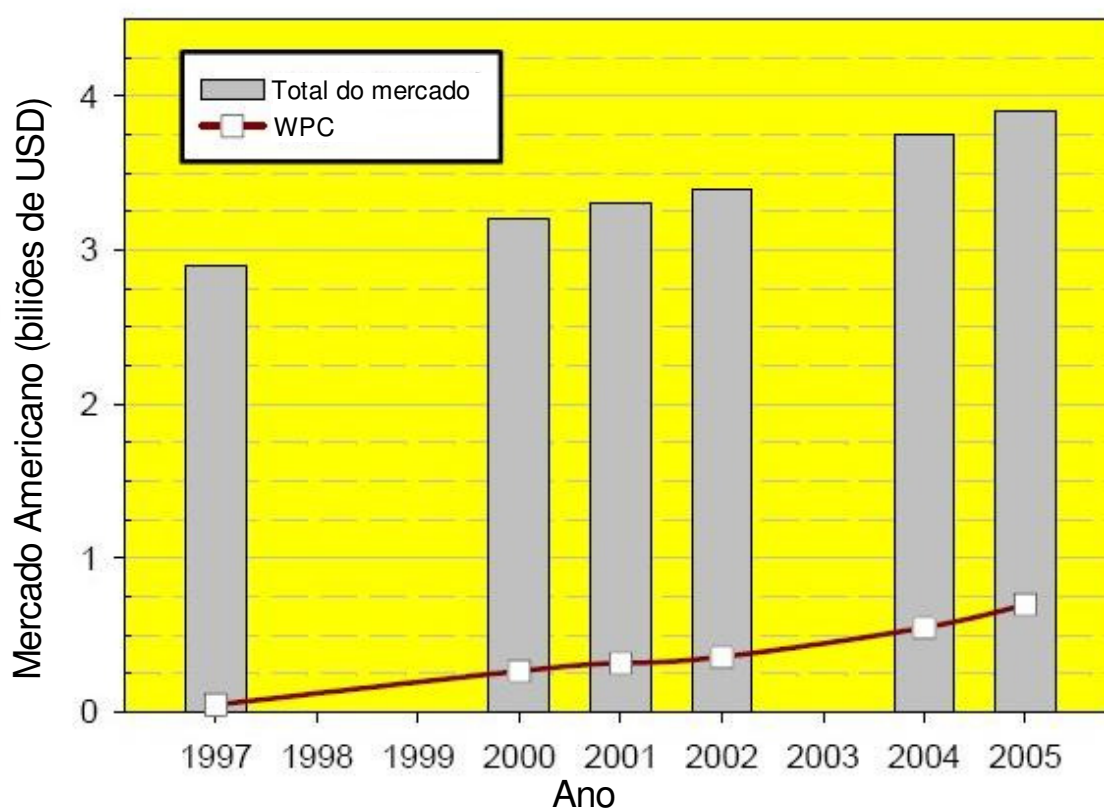


Figura 2: Valores passados e previsões de mercado para os artigos de deck e cercas no mercado norte-americano em \$USD<sup>14</sup>.

<sup>11</sup> Último estudo publicado: *Wood-Plastic Composites in Building Products 2007*. <http://www.principiaconsulting.com/publishing/reports.cfm?rpt=32>. Consultado em 5/09/2008.

<sup>12</sup> <http://www.amiplastics.com/Ami/AMIdefault.asp>. Consultado em 5/09/2008.

<sup>13</sup> <http://www.woodplasticcomposites.org/>. Consultado em 5/09/2008.

<sup>14</sup> Woolcot, M.P., P.M. Smith, and J. Hermanson, *Opportunities and challenges for WPC's emerging product areas*, in 8th International Conference in Woodfiber-Plastic Composites. 2005: Madison, WI.

Citando o último estudo do Hackwell Group, Amanda Jacob<sup>15</sup> afirma que a indústria europeia dos WPC está, finalmente, na sua fase efectiva de arranque, albergando já uma grande variedade de aplicações. Segundo a autora, o estudo citado prevê para o ano de 2009 um crescimento anual de produção de cerca de 10%, com um volume de produção de 145.000 toneladas/ano; um valor bastante acima das 99.288 toneladas produzidas em 2005.

Ao contrário do mercado norte-americano, o mercado europeu é, neste momento, dominado pelas aplicações para a indústria automóvel, a qual representa mais de metade do consumo total de WPC, particularmente notável se atendermos ao facto dessa indústria representar apenas 7% do consumo a nível mundial. Ainda segundo o estudo do Hacwell Group<sup>16</sup>, as aplicações na construção civil ocupam o segundo lugar, seguidas pelas aplicações em infra-estruturas (barreiras de som em auto-estradas, e aplicações na orla costeira), e em mobiliário (Figura 3), o que está directamente ligado, como será descrito, aos últimos desenvolvimentos no processamento por moldagem por injeção. Estas diferenças entre os mercados europeu e norte-americano são justificadas pelo facto de não existir na Europa um mercado de produtos para decking tão bem implantado como nos Estados Unidos. Além disso, a chamada “*primeira geração*” de produtos para “decking” em WPC não foi bem aceite na Europa, pois os consumidores não ficaram satisfeitos com o tipo de acabamento apresentado pelos produtos, muitas vezes referido como “*demasiadamente plástico*”, e pelo facto de serem mais pesados do que os fabricados em madeira<sup>17</sup>. A actual geração de produtos para decking, frequentemente referida como de “*segunda geração*”, já apresenta um aspecto mais próximo do da madeira, sendo também mais leves que os de primeira geração quando fabricados por extrusão de espuma.

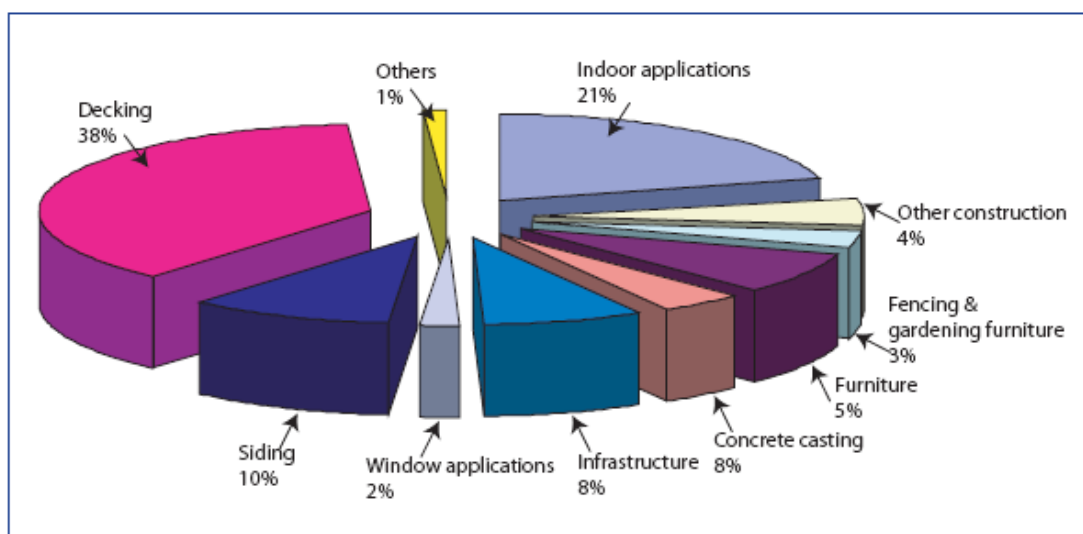
---

<sup>15</sup> Jacob, A., *WPC industry focuses on performance and cost*. Reinforced Plastics, 2006(May): p. 32-33.

<sup>16</sup> Ibid.

<sup>17</sup> WRAP, *WOOD PLASTIC COMPOSITES STUDY - TECHNOLOGIES AND UK MARKET OPPORTUNITIES*, T.W.a.R.A. Programme, Editor. 2003: Oxon.

---



European WPC applications in 2004 (non-automotive). (Source: Hackwell Group.)

Figura 3: Mercado europeu de aplicações de WPC em 2004 (não inclui a indústria automóvel)<sup>18</sup>.

A Figura 4 apresenta, de forma esquemática, aquilo que tem sido a evolução, em termos de aplicações, dos WPC, e o que se espera da continuação dessa evolução.

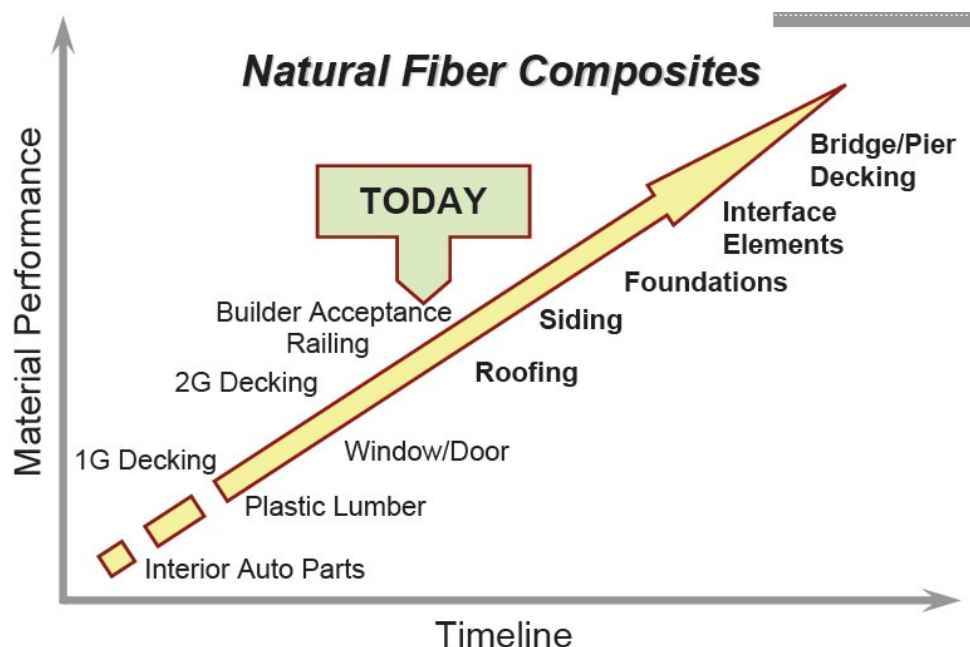


Figura 4: Evolução das aplicações dos WPC ao longo do tempo<sup>19</sup>.

<sup>18</sup> Jacob, A., WPC industry focuses on performance and cost. Reinforced Plastics, 2006(May): p. 32-33.

De entre as vantagens dos compósitos madeira-plástico em relação aos produtos fabricados em madeira, contam-se:

- Não necessitam de protectores e selantes, podendo mesmo serem pintados ou envernizados;
- Apresentam uma melhor resistência à humidade;
- São mais duráveis (não racham, não empenam, não lascam);
- São mais sustentáveis, pois podem ser fabricados a partir de materiais reciclados, e serem, eles próprios, reciclados;
- Podem ser maquinados e fixados (pregados ou aparafusados) como a madeira;
- Requerem uma menor manutenção da superfície.

Entretanto, também existem desvantagens na mesma comparação:

- Devido ao seu processo de fabrico, são mais caros do que os produtos equivalentes em madeira, ou mesmo em plástico;
- São até duas vezes mais densos do que a madeira (a massa específica dos WPC varia de 0,95 a 1,46 e a da madeira é de 0,35 a 0,59);
- Os WPC também podem sofrer ataques de fungos e envelhecerem com o tempo se não tiverem na sua composição os aditivos necessários para que tal não aconteça;
- O seu fabrico implica um consumo adicional de energia 3 a 4 vezes superior ao que é necessário no fabrico de produtos em madeira natural;
- A sua aplicação actual em elementos estruturais é ainda limitada;
- Apresenta degradação pela luz ultravioleta em aplicações exteriores.

---

<sup>19</sup> Woolcot, M.P., P.M. Smith, and J. Hermanson, *Opportunities and challenges for WPC's emerging product areas*, in 8th International Conference in Woodfiber-Plastic Composites. 2005: Madison, WI.

---

### 1.2.1. Jardins e Exterior

As aplicações em jardins e exteriores foram, sem dúvida, o principal motor de desenvolvimento recente dos compósitos madeira-plástico. Tal como já mencionado, foi a necessidade de apresentar ao mercado um produto substituto da madeira, que não fosse “totalmente plástico”, que fez disparar esse segmento da produção de produtos derivados da madeira. De acordo com o estudo do Freedonia Group de 2002<sup>20</sup>, o mercado dos artigos para decking de jardim nos Estados Unidos atingia, já em 2001, um volume anual de 11,18 milhões de metros cúbicos, sendo 11,7% desse mercado preenchido pelos WPC.

Apesar de apresentarem um custo de aquisição mais elevado, quando comparado com a madeira, os decks em WPC tem ganho mercado, com os fabricantes de WPC a apresentarem dois argumentos:

- Os WPC são produtos “*mais verdes*”, pois podem ser fabricados com os reciclados das fileiras da madeira e do plástico, sendo eles próprios os WPC, materiais recicláveis;
- Não necessitam de manutenção;

Ou seja, tem a partida um custo de ciclo de vida inferior aos dos produtos em madeira. Além dos custos de manutenção dos decks de madeira, saliente-se que durante muitos anos foi utilizado na preservação dos produtos de madeira o arsenato cromatado de cobre (CCA), produto tóxico. Existe uma campanha de sensibilização nos Estados Unidos para a necessidade de serem utilizados produtos sem arsénio na preservação da madeira em aplicações de exterior<sup>21</sup>.

A figura seguinte apresenta alguns exemplos de aplicações em decks e exterior (cercas, escadas, balaústres, abrigos de jardim, pérgolas, etc.).

---

<sup>20</sup> Ibid.

<sup>21</sup> Smith, P.M. and M.P. Wolcott, *Opportunities for Wood/Natural Fiber-Plastic Composites in Residential and industrial Applications*. Forest Products Journal, 2006. **56**(3): p. 4-11.





Figura 5: Alguns exemplos de aplicações de WPC em exterior (jardins e marinas).

### 1.2.2. Construção Civil

As aplicações conhecidas dos WPC no sector da construção civil são: perfis de portas e janelas, portas, escadas, pavimentos, telhas e elementos para telhados, condutas, revestimentos, tábuas para várias aplicações (cofragem, p.ex.), forros e remates. As aplicações em portas e janelas são, de longe, as principais no sector da construção civil.

As aplicações no sector da construção têm observado um crescimento significativo nos últimos anos: em termos de mercado norte-americano, as aplicações de WPC em portas e janelas passaram de 0,7 milhões de euros em 1992, para 45,5 milhões de euros em 2001<sup>22</sup>.

Os produtos em WPC para portas e janelas apresentam vantagens quando comparados com os fabricados em PVC, ou em madeira. As vantagens em relação à madeira são as mesmas que as já identificadas no sector de exterior e jardim. Como vantagens em relação aos produtos em PVC são indicadas a maior proximidade, em termos estéticos, aos produtos de madeira, e a possibilidade de serem maquinados e fixados como a madeira (pregados ou aparafusados). Existem também produtos laminados que combinam o WPC com o PVC; normalmente o WPC é utilizado no interior do produto para facilitar a fixação por parafusos ou pregos, e o PVC, no exterior, por questões de estética.

Fabricantes de janelas, como a AMSCO WINDOWS ([www.amscowindows.com](http://www.amscowindows.com)) e a ANDERSEN WINDOWS, fabricante desde 1994 ([www.andersenwindows.com](http://www.andersenwindows.com)), referem uma maior capacidade de isolamento térmico como vantagem principal das suas janelas em material compósito, quando comparadas com as fabricadas em madeira ou PVC.

O facto de conferirem um maior isolamento térmico, associado à possibilidade de serem fabricados com produtos das fileiras da reciclagem, podendo ainda, eles

---

próprios, serem reciclados, torna os produtos de WPC particularmente favoráveis do ponto de vista da análise do ciclo de vida (*life cycle assessment – LCA*)<sup>23</sup>. Tal vantagem, é cada vez mais relevante em conta como critério para a selecção de matérias para o sector da construção, tendo em conta a sustentabilidade<sup>24</sup>. Veja-se o programa comunitário LENSE (Label for Environmental Social and Economic Buildings), que pretende definir metodologias de melhoria da sustentabilidade dos edifícios ([www.lensebuildings.com](http://www.lensebuildings.com)), a serem aplicadas pelos parceiros sociais, em consonância com a directiva Europeia sobre o desempenho energético dos edifícios (Directiva Europeia 2002/91/EC)<sup>25</sup>. Daí a previsão de um crescimento significativo do interesse da indústria europeia por esse tipo de aplicações dos WPC<sup>26</sup>.

### 1.2.3. Indústria e Infra-estruturas

Os WPC têm sido aplicados na indústria para o fabrico de paletes de transporte/armazenagem de mercadorias de que são dados exemplos na Figura a seguir.

---

<sup>22</sup> WRAP, *WOOD PLASTIC COMPOSITES STUDY - TECHNOLOGIES AND UK MARKET OPPORTUNITIES*, T.W.a.R.A. Programme, Editor. 2003: Oxon.

<sup>23</sup> Ashby, M., H. Shercliff, and D. Cebon, *Materials - engineering, science, processing and design*, ed. Butterworth-Heinemann. 2007, Oxford: Elsevier. 514.

<sup>24</sup> Ljungberg, L.Y., *Materials selection and design for development of sustainable products*. *Materials and Design*, 2007. **28**: p. 466-479.

<sup>25</sup> <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32002L0091:EN:HTML>, última consulta em 15/09/2008.

<sup>26</sup> Jacob, A., *WPC industry focuses on performance and cost*. *Reinforced Plastics*, 2006(May): p. 32-33.

---



Figura 6: Paletes em WPC para utilização em instalações fabris (FTI – Products [www.futuresoft.net](http://www.futuresoft.net)).

Das aplicações em infra-estruturas tem sido dado grande relevo às aplicações em orlas costeiras, quer em aplicações simples como passadiços e decks, quer em aplicações que envolvem estruturas mais complexas como cais de atracagem e pontes<sup>27,28</sup>. Deve-se destacar o envolvimento da Marinha dos Estados Unidos e da Universidade do Estado de Washington na investigação e desenvolvimento de produtos de WPC para aplicações em estruturas portuárias e costeiras ([www.wsu.edu](http://www.wsu.edu)).

As aplicações dos WPC em infra-estruturas costeiras na Europa, tem sido limitadas no essencial à decks e passadiços<sup>29</sup>. Entretanto, já se encontram em funcionamento algumas estruturas mais complexas utilizando WPC, como o cais de atracagem do Vaporetto em Veneza, Itália, desenvolvido pela empresa

<sup>27</sup> Smith, P.M. and M.P. Wolcott, *Opportunities for Wood/Natural Fiber-Plastic Composites in Residential and industrial Applications*. Forest Products Journal, 2006. **56**(3): p. 4-11.

<sup>28</sup> Woolcot, M.P., P.M. Smith, and J. Hermanson, *Opportunities and challenges for WPC's emerging product areas*, in 8th International Conference in Woodfiber-Plastic Composites. 2005: Madison, WI.

<sup>29</sup> WRAP, *WOOD PLASTIC COMPOSITES STUDY - TECHNOLOGIES AND UK MARKET OPPORTUNITIES*, T.W.a.R.A. Programme, Editor. 2003: Oxon.

austríaca TECHNOPLAST ([www.technoplast.at](http://www.technoplast.at)). A opção pelos WPC vai permitir prolongar o tempo de vida útil esperada da estrutura de 5 para 20 anos<sup>30</sup>.

Aplicações de WPC em infra-estruturas são ainda os dormentes das linhas de caminho de ferro, barreiras de som ao longo de auto-estradas, e sinalética<sup>31,32</sup>.

### 1.2.3. Outras Aplicações

Os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras naturais são cada vez mais utilizados pela indústria automóvel. Dentro desse grupo de compósitos, onde se encontram os compósitos reforçados com juta, sisal, linho, cânhamo e o *knaf* (cânhamo brasileiro), tem-se verificado uma relevância crescente dos WPC<sup>33</sup>. Além disso, é nesse segmento de aplicações que se esperam os maiores crescimentos de mercado, devido, em grande parte, à aplicação da Directiva Europeia 2000/53/EG, Directiva sobre Veículos em Fim de Vida. De acordo com a directiva, os fabricantes de veículos automóveis devem garantir que 85% dos componentes sejam reciclados, apontando para uma meta de 95% em 2015. Algumas questões, como a constância de características, importante do ponto de vista da manutenção da qualidade, a densidade (algumas alternativas de reforço são mais leves), e o preço, deixam algumas dúvidas sobre a evolução dos WPC nesse sector<sup>34,35</sup>.

---

<sup>30</sup> Nota do editor, *WPCs extend service life for Venetian structures in Plastics, Additives and Compounding*. May-June 2008, Elsevier. p. 17.

<sup>31</sup> Jacob, A., *WPC industry focuses on performance and cost*. Reinforced Plastics, 2006(May): p. 32-33.

<sup>32</sup> WRAP, *WOOD PLASTIC COMPOSITES STUDY - TECHNOLOGIES AND UK MARKET OPPORTUNITIES*, T.W.a.R.A. Programme, Editor. 2003: Oxon.

<sup>33</sup> Ashori, A., *Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries!* Bioresource Technology. 2008. **99**(11): p. 4661-4667

<sup>34</sup> WRAP, *WOOD PLASTIC COMPOSITES STUDY - TECHNOLOGIES AND UK MARKET OPPORTUNITIES*, T.W.a.R.A. Programme, Editor. 2003: Oxon.

<sup>35</sup> Medina, H.V.d., *Eco-design for Materials Selection in Automobile Industry*, in Proceedings of 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering (LCE2006). 2006: Leuven - Belgium p. 299-304.

As figuras seguintes apresentam alguns exemplos de aplicações na indústria automóvel.



Figura 7: Alguns exemplos de aplicações no sector automóvel ([www.werzalit.de](http://www.werzalit.de)).

Outro mercado que é visto com grande atenção, é o do mobiliário. Existem experiências interessantes de fabrico e comercialização de mobiliário em WPC, como é o caso da IKEA ([www.ikea.com](http://www.ikea.com)), da OFK ([www.ofk.se](http://www.ofk.se)), da Mehrwerk Designlabor ([www.mehrwerkdesignlabor.de](http://www.mehrwerkdesignlabor.de)), e da Werzalit ([www.werzalit.de](http://www.werzalit.de))<sup>36</sup>.

<sup>36</sup> Carus, M. and C. Gahle, *Injection moulding with natural fibres*. Reinforced Plastics, 2008. 52(4): p. 18-22, 24-25.



Figura 8: Exemplo de aplicação no sector do mobiliário<sup>37</sup>.

Finalmente, deve-se referir algumas aplicações mais pontuais em nichos de mercado, como em embalagens, cabos de ferramentas, instrumentos musicais, vasos para plantas e brinquedos. Saliente-se que, nas aplicações em embalagens, os critérios de sustentabilidade já foram a razão de escolha do WPC como opção de material, aparecendo a divulgação de tal escolha como um elemento das campanhas de marketing; tal foi o caso das embalagens da linha de cosmética *Aquarela* da NATURA<sup>38</sup>.

### 1.3. Tecnologia de Fabrico

#### 1.3.1. Matérias-Primas

Resumidamente, as matérias-primas necessárias para a produção de compósitos de termoplásticos reforçados com madeira são termoplásticos, as partículas ou fibras de madeira, e os aditivos<sup>39</sup>. As propriedades finais do compósito dependerão do tipo de matriz e reforço empregues, além do processamento.

<sup>37</sup> Ibid.

<sup>38</sup> Nota do editor, *Interpack - A Promessa Cumprida*, in *Revipack - Revista Técnica de Embalagem*. Abril-Junho 2008: Odivelas. p. 9-15.

## Termoplásticos

A escolha do polímero a ser utilizado como matriz do WPC está dependente do facto da celulose degradar-se a temperaturas superiores aos 200°C, limitando a escolha destes aos termoplásticos que podem ser processados abaixo dessa temperatura sendo utilizados: o polietileno (PE), o polipropileno (PP), o policloreto de vinilo (PVC), o poliestireno (PS) e o acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS)<sup>40,41</sup>.

O polietileno é o polímero mais utilizado como matriz dos WPC. Está disponível nas fileiras da reciclagem dos plásticos. Tem a vantagem de ser muito estável durante a fase de processamento. São utilizados no fabrico dos compósitos de plástico-madeira os três tipos de polietileno, os polietilenos de baixa, média, e alta densidade<sup>42,43</sup>.

O polipropileno requer maiores teores de aditivos durante o processamento para evitar a sua degradação, quando comparado com o polietileno. Apresenta uma tenacidade superior à do polietileno de alta densidade, e é mais quebradiço a baixa temperatura, dificultando a utilização de parafusos ou grampos<sup>44</sup>.

O cloreto de polivinilo foi um dos primeiros polímeros a ser utilizado na fabricação dos WPC. Tem a vantagem de poder ser maleável como nos tecidos de vinil, ou rígido como nos perfis extrudidos para janelas. Além disso, a sua energia de superfície é superior à do polietileno, o que torna mais fácil o tratamento da sua superfície com tintas ou vernizes. Apresenta também melhor resistência à radiação ultra-violeta<sup>45</sup>.

---

<sup>39</sup> Clemons, C., *Wood-Plastic Composites in the United States The Interfacing of Two Industries*. Forest Products Journal, 2002. **52**(6): p. 10-18.

<sup>40</sup> Ibid.

<sup>41</sup> WRAP, *WOOD PLASTIC COMPOSITES STUDY - TECHNOLOGIES AND UK MARKET OPPORTUNITIES*, T.W.a.R.A. Programme, Editor. 2003: Oxon.

<sup>42</sup> Jiang, H. and D.P. Kamdem, *Development of Poly(vinyl chloride)/Wood Composites. A Literature Review*. Journal of Vinyl & Additive Technology, 2004. **10**(2): p. 59-69.

<sup>43</sup> WRAP, *WOOD PLASTIC COMPOSITES STUDY - TECHNOLOGIES AND UK MARKET OPPORTUNITIES*, T.W.a.R.A. Programme, Editor. 2003: Oxon.

<sup>44</sup> Ibid.

<sup>45</sup> Jiang, H. and D.P. Kamdem, *Development of Poly(vinyl chloride)/Wood Composites. A Literature Review*. Journal of Vinyl & Additive Technology, 2004. **10**(2): p. 59-69.

---



A principal fonte de fornecimento de polímeros para o fabrico dos WPC é a reciclagem dos termoplásticos. De facto, e principalmente no caso dos fabricantes de decks, é aí que vão se fornecer, veja-se o caso da empresa norte-americana TREX ([www.trex.com](http://www.trex.com)), que importa polietileno reciclado de baixa densidade de Portugal e Espanha<sup>46</sup>.

Entretanto, alguns fabricantes preferem utilizar termoplásticos virgens, para poder garantir a constância de fornecimento e de propriedades finais. No caso concreto da ANDERSEN, fabricante de portas e janelas, este integra na fabricação dos perfis de WPC os seus próprios resíduos das linhas de produção de perfis de PVC e de madeira, a que acrescenta PVC virgem ([www.andersenwindows.com](http://www.andersenwindows.com)).

### **Madeira**

A madeira é constituída basicamente por celulose e hemicelulose, com moléculas unidas umas às outras por lignina. A temperatura de degradação dos materiais lignocelulósicos, situada entre os 200 e os 220°C, vai restringir a escolha dos polímeros a serem utilizados como matriz do compósito.

Os materiais lignocelulósicos apresentam vantagens quando utilizados como reforços dos termoplásticos, por serem recursos renováveis, e de baixo custo. Porém, e devido à sua característica polar, os materiais lignocelulósicos não dispersam facilmente no meio da matriz polimérica apolar. A interacção entre as partículas/fibras de madeira e a matriz de polímero é melhorada com a utilização de tratamentos superficiais da primeira, com agentes de acoplamento<sup>47,48,49</sup>.

---

<sup>46</sup> WRAP, *WOOD PLASTIC COMPOSITES STUDY - TECHNOLOGIES AND UK MARKET OPPORTUNITIES*, T.W.a.R.A. Programme, Editor. 2003: Oxon.

<sup>47</sup> Wolcott, M.P. and K. Englund, *A Technology Review of Wood-Plastic Composites*, in 33rd International particleboard/composite materials symposium, P. Wolcott Michael, J. Tichy Robert, et al., Editor. 1999: Washington State University.

<sup>48</sup> Saheb, D.N. and J.P. Jog, *Natural Fiber Polymer Composites: A Review*. Advances in Polymer Technology, 1999. **18**(4): p. 351-363.

<sup>49</sup> Hillig, É., et al., *Modelagem de Misturas na Fabricação de Compósitos Polímero-Fibra, Utilizando Polietileno e Serragem de Pinus sp.* Ciência Florestal, 2006. **16**(3): p. 343-351.

---

A madeira é utilizada na fabricação dos WPC sob a forma de farinha ou fibras. A farinha de madeira é obtida passando o serrim residual de serrações, carpintarias, e fábricas de mobiliário, por processos de moagem, peneiração e secagem. Está disponível comercialmente, sendo apresentada em classes de tamanho de partícula, tais como, 50-100µm, 100-200µm, 200-450µm e 250-700µm. Apresenta um conteúdo de humidade da ordem dos 8%, uma densidade de 0,1-0,3g/cm<sup>3</sup> e uma razão de aspecto das partículas de 2:1 à 4:1. Também estão disponíveis no mercado fibras de madeira, geralmente obtidas pelo processo Kraft, com razões de aspecto de 10:1 e 20:1<sup>50</sup>.

A escolha da madeira a ser utilizada é importante do ponto de vista das propriedades finais do compósito. A densidade das madeiras duras, ou madeiras-de-lei (*hardwood*), como o carvalho, é cerca de duas vezes superior à das madeiras macias, ou madeiras brancas (*softwood*), como a das coníferas, influenciando assim a densidade do compósito. Também, o módulo de elasticidade das madeiras duras é superior ao das madeiras macias, resultando em compósitos mais rígidos.

A fileira da reciclagem dos produtos da indústria das madeiras é um fornecedor importante de farinha de madeira para os WPC. Estes compósitos concorrem com outros produtos como o MDF ou o OSB, cujos processos de fabrico incorporam matérias-primas da fileira da reciclagem da madeira. A fileira da reciclagem não garante, contudo, a separação dos reciclados por espécie de madeira.

Existem fornecedores de farinha de madeira como a empresa alemã J. RETTENMAIER & SÖHNE, que apresenta a marca registada *Lignoce<sup>®</sup>* ([www.holzcompound.de](http://www.holzcompound.de)), e as norte-americanas AMERICAN WOOD FIBERS ([www.awf.com](http://www.awf.com)) e CREAMFILL ([www.creamfill.com](http://www.creamfill.com)), esta última com a marca registada *CreaTech<sup>®</sup>*.

---

<sup>50</sup>

### Compósitos Peletizados

Existem actualmente alguns fabricantes de peletizados pré-compostos do WPC, preparados para o processamento por extrusão ou por moldagem por injeção. Composições disponíveis, normalmente com matrizes de polietileno, polipropileno, e PVC, são fornecidas por empresas como a BEOLOGIC ([www.beologic.com](http://www.beologic.com)) da Bélgica, a canadiana JER ENVIROTECH ([www.jerenvirotech.com](http://www.jerenvirotech.com)), a norte-americana NORTHWOOD PLASTICS ([www.northwoodplastics.com](http://www.northwoodplastics.com)), a holandesa TECH-WOOD ([www.tech-wood.nl](http://www.tech-wood.nl)), a finlandesa KARELINE ([www.kareline.fi](http://www.kareline.fi)), e as alemãs MEGAWOOD ([www.megawood.de](http://www.megawood.de)) e HALLER FORMHOLZ ([www.haller-formholz.de](http://www.haller-formholz.de)).

### Aditivos e Agentes de Acoplamento

As principais funções dos aditivos utilizados no fabrico dos compósitos plástico-madeira<sup>51,52</sup> são:

- Auxiliar nas etapas de processamento, como por exemplo, actuam como lubrificantes e agentes de acoplamento;
- Promover a estabilidade dos materiais durante o processamento e durante a vida útil do compósito, como por exemplo, como anti-oxidantes, absorventes de radiações UV e estabilizadores;
- Melhorar as propriedades dos compósitos, como por exemplo, modificadores de impacto, anti-fungos e retardantes de fogo.

Gardner<sup>53</sup> apresenta uma compilação dos aditivos mais utilizados nos compósitos plástico-madeira com matrizes de poliolefinas (grupo de polímeros a que pertencem o polietileno e o polipropileno), e de PVC.

---

OPPORTUNITIES, T.W.a.R.A. Programme, Editor. 2003: Oxon.

<sup>51</sup> Jiang, H. and D.P. Kamdem, *Development of Poly(vinyl chloride)/Wood Composites. A Literature Review*. Journal of Vinyl & Additive Technology, 2004. **10**(2): p. 59-69.

<sup>52</sup> Gardner, D.J. *Wood-Plastic Composite Extrusion Overview*. [cited; Available from: <http://www.umaine.edu/adhesion/gardner/5502002/wpc%20ext%20over%203-11-02.pdf>. Última consulta em 10/09/2008.

<sup>53</sup> Ibid.

Os agentes de acoplamento ou compatibilizantes promovem uma melhor ligação química entre a matriz e o reforço, evitando o processo de delaminação da fibra na matriz polimérica que ocorre por incompatibilidade química e compromete o reforço do compósito devido a transferência ineficiente de esforços na interface fibra-matriz. O agente de acoplamento deve interagir fortemente com as fibras através de ligações covalentes fortes, ou interações secundárias do tipo ácido-base ou pontes de hidrogénio. Outro aspecto considerado é o comprimento das cadeias do agente de acoplamento, as quais devem ser suficientemente longas e de elevado peso molecular para permitir a formação de emaranhados moleculares com a matriz polimérica na interface e promover, por sua vez, o ancoramento mecânico. Segundo os alguns autores<sup>54,55,56</sup>, os agentes de acoplamento mais utilizados no caso das matrizes de poliolefinas são os copolímeros de polipropileno-anidrido maleico (MAH-PP) contendo alto teor de MAH. A figura seguinte representa o mecanismo provável de acoplamento quando é utilizado o MAH-PP.

---

<sup>54</sup> Ibid.

<sup>55</sup> Correa, C.A., *et al.*, *Compósitos Termoplásticos com Madeira*. Polímeros: Ciência e Tecnologia, 2003. **13**(3): p. 154-165.

<sup>56</sup> Lai, S.-M., *et al.*, *Comparative study of maleated polyolefins as compatibilizers for polyethylene/wood flour composites*. Journal of Applied Polymer Science, 2003. **87**(3): p. 487-496.

---

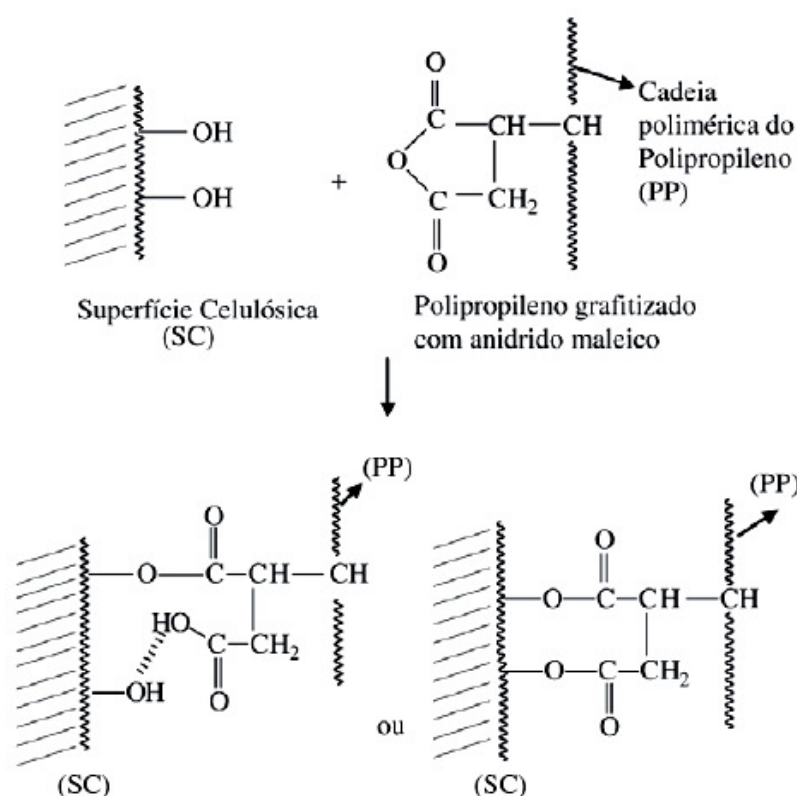


Figura 9: Provável reacção de interacção entre a celulose e o polipropileno-g-anidrido maleico (MAH-PP)<sup>57</sup>.

A literatura refere ainda outros aditivos de acoplamento como, por exemplo, silanos e isocianatos, ou de técnicas de tratamento de superfície das partículas de madeira, como a utilização de atmosferas controladas, aplicação de calor, ou a graftização<sup>58,59</sup>.

Outra classe importante de aditivos, são os que estão relacionados com a prevenção de degradação dos compósitos durante a sua vida útil. Morrel<sup>60</sup> faz um resumo das principais causas de degradação dos WPC durante a sua vida útil, destacando as que são provocadas pelo meio ambiente: radiações ultra-violeta

<sup>57</sup> Correa, C.A., et al., *Compósitos Termoplásticos com Madeira*. Polímeros: Ciência e Tecnologia, 2003. **13**(3): p. 154-165.

<sup>58</sup> Hillig, É., *Viabilidade Técnica de Produção de Compósitos de Polietileno (HPDE) Reforçados com Resíduos de Madeira e Derivados das Indústrias Moveleiras*. 2006, Universidade Federal do Paraná: Curitiba. p. 193.

<sup>59</sup> Jiang, H. and D.P. Kamdem, *Development of Poly(vinyl chloride)/Wood Composites. A Literature Review*. Journal of Vinyl & Additive Technology, 2004. **10**(2): p. 59-69.

<sup>60</sup> Morrell, J.J., et al., *Durability of Wood-Plastic Composites*. Wood Design Focus, 2006. **16**(3): p. 7-10.

(UV), humidade e fungos. Segundo este autor, a maior parte dos componentes dos WPC sofre foto-degradação com a exposição aos raios UV. A lignina, que representa apenas 25 a 30% da composição da madeira, absorve 80 a 95% do total de radiação UV. Observa-se a redução do conteúdo de lignina na superfície da madeira, tornando-a mais áspera, com alteração da cor. Segundo os autores, as matrizes poliméricas não deveriam sofrer foto-degradação, mas as impurezas existentes, quer nas poliolefinas, quer no PVC, vão sofrer foto-oxidação, com a consequente degradação da superfície do compósito, quer em termos de cor, quer em termos de resistência mecânica. Vários dos aditivos existentes no mercado previnem a foto-degradação por radiações UV, quer da matriz (HALS - hindered amine light stabilizers), quer da madeira (benzofenona)<sup>61</sup>.

Os compósitos madeira-plástico utilizados no exterior das habitações, estão também sujeitos ao ataque de micro-organismos. Um dos principais factores de degradação destes compósitos é o ataque por fungos. Os aditivos mais utilizados na prevenção dos ataques por fungos são os baseados em borato de zinco<sup>62,63</sup>.

Para as aplicações dos WPC nos sectores da construção civil, do mobiliário e automóvel, torna-se necessário melhorar a resistência ao fogo. A literatura sobre o assunto é escassa. Num trabalho recente, Guo e outros<sup>64</sup> fazem uma revisão dos aditivos propostos na literatura, propondo, por sua vez, a utilização de nanoargilas como retardantes de chama para os compósitos polímero-madeira. Segundo os autores, podem ser obtidas melhorias na capacidade de retardamento de chama destes compósitos utilizando pequenas quantidades de nanoargilas (0,1-0,5% em peso).

---

<sup>61</sup> Ibid.

<sup>62</sup> Ibid.

<sup>63</sup> Clemons, C., *Wood-Plastic Composites in the United States The Interfacing of Two Industries*. Forest Products Journal, 2002. **52**(6): p. 10-18.

<sup>64</sup> Guo, G., *et al.*, *Flame Retarding Effects of Nanoclay on Wood-Fiber Composites*. Polymer Engineering And Science, 2007. **47**(3): p. 330-336.

---

Finalmente, deve também considerar-se um grupo particular de aditivos: os agentes formadores de espuma (*foaming*)<sup>65</sup>. Na maior parte dos casos, e devido à maior densidade dos constituintes da madeira quando comparada à dos polímeros, os produtos em WPC são mais densos do que os equivalentes em polímero. Tal facto torna-se particularmente importante em aplicações que requeiram uma menor peso do produto final, como no sector automóvel, ou na construção civil. Faruk e outros<sup>66</sup>, numa revisão sobre a obtenção de estruturas de WPC em espuma referem dois grupos de agentes de formação de espuma, os agentes químicos (*chemical blowing agents – CBA, uma vez misturados com os termoplásticos libertam gases durante o aquecimento*) e os agentes físicos (*physical blowing agents PBA, que são normalmente líquidos voláteis*). Segundo os autores, a obtenção de espumas de WPC, não só diminui a densidade do compósito e o seu custo, como também melhora a sua resistência ao impacto.

### 1.3.2. Processamento

A produção dos compósitos de madeira-plástico passa pelas seguintes etapas:

- Preparação das matérias-primas;
- Conformação
- Acabamento

A fase de preparação das matérias-primas é de grande importância no processo de fabricos dos compósitos madeira-plástico. Nesta fase é feita a secagem da farinha de madeira, a menos que o processo de secagem possa ser integrado na fase da conformação.

---

<sup>65</sup> Matuana, L.M., C.B. Park, and J.J. Balatinecz, *Processing and Cell Morphology Relationships for Microcellular Foamed PVC/Wood - Fiber Composites*. Polymer Engineering And Science, 1997. **37**(7): p. 1137-1147.

<sup>66</sup> Faruk, O., A.K. Bledzki, and L.M. Matuana, *Microcellular Foamed Wood-Plastic Composites by Different Processes: a Review*. Macromolecular Materials and Engineering, 2007. **292**(2): p. 113-127.

---

Actualmente, as principais técnicas de conformação utilizadas na fabricação dos compósitos de madeira-plástico são a extrusão e a moldagem por injeção. Apesar da primeira ser, de longe, a mais utilizada, há um recurso crescente a moldagem por injeção, pois permite realizar formas mais complexas, necessárias em indústrias como a automóvel e à do mobiliário<sup>67,68,69,70</sup>.

Correa e outros<sup>71</sup>, classificam o processo de conformação por extrusão dos WPC em quatro categorias distintas:

- Madeira pré-seca; mistura pré-homogeneizada (*Pre-dry; Pre-mix*):  
Nesse processo são utilizados equipamentos no qual a fibra de madeira é submetida a processos de pré-secagem para níveis de humidade inferiores a 1% e alimenta uma extrusora de duplo fuso contra-rotacional juntamente com o polímero, normalmente na forma de pó. A mistura polímero-madeira, mais aditivos, é preparada em misturadores intensivos do tipo Henschel antes de alimentar a extrusora. Este sistema é muito utilizado para processamento de termoplásticos com baixa estabilidade térmica como o PVC.
- Madeira pré-seca; alimentação polímero-madeira em separado (*Pre-dry; Split Feed*):  
Nesse processo a resina e a fibra são alimentadas em separado propiciando um melhor controlo do tempo de residência da carga celulósica durante o processamento. São normalmente utilizadas extrusoras de rosca dupla de grande capacidade, com portos laterais de alimentação, onde a

---

<sup>67</sup> Clemons, C., *Wood-Plastic Composites in the United States The Interfacing of Two Industries*. Forest Products Journal, 2002. **52**(6): p. 10-18.

<sup>68</sup> WRAP, *WOOD PLASTIC COMPOSITES STUDY - TECHNOLOGIES AND UK MARKET OPPORTUNITIES*, T.W.a.R.A. Programme, Editor. 2003: Oxon.

<sup>69</sup> Woolcot, M.P., P.M. Smith, and J. Hermanson, *Opportunities and challenges for WPC's emerging product areas*, in 8th International Conference in Woodfiber-Plastic Composites. 2005: Madison, WI.

<sup>70</sup> Carus, M. and C. Gahle, *Injection moulding with natural fibres Reinforced Plastics*, 2008. **52**(4): p. 18-22, 24-25.

<sup>71</sup> Correa, C.A., *et al.*, *Compósitos Termoplásticos com Madeira*. Polímeros: Ciência e Tecnologia, 2003. **13**(3): p. 154-165.



fibra é adicionada ao polímero fundido, passando por zonas de mistura distributiva e de desgasificação da humidade residual.

- Madeira húmida primeiro; alimentação do polímero fundido (*Wood First; Melt Feed*):

Neste processo são necessárias duas extrusoras que operam simultaneamente; uma extrusora primária secando a farinha de madeira e uma outra, menor, plastificando o polímero e os aditivos. A empresa DAVIS-STANDARD ([www.davis-standard.com](http://www.davis-standard.com)) dos EUA patenteou um equipamento dedicado para o processamento de compósitos termoplásticos com essas características, denominado *Woodtruder*<sup>®</sup> com capacidade de até 500 kg/h.

- Madeira húmida primeiro; alimentação em separado (*Wood First, Split Feed*):

Nesse processo a farinha de madeira pode ser alimentada ainda húmida na zona de alimentação e a mistura de resina e aditivos introduzida posteriormente no barril através de um alimentador lateral. Todavia esse processo requer normalmente equipamentos com barris muito longos (L/D 44 ou 48:1) e com zonas de desgasificação próximas a zona de alimentação para remoção da humidade da madeira, o que nem sempre é possível.

Segundo Markarian<sup>72</sup>, de acordo com vários fabricantes de extrusoras, os fabricantes de compósitos madeira-plástico têm demonstrado uma preferência pela produção em linha, ou seja, a utilização directa dos vários componentes do compósito, em que a preparação e mistura destes são feitas directamente na extrusora, antes da conformação. Evita-se assim a utilização de peletizados pré-compostos, tornando a produção mais económica.

São vários os tipos de extrusora utilizados:

---

- Extrusoras de mono fuso – para a extrusão de perfis;
- Extrusoras de duplo fuso em co-rotação – para composição das matérias-primas e extrusão de perfis;
- Extrusoras de duplo fuso em rotação contrária - para composição das matérias-primas e extrusão de perfis (a mais utilizada actualmente);
- Extrusora planetária – para a composição das matérias-primas e extrusão de perfis.

As extrusoras de rosca dupla podem ainda ser paralelas ou cónicas. Segundo Markarian<sup>73</sup>, as extrusoras planetárias e dupla rosca em co-rotação apresentam vantagens na fase de composição, enquanto as extrusoras de rosca dupla em contra-rotação são mais utilizadas para a extrusão directa, principalmente de formas complexas (produzem uma tensão de corte mais baixa).

A possibilidade de produzir produtos com formas mais complexas, faz da moldagem por injeção uma tecnologia de utilização crescente, principalmente por empresas de pequena e média dimensão. O NOVA-Institute (Alemanha), com a sua “*Campaign for the Industrial Implementation of Polypropylene Natural Fibre Injection Moulding (PP-NF) and Wood Plastic Composites (WPC) – Part II*”, procura chamar a atenção de grandes empresas para as possibilidades dessa tecnologia, esperando que empresas como a IKEA, a UPM Kymmene, a Wacker Polymers e a REHAU, fiquem interessadas e contribuam para o aparecimento de novos produtos<sup>74</sup>.

---

<sup>72</sup> Markarian, J., *Outdoor living space drives growth in wood-plastic composites*. *Plastics Additives & Compounding*, 2008: p. 20-25.

<sup>73</sup> Ibid.

<sup>74</sup> Carus, M. and C. Gahle, *Injection moulding with natural fibres Reinforced Plastics*, 2008. **52(4)**: p. 18-22, 24-25.

---

Faruk e outros<sup>75</sup>, numa revisão sobre a influência do tipo de processamento na microestrutura de espumas de compósitos WPC, apontam o processamento por moldagem por injeção como o que produz a estrutura microcelular mais fina.

A prensagem a quente aparece como a técnica utilizada pela empresa italiana CHENNA ([www.chenna.it](http://www.chenna.it)) na produção de assentos para cadeiras.

#### 1.4. Propriedades e Estrutura dos WPC

Stark e Berger<sup>76</sup> num estudo sobre a influência da quantidade, tipo, e tamanho de partícula de madeira nas propriedades de compósitos de matriz de polipropileno, determinaram que o aumento da quantidade de reforço provoca um aumento da resistência à flexão até a um máximo de 40% em peso de partículas de madeira, decrescendo a partir daí. Os autores verificaram também um aumento do módulo de elasticidade, uma diminuição da resistência à tracção, e da alongação à tracção, um aumento da energia de impacto no ensaio com amostras entalhadas, e uma diminuição da mesma em amostras não entalhadas. Verificaram ainda que o aumento do tamanho das partículas de madeira, em compósitos com 40% em peso, provocava um aumento dos módulos de elasticidade em tensão e em flexão (para partículas até 0,25mm), um aumento da energia de impacto em amostras entalhadas, e uma diminuição da mesma em amostras não entalhadas.

Hillig e outros<sup>77</sup> estudaram as propriedades de diversas misturas de polietileno de alta densidade (HDPE – *high density polyethylene*), virgem e reciclado, com partículas de madeira, em chapas prensadas a 150°C, determinando que com a excepção da energia de impacto onde se verificaram valores superiores para os

---

<sup>75</sup> Faruk, O., A.K. Bledzki, and L.M. Matuana, *Microcellular Foamed Wood-Plastic Composites by Different Processes: a Review*. Macromolecular Materials and Engineering, 2007. **292**(2): p. 113-127.

<sup>76</sup> Stark, N.M. and M.J. Berger, *Effect of Species and Particle Size on Properties of Wood-Flour-Filled Polypropylene Composites*, in Proceedings, Functional Fillers. 1997: San Diego, CA.

WPC com matriz de HDPE virgem, a utilização de HDPE virgem ou reciclado não mostrou nenhuma influência nas outras propriedades mecânicas estudadas – resistências à tracção e à flexão, e dureza. Os autores verificaram que a resistência à tracção, a resistência à flexão, a dureza e a densidade das chapas produzidas eram determinadas pelo modelo linear, ou seja, são influenciadas apenas pelas características individuais de cada componente na mistura e na proporção dos volumes fraccionários das fases. Os resultados obtidos por estes autores são representados no conjunto dos gráficos ternários seguintes.

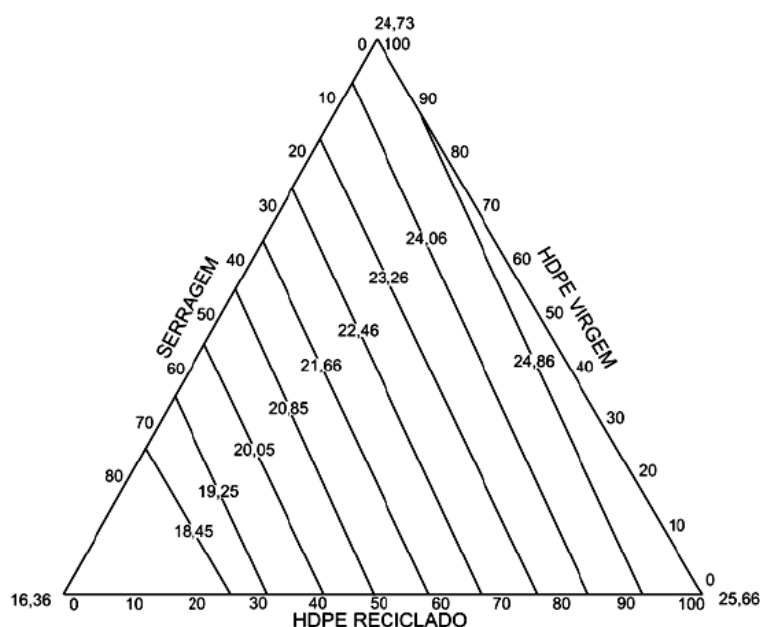


Figura 10: Gráfico ternário da resistência à tracção (MPa) dos compósitos em função da mistura de HDPE virgem, HDPE (polietileno de alta densidade) reciclado e serragem.<sup>78</sup>

<sup>77</sup> Hillig, É., et al., *Modelagem de Misturas na Fabricação de Compósitos Polímero-Fibra, Utilizando Polietileno e Serragem de Pinus sp.* Ciência Florestal, 2006. **16**(3): p. 343-351.

<sup>78</sup> Ibid.

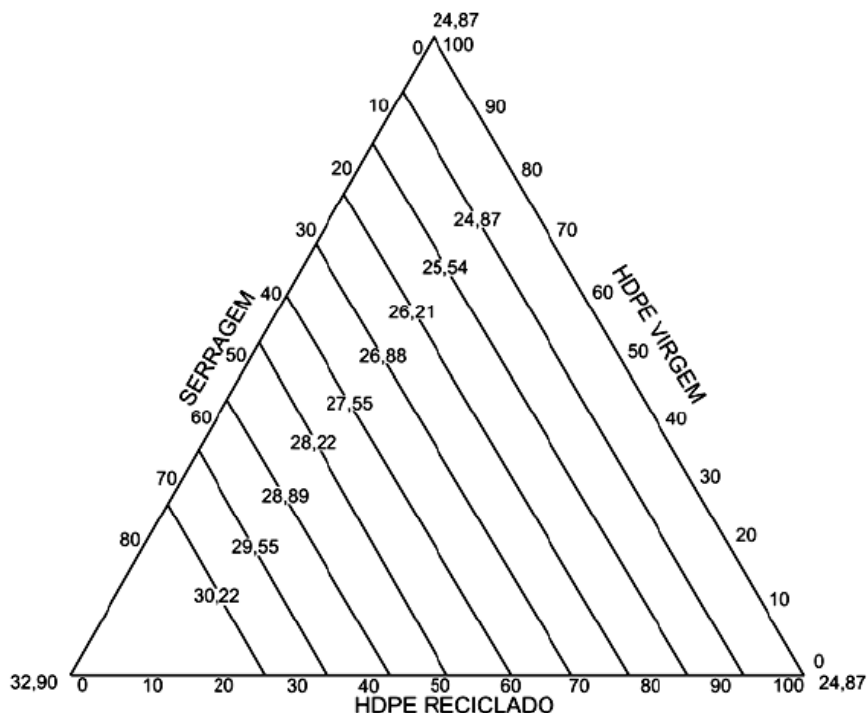


Figura 11: Gráfico ternário da resistência à flexão (MPa) dos compósitos em função da mistura de HDPE virgem, HDPE (polietileno de alta densidade) reciclado e serragem.<sup>79</sup>

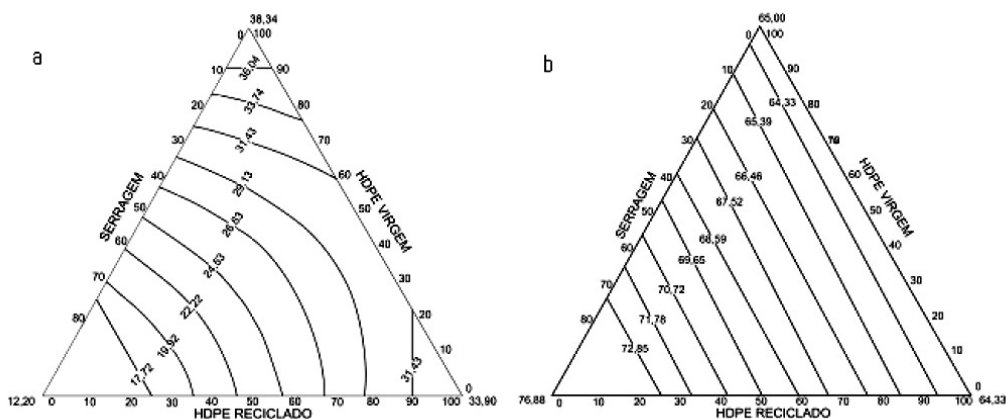


Figura 12: Resistência ao impacto (a) (J/m) e dureza Shore (b) em função da mistura de HDPE (polietileno de alta densidade) virgem, HDPE reciclado e serragem.<sup>80</sup>

Najafi e outros<sup>81</sup>, estudaram o comportamento mecânico de misturas de polipropileno (PP), polietileno de alta densidade (HDPE), virgem e reciclado, com 50% em peso de farinha de madeira, prensadas a 170°C e a 190°C, no caso do

<sup>79</sup> Ibid.  
<sup>80</sup> Ibid.

HDPE e do polipropileno respectivamente, verificando que os compósitos contendo polipropileno apresentavam um maior módulo e resistência à flexão, independentemente de ser utilizado material virgem ou reciclado, o que foi atribuído ao melhor desempenho do polipropileno de *per si*. Foram também preparadas misturas contendo ambos os polímeros em frações de peso iguais (25% + 25%), virgem ou reciclado, as quais deram origem a materiais com características muito semelhantes às dos compósitos fabricados com apenas um dos polímeros. Verificou-se contudo, no caso dos compósitos com mistura dos dois polímeros, uma diferença entre a utilização de materiais virgens ou reciclados – os compósitos contendo materiais reciclados apresentaram um maior módulo à flexão, fenómeno que foi atribuído ao aumento da cristalinidade da matriz.

Slaughter<sup>82</sup> comparou as propriedades físicas e mecânicas de 22 composições extrudidas de polipropileno reforçado com fibras de madeira, pinho (madeira macia), ou ácer (madeira dura), em quantidades que variaram entre os 50 e os 69,5% em peso, e com quantidades diferentes de agentes de acoplagem, talco, e lubrificantes. O autor verificou que, de uma forma geral, os compósitos reforçados com fibras de ácer exibiam melhores propriedades mecânicas (resistência à flexão e à torção), e que, por sua vez, os compósitos contendo pinho revelavam uma melhor qualidade de extrusão e uma menor absorção de água. O autor também verificou que na ausência dos agentes de acoplamento se obtiveram compósitos com propriedades mecânicas mais fracas.

Cui e outros<sup>83</sup> estudaram o efeito da adição de polipropileno-anidrido-maleico (MAPP), como agente de acoplagem, e de três tipos de tratamento de superfície das fibras de madeira (o método alcalino, o método silano, e o método combinado alcalino-silano), nas propriedades mecânicas e nas superfícies de fractura de

---

<sup>81</sup> Najafi, S.K., E. Hamidinia, and M. Tajvidi, *Mechanical Properties of Composites from Sawdust and Recycled Plastics*. Journal of Applied Polymer Science, 2006. **100**: p. 3641-3645.

<sup>82</sup> Slaughter, A.E., *Design and fatigue of a structural wood-plastic composite*, in Department of Civil and Environmental Engineering. 2004, Washington State University.

<sup>83</sup> Cui, Y., *et al.*, *Fabrication and interfacial modification of wood/recycled plastic composite materials* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008. **39**(4): p. 655-661.

---

compósitos extrudidos de HDPE reciclado reforçados com fibras de madeira. Os autores verificaram que um aumento na quantidade de fibras de madeira resulta num aumento da resistência à flexão e numa diminuição da energia de impacto de amostras sem entalhe. Por outro lado, o aumento do tamanho das fibras resultou num maior módulo elástico à flexão, mas numa diminuição das resistências à flexão e ao impacto. Os melhores resultados foram obtidos utilizando um agente de acoplamento e com fibras tratadas pelo método combinado alcalino-silano.

Bledzki e Faruk<sup>84</sup> estudaram a influência do agente de acoplamento (um copolímero de polipropileno anidrido maleico – MAH-PP) e do tipo de reforço nas propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno, preparados por moldagem por injeção, contendo as seguintes opções de reforço (50% em peso): madeira dura, madeira macia, fibras longas, ou aparas de madeira. Verificaram que a adição de 5% em peso do agente de acoplamento levou a um aumento de 65% na resistência a tensão e de 50% na resistência a flexão; que os compósitos com aparas de madeira, e com 5% de MAH-PP, apresentavam melhores propriedades à flexão e à tensão; que os compósitos com fibras de madeira dura, e com 5% de MAH-PP, apresentavam uma melhor resistência ao impacto; e que os compósitos com fibras longas eram menos higroscópicos. Além disso verificaram também que a adição de 5% de MAH-PP diminuía em até 75% a higroscopicidade do compósito.

Num artigo posterior, Bledzik e Faruk<sup>85</sup> estudaram a influência do tipo de processamento utilizado, moldagem por injeção ou prensagem a quente, nas propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno reforçados com 30%, e 50%, em peso de fibras de madeira dura, e de madeira macia. Foram preparadas amostras por moldagem por injeção a temperaturas entre os 150°C e os 180°C, com temperaturas de molde de 80°C-100°C, e uma pressão de 20kPa, e por

---

<sup>84</sup> Bledzki, A.K. and O. Faruk, *Wood Fibre Reinforced Polypropylene Composites: Effect of Fibre Geometry and Coupling Agent on Physico-Mechanical Properties*. Applied Composite Materials, 2003. **10**: p. 365-379.

<sup>85</sup> Bledzki, A.K. and O. Faruk, *Wood Fiber Reinforced Polypropylene Composites: Compression and Injection Molding Process*. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2004. **43**(3): p. 871-888.

---

prensagem a quente a 190°C, aplicando a mesma pressão. Os autores verificaram um aumento máximo de 155% para a resistência à tensão, e de 60% para a resistência à flexão, ao compararem os valores obtidos para os compósitos processados por moldagem por injeção com os obtidos para a prensagem a quente. Os compósitos obtidos por moldagem por injeção também apresentaram melhores valores para a resistência ao impacto. As diferenças encontradas, em termos de propriedades mecânicas, entre os dois tipos de processamento tornam-se acentuadas com o aumento do teor de fibras. Da análise da microestrutura dos compósitos por microscopia electrónica de varrimento (SEM), observaram uma melhor interacção das fibras com a matriz no caso dos compósitos processados por moldagem por injeção. As figuras seguintes apresentam os resultados obtidos por estes autores.

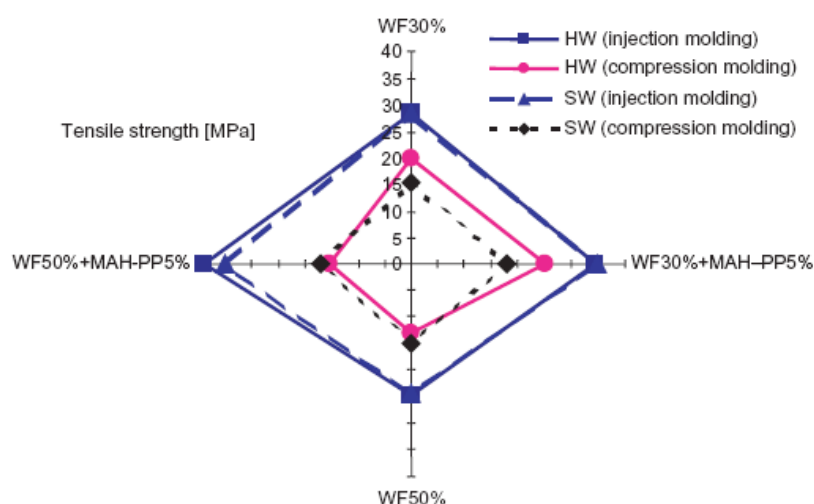


Figura 13: Resistência à tracção de compósitos de polipropileno reforçado com fibras de madeira macia e de madeira dura, com e sem agentes de acoplamento.<sup>86</sup> Legenda: HW-madeira dura, SW-madeira macia, WF-fibra de madeira, MAH-PP-polipropileno anidro maleico.



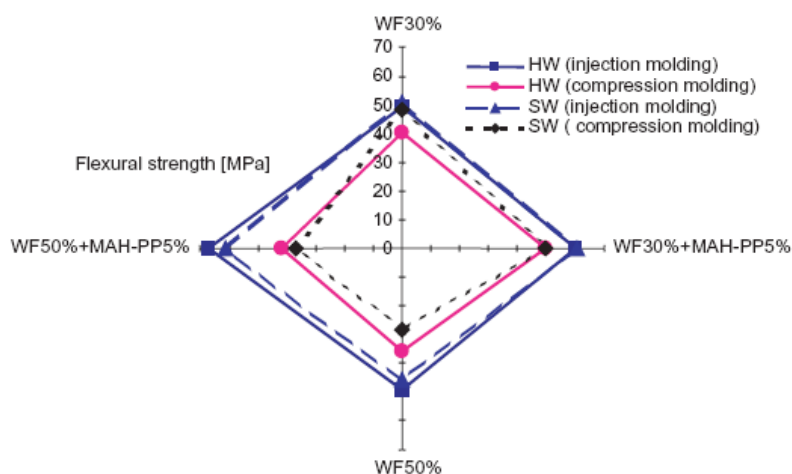


Figura 14: Resistência à flexão de compósitos de polipropileno reforçado com fibras de madeira macia e de madeira dura, com e sem agentes de acoplamento.<sup>87</sup> Legenda: HW-madeira dura, SW-madeira macia, WF-fibra de madeira, MAH-PP-polipropileno anidro maleico.

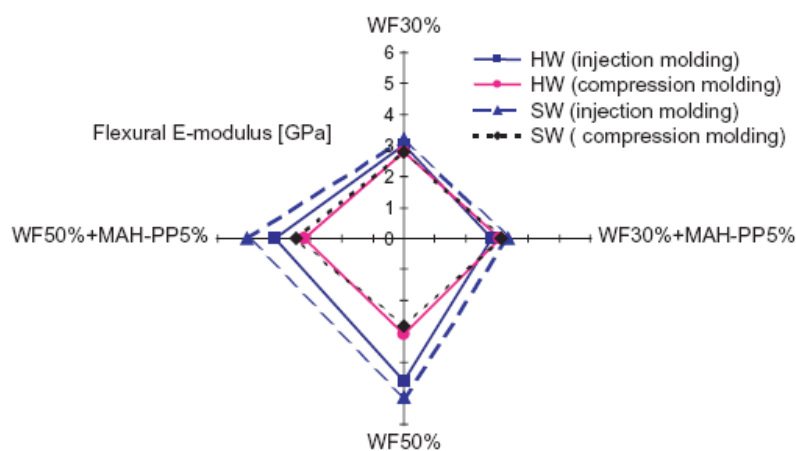
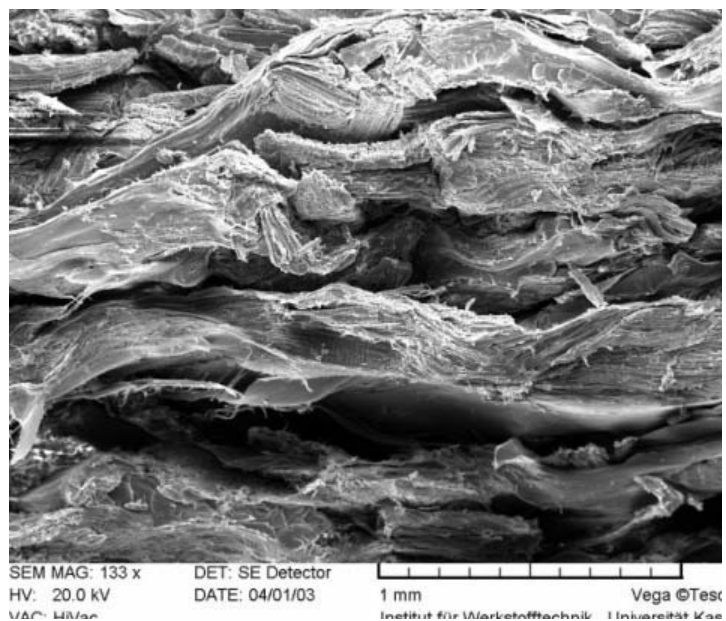


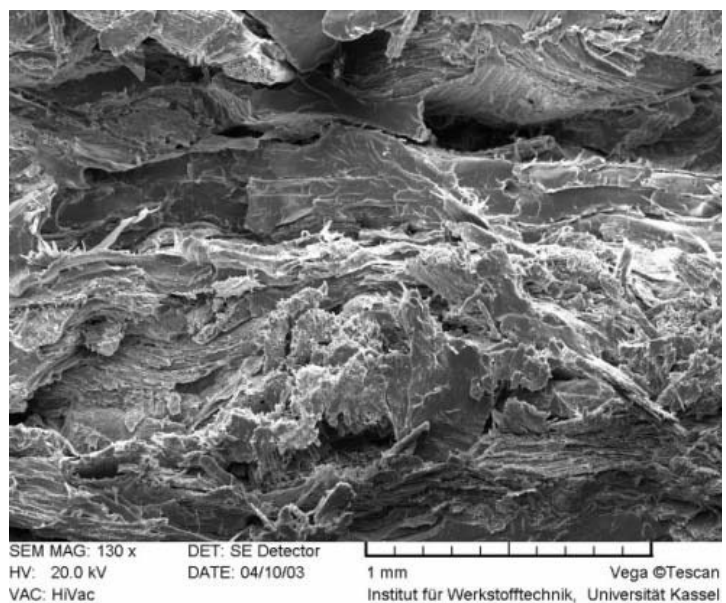
Figura 15: Módulo elástico em flexão de compósitos de polipropileno reforçado com fibras de madeira macia e de madeira dura, com e sem agentes de acoplamento.<sup>88</sup> Legenda: HW-madeira dura, SW-madeira macia, WF-fibra de madeira, MAH-PP-polipropileno anidro maleico.

87 Ibid.

88 Ibid.



(a)



(b)

Figura 16: Micrografias obtidas por SEM de compósitos de WPC contendo fibras de madeira macia, obtidos pelo processo de moldagem por compressão sem (a) e com (b) a adição de agentes de acoplamento<sup>89</sup>.

<sup>89</sup> Ibid.

Guo e outros<sup>90</sup> estudaram a influência do tamanho das fibras de madeira macia na microestrutura e densidade de espumas de compósitos de polietileno de alta densidade (HDPE) reforçadas com 50% em peso de fibras, obtidas por extrusão. Os autores verificaram que a utilização de fibras com 75 a 125 $\mu$ m produziu uma microestrutura mais uniforme, com um menor tamanho de célula (inferior a 50 $\mu$ m), e uma densidade de 0,4 a 0,8g/cm<sup>3</sup>, propondo que um tamanho mais pequeno de fibras intensifique a nucleação das células.

---

<sup>90</sup> Guo, G., et al., *Influence of wood fiber size on extrusion foaming of wood fiber/HDPE composites*. Journal of Applied Polymer Science 2008. **107**(6): p. 3505-3511.

---

## 2. Design com Materiais

*“Os engenheiros fazem coisas. E eles fazem-nas a partir de materiais.”*<sup>91</sup>

A escolha do material certo para um projecto é fundamental, pois dessa escolha vai depender o seu sucesso ou fracasso. Precisamos de materiais que suportem cargas, às vezes em ambientes hostis, que conduzam calor ou electricidade, ou que os isolem, que aceitem, ou não, fluxos magnéticos, e sempre ao mais baixo preço. Esta é a realidade por trás da selecção de materiais. E tivemos ao longo da história da humanidade exemplos de homens que souberam “domar” os “seus” materiais, tais como Gustave Eiffel, o aço, René Lalique, o vidro ou Antoni Gaudi, o betão. Homens que no seu tempo tinham disponíveis algumas dezenas de milhar de materiais. Hoje estes já são mais de 160.000.

São determinadas propriedades dos materiais que compõem um produto que vão limitar o seu desempenho. O que significa que, para que se atinja determinado nível de desempenho, deve-se escolher na fase de projecto materiais cujas propriedades, limitadoras desse mesmo desempenho, apresentem valores iguais, ou superiores, aos pretendidos. Portanto, numa primeira fase do projecto, o designer vai determinar quais são as propriedades limitadoras do design e aplicar-lhes os limites pretendidos, fazendo numa primeira crivagem, a eliminação dos materiais que não preenchem os requisitos pretendidos. Ao mesmo tempo, e porque é igualmente pertinente para o projecto, o designer vai seleccionar de entre os tipos de processamentos disponíveis o mais adequado, pois a performance do componente depende também do tipo de processamento empregue. A figura seguinte apresenta um modelo descrito por Ashby e outros<sup>92</sup> para descreverem a função da selecção de materiais no design de um produto.

---

<sup>91</sup> Ashby, M., H. Shercliff, and D. Cebon, *Materials - engineering, science, processing and design*, ed. Butterworth-Heinemann. 2007, Oxford: Elsevier. 514.

<sup>92</sup> Ibid.

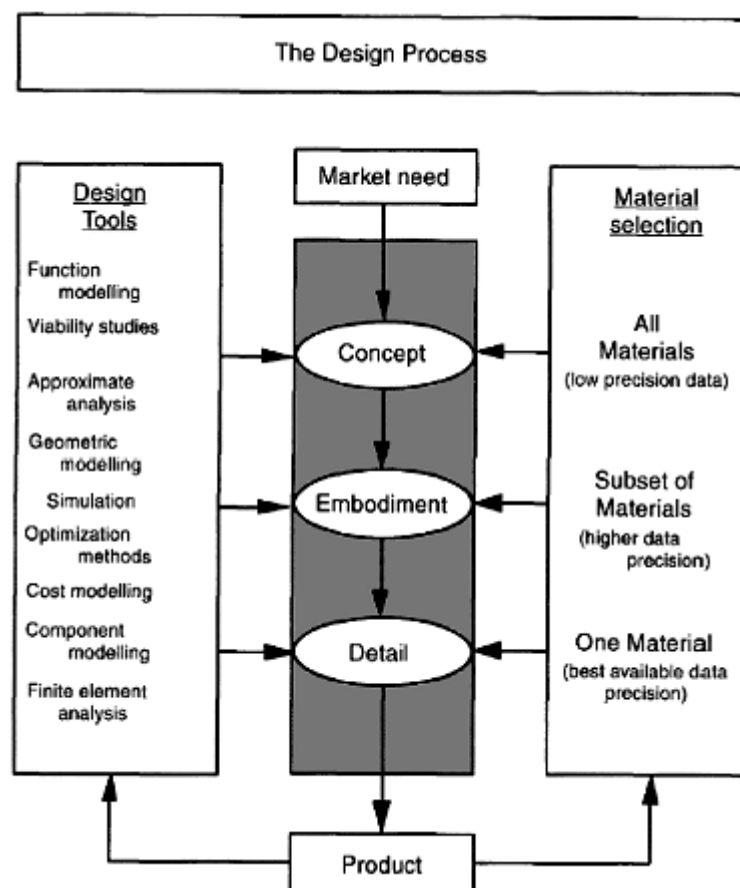


Figura 17: Diagrama do processo de desenvolvimento de produto segundo Ashby.<sup>93</sup>

A coluna central da figura representa o processo de design. O ponto de partida é a identificação de uma necessidade de mercado ou uma nova ideia, e o ponto de chegada é a especificação de um produto que incorpora a ideia do ponto de partida. Entre os dois pontos temos a definição do conceito do produto, a definição da forma do produto, e por fim a definição dos detalhes do produto. Na fase de definição de conceito, todas as opções estão abertas ao designer, e como tal um grande leque de materiais e métodos de fabrico estão disponíveis. Na fase seguinte de definição de forma são considerados os conceitos mais promissores. Os elementos que compõem o produto são dimensionados, e são seleccionados os materiais e os métodos de fabrico tendo em conta as implicações de desempenho e de custo. Esta fase termina com a escolha de um layout fiável que

<sup>93</sup> Ibid.

vai servir para passar à fase seguinte de definição de detalhes. Na definição de detalhes são aplicados métodos de optimização a componentes e a grupos de componentes por forma à maximizar o desempenho, a minimizar os custos, e a garantir todos os aspectos relacionados com a segurança. É feita a escolha da forma final, dos materiais a aplicar em cada componente, os métodos de produção são analisados e orçamentados, chegando-se, por fim, à definição de todas as especificações do produto. Normalmente nessa fase já há apenas um material escolhido para ser aplicado em cada um dos componentes do produto.

Num ambiente industrial moderno, seguindo as actuais metodologias em engenharia, no chamado *design total*, a selecção de materiais tem um papel tão importante como outras actividades, tais como a pesquisa de mercado, as especificações de projecto do produto, o projecto conceptual, o fabrico e a venda.

Karana e outros<sup>94</sup>, tentaram avaliar o processo de selecção de materiais no design de produto para determinar quais características se afirmam como as mais importantes para o designer. Após conduzirem entrevistas a designer de produtos, concluíram que só numa fase mais avançada de selecção de materiais é que as propriedades físicas destes se tornam importantes. A figura seguinte apresenta um diagrama que expõe as características apontadas, pelos entrevistados, como mais importantes durante cada uma das fases do processo de selecção de materiais.

---

<sup>94</sup> Karana, E., P. Hekkerta, and P. Kandachara, *Material considerations in product design: A survey on crucial material aspects used by product designers* Materials & Design, 2008. **29**(6): p. 1081-1089.

---

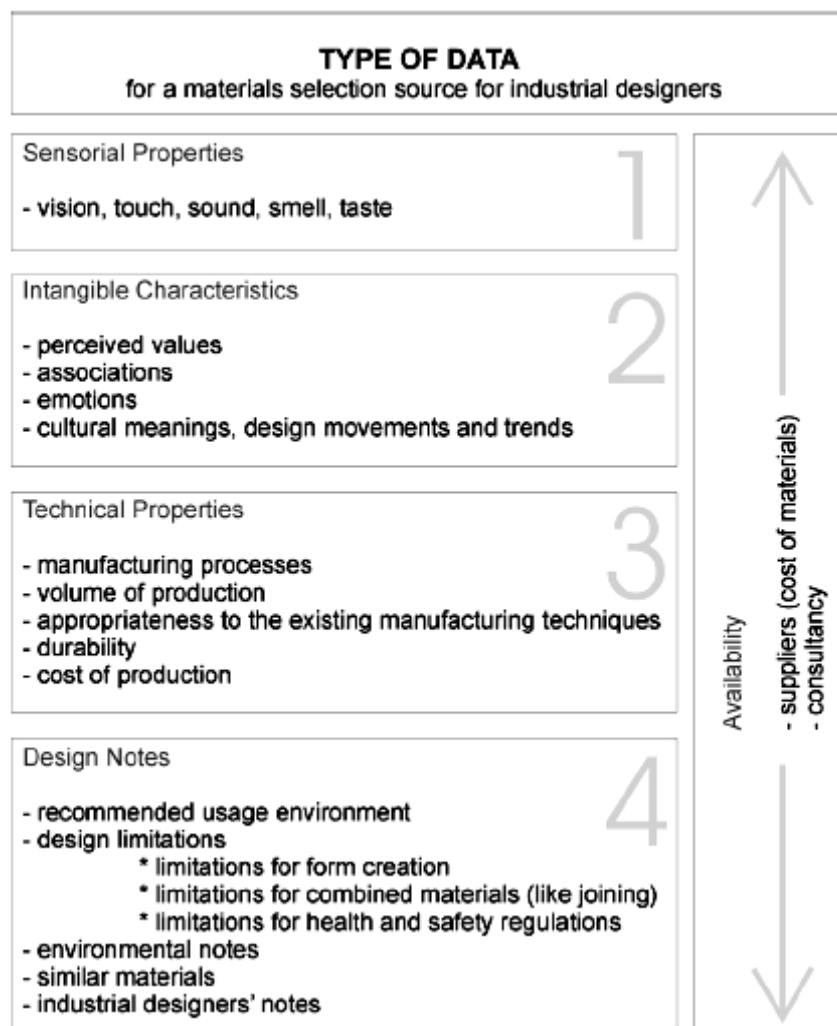


Figura 18: Ordenamento dos dados requeridos pelo designer industrial para o processo de selecção de materiais, segundo o estudo de Karana e outros.<sup>95</sup>

A selecção de materiais pelo designer de produto pressupõe necessariamente a disponibilidade da informação existente sobre os diversos materiais aplicáveis ao projecto e formas fiáveis e expeditas de acesso à informação. Essa informação é colhida em fontes tão diversas como manuais técnicos, folhetos técnico-comerciais, bases de dados electrónicas, livros de referência, feiras, visitas a fábricas, revistas técnico-científicas, motores de busca da internet, etc.

Kesteren<sup>96</sup> determinou num estudo recente sobre as necessidades de informação dos designers industriais referentes aos materiais, que estas necessidades

podem ser agrupadas em quatro tipos: a necessidade de informação comparada de materiais e produtos, a necessidade de informação sobre características de produtos e do comportamento dos materiais durante a vida desses produtos, a necessidade de informação das características técnicas dos materiais, e a necessidade de amostras dos materiais.

Ramalhete<sup>97</sup>, num estudo sobre as bases de dados digitais e software de selecção de materiais existentes, concluiu que todos os quatro métodos de selecção de materiais, por análise, síntese, similaridade e inspiração<sup>98</sup>, podem ser utilizados conjuntamente com as diferentes ferramentas digitais. O autor refere que as bases de dados utilizadas variam com o tipo de caso ou problema-situação a resolver, observando que algumas bases de dados são mais utilizadas, quer pela sua universalidade, quer pela sua funcionalidade e versatilidade, destacando as seguintes:

1. Design Insite.
2. MatWeb.
3. Os gráficos interactivos do portal Materials Selection and Processing.
4. Idemat.
5. Plastics Technology.
6. Aluselect.
7. Alloy Finder.

O mesmo autor confirma as potencialidades e pertinência do princípio de operação enunciado por Michael Ashby, que considera inicialmente o maior número de materiais possível, diminuindo a amostragem, com a evolução do projecto.

---

<sup>95</sup> Ibid.

<sup>96</sup> Kesteren, I.E.H.v., *Product designers' information needs in materials selection*. Materials and Design, 2008. **29**: p. 133-145.

<sup>97</sup> Ramalhete, P.M., *Design e selecção de materiais: novos contributos digitais para uma escolha fundamentada*, in Departamento de Comunicação e Arte. 2006, Universidade de Aveiro: Aveiro.

<sup>98</sup> Ashby, M. and K. Johnson, *Materials and Design, The Art and Science of Material Selection in Product Design*. 2002, Oxford: Butterworth & Heinemann.

---



Ramalhete<sup>99</sup> analisa a funcionalidade do software de selecção de materiais CES EDUPACK da GRANTA DESIGN ([www.grantadesign.com](http://www.grantadesign.com)) desenvolvido com base nas cartas de selecção de materiais de Michael Ashby<sup>100</sup>, e compara-o, como fez mais recentemente Kesteren<sup>101</sup>, com o software Matweb da AUTOMATION CREATIONS Inc. ([www.aciwebs.com](http://www.aciwebs.com)). Apesar de ter uma interface de utilizador aparentemente mais complexa, o CES apresenta possibilidades de pesquisa mais profundas em termos de propriedades dos materiais, e tem a vantagem de conjugar a informação sobre as propriedades dos materiais com os tipos de processamentos admissíveis. No seu estudo Kesteren<sup>102</sup> propôs a seis designers de produto a utilização de ambos os softwares num caso prático concluindo que o tipo de interface gráfico do CES era preferido pelos utilizadores, tendo estes igualmente salientado como razão de preferência a possibilidade de relacionar propriedades com processamento.

Como já foi referido, o software CES da GRANTA DESIGN baseia-se nas cartas de selecção de materiais desenvolvidos por Michael Ashby<sup>103</sup>. Os gráficos relacionam dois pares de propriedades (veja-se na Figura 18 o gráfico que relaciona o módulo de Young com a densidade) com vários conjuntos ou classes de materiais. As famílias de materiais são destacadas de forma gráfica – os vários materiais da mesma família (polímeros, por exemplo) são englobados em balões (ou *bolhas* como refere o autor), o que facilita a comparação de propriedades entre elas, bem como a previsão das mesmas para materiais compósitos. Os gráficos apresentam também linhas definidas por *índices de desempenho*, um conceito proposto por Michael Ashby e definido, por este, como sendo uma relação funcional entre propriedades do material que governam dados aspectos do desempenho de um componente.

---

<sup>99</sup> Ibid.

<sup>100</sup> Ibid.

<sup>101</sup> Kesteren, I.E.H.v., *Product designers' information needs in materials selection*. Materials and Design, 2008. **29**: p. 133-145..

<sup>102</sup> Ibid.

<sup>103</sup> Ashby, M.F., *Materials Selection in Mechanical Design*, Pergamon Press (1992)

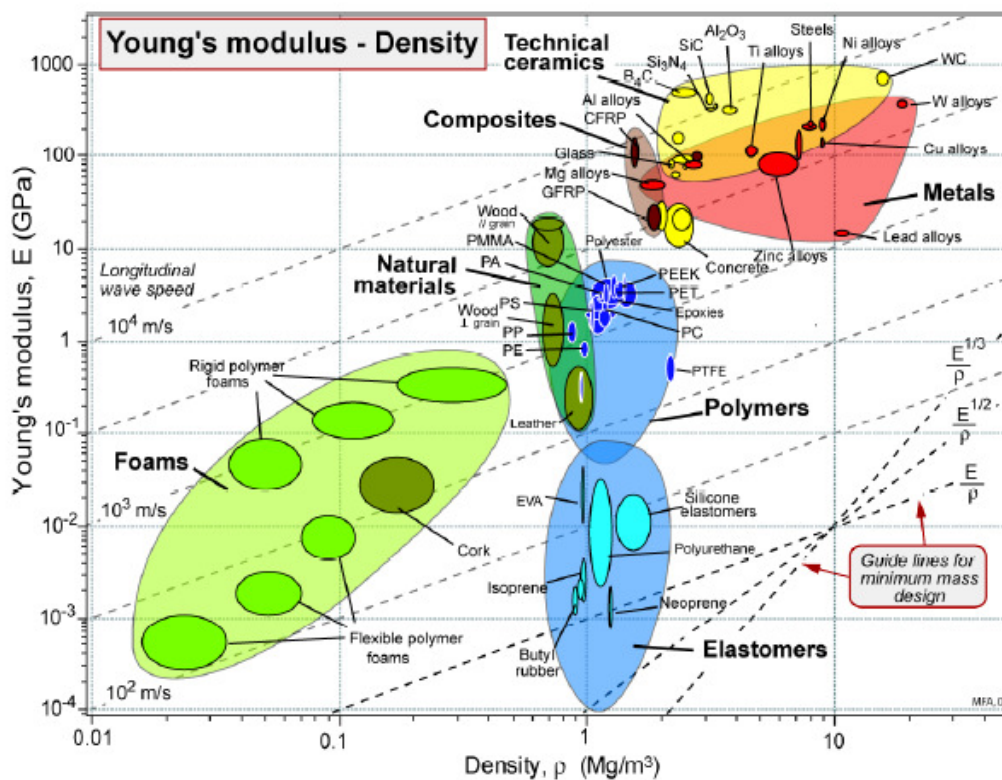


Figura 19: Carta de selecção de materiais, relacionando a densidade e o módulo de Young.<sup>104</sup>



### 3. Metodologias de trabalho

#### 3.1. Análise documental sobre os compósitos de polímeros reforçados com madeira

A investigação começou pela análise bibliográfica relacionada com os compósitos de matriz de polímeros termoplásticos reforçados com madeira em livros e revistas científicas.

Na internet foram pesquisados os termos *wood plastic composites*, *wood polymer composites*, *compósitos plástico madeira*, *compósitos polímero madeira*, bem como os mesmos termos sem a inserção das palavras *composites*, ou *compósitos*, nas seguintes bases de dados bibliográficos:

- Biblioteca Nacional.
  - Biblioteca do Instituto Superior Técnico da U.T.L.
  - Biblioteca Geral da Universidade de Coimbra.
  - Biblioteca Geral da Universidade do Minho
  - Biblioteca do Forest Products Laboratory do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América
  - Porbase, Catálogo Colectivo em linha das Bibliotecas Portuguesas.
  - COLCAT, portal para o catálogo colectivo de Bibliotecas Nacionais e Estrangeiras.
  - b-on, Biblioteca do conhecimento on-line.
  - Editora Wiley-Interscience.
  - Editora Science Direct.
  - Editora ISI Web of Science.
  - Biblioteca Mylibrary.
  - Motor de busca Google.
  - Motor de busca Yahoo.
-

Os artigos científicos, ou técnicos, teses, e relatórios, foram escolhidos de acordo com o grau de informação pretendido para o presente trabalho, sendo separados por áreas:

- Revisões, e artigos gerais sobre o tema;
- Abordagem da influência da composição dos polímeros nas propriedades;
- Abordagem da influência do tipo e tamanho de reforço nas propriedades;
- Abordagem da influência do tipo de aditivos nas propriedades;
- Abordagem da influência do tipo de processamento nas propriedades.
- Documentos técnicos sobre produtos industriais.

Os documentos foram descarregados nos formato pdf, ou html, e introduzidos no programa EndNote, versão X1, fornecido pelos Serviços de Documentação da Universidade de Aveiro.

### 3.2. Análise de bases de dados sobre materiais, com recolha dos dados existente sobre compósitos de polímeros reforçados com madeira.

Por analogia com o trabalho de Ramalhete<sup>105</sup>, que fez um estudo exaustivo das bases de dados electrónicas sobre materiais, foram seleccionadas seis bases de dados de acesso livre:

- MatWeb
- Idemat
- Materia (Materials Explorer)
- Modulor
- Plastic Technology
- Design InSite

---

<sup>105</sup> Ramalhete, P.M., *Design e selecção de materiais: novos contributos digitais para uma escolha fundamentada*, in Departamento de Comunicação e Arte. 2006, Universidade de Aveiro: Aveiro.

---

Além destas bases de dados, foi também utilizado o software de selecção de materiais CES da GRANTA DESIGN, na sua versão académica, EduPack, de 2007, numa cópia licenciada à Universidade de Aveiro, reservada para este estudo pelo Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro e pelo CICECO.

As bases de dados foram pesquisadas, e foi feita a recolha toda a informação disponível sobre compósitos de matriz de polímeros termoplásticos reforçados com madeira. A mesma procura foi feita na base de dados do software CES EduPack.

### 3.3. Análise e selecção das propriedades mecânicas, e outras, referidas na bibliografia e nas bases de dados pesquisadas. Compilação e reelaboração dos dados recolhidos.

A partir da análise do material bibliográfico recolhido e das bases de dados consultadas, procedeu-se a compilação dos dados referentes a um conjunto de propriedades dos compostos de matriz de polímeros termoplásticos reforçados com madeira.

Foram seleccionados os materiais bibliográficos que contivessem dados disponíveis como tabelas, e que pudessem ser comparados com os de outras fontes. Tal facto restringiu a escolha ao seguinte conjunto de propriedades:

- Densidade;
  - Resistência à tracção;
  - Módulo de elasticidade;
  - Resistência à flexão;
  - Módulo de flexão;
  - Energia de impacto (ensaio Izod), com e sem entalhe.
-

Foram efectuados pedidos, por correio electrónico, de fichas técnicas, e preços de mercado, de peletizados de WPC a empresas identificadas como fornecedoras desse tipo de materiais. Foram contactadas seis empresas: Megawood, Kareline, NorthWood Plastics, JER Envirotech, Beologic, WTL International.

Das empresas contactadas, obteve-se resposta apenas da WTL International que forneceu uma tabela de dados dos seus produtos, idêntica a que se encontra no seu website, sob o nome comercial Natraplast®; e enviou uma informação sobre o intervalo de preços dos produtos: de 900£/ton para composições com 70%, em peso, de fibras de madeira e sem aditivos até 1600£/ton para composições com 55%, em peso, de fibras de madeira, com aditivos. A WTL International enviou também amostras dos seus peletizados, bem como de alguns exemplos de produtos finais produzidos por clientes seus, ilustrados na figura seguinte.



Figura 20: Amostras oferecidas por cortesia da WTL International.

Os dados recolhidos sobre as propriedades dos WPC foram convertidos para o sistema internacional de unidades e resumidos numa tabela (Ver Tabela 1, página 62). Foram construídos gráficos os dados recolhidos em bases de dados, e que permitiram confirmar observações de comportamento dos WPC discutidas na literatura consultada.

Assim, foram reunidos na Tabela 1 os dados obtidos nos artigos de Clemons<sup>106</sup> e de Stark<sup>107</sup>, os dados obtidos nas fichas técnicas da MatWeb ([www.matweb.com](http://www.matweb.com)), correspondentes aos materiais da NORTH WOOD PLASTICS e da TIPCO, os dados obtidos no website da empresa inglesa WTL-INTERNATIONAL, e ainda, para termo de comparação, os dados referentes aos materiais termoplásticos utilizados como matrizes.

### 3.4. Posicionamento dos compósitos plástico-madeira nas cartas de selecção de materiais de Michael Ashby.

A partir dos dados recolhidos nas bases de dados e na literatura consultada, coligidos na Tabela 1, e com o software CES EduPack, foi determinada a localização aproximada dos compósitos plástico-madeira (WPC) nas cartas de selecção de materiais<sup>108</sup>.

A versão EduPack do CES utilizada não possui um módulo CES Constructor que permite a inserção de novos materiais, e co-edição com outros já existentes. A informação sobre o módulo CES Constructor pode ser consultada em [www.grantadesign.com/products/ces/constructor.htm](http://www.grantadesign.com/products/ces/constructor.htm)). Foi necessário recorrer a um procedimento diferente para fixar a posição dos WPC nas cartas de selecção de materiais. Tal procedimento consistiu na comparação dos valores máximos e

---

<sup>106</sup> Clemons, C., *Wood-Plastic Composites in the United States The Interfacing of Two Industries*. Forest Products Journal, 2002. **52**(6): p. 10-18.

<sup>107</sup> Stark, N.M. and M.J. Berger, *Effect of Species and Particle Size on Properties of Wood-Flour-Filled Polypropylene Composites*, in Proceedings, Functional Fillers. 1997: San Diego, CA.



mínimos das propriedades dos WPC, recolhidos nas várias fontes, com as propriedades de materiais existentes na base de dados do CES EduPack. Definiu-se assim a área das cartas correspondente aos WPC.

## 4. Resultados

### 4.1. Análise das bases de dados sobre materiais

Os resultados obtidos por consulta às bases de dados consultadas, e ao software CES EduPack, foram os seguintes:

#### **MatWeb ([www.matweb.com](http://www.matweb.com) – última consulta em 13/10/2008)**

Foram recolhidas 20 registos com propriedades de compósitos de matriz termoplástica reforçados com madeira. Dos 20 registos, 3 são genéricos (são resumos de propriedades de outros registos da MatWeb – não dizem respeito a nenhum fabricante), 16 são de produtos da empresa NORTH WOOD PLASTICS ([www.northwoodplastics.com](http://www.northwoodplastics.com)), e o último é de um produto da empresa TIPCO para aplicações em interiores de automóveis ([www.tipco-india.com](http://www.tipco-india.com)). Não estão disponíveis nenhuma informação sobre aspectos sensoriais destes compósitos. Não contém imagens. Da mesma base de dados foram também recolhidos registos resumo das características e propriedades do polipropileno (PP), do poliestireno (PS) e do polietileno de alta densidade (HDPE), para servir de comparação.

#### **Materia ([www.materialexplorer.com](http://www.materialexplorer.com) – última consulta em 13/10/2008)**

Foi encontrado apenas um registo relevante sobre os WPC, inscrito no grupo das madeiras, e que diz respeito a um produto da empresa UPM-KYMMENE ([www.upm-kymmene.com](http://www.upm-kymmene.com)). São descritos aspectos sensoriais e técnicos sem valores quantificados disponíveis, dados exemplos de aplicação dos WPC, e disponibilizados dados sobre o fabricante. Contém imagens.

#### **Plastic Technology ([www.ptonline.com](http://www.ptonline.com) – última consulta em 13/10/2008)**

Foi encontrado apenas um registo no Plaspec Global – Materials Data Center, e que diz respeito a um produto da empresa KARELINE ([www.kareline.fi](http://www.kareline.fi)). Não contém dados técnicos, apenas uma descrição da composição e alguns exemplos de aplicações. Não são descritos aspectos sensoriais. Não contém imagens.

---

Idemat ([www.idemat.nl](http://www.idemat.nl) – última consulta em 13/10/2008)

Modulor ([www.modulor.info](http://www.modulor.info) – última consulta em 13/10/2008)

DesignInSite ([www.designinsite.dk](http://www.designinsite.dk) – última consulta em 13/10/2008)

CES EduPack

Após a consulta destas bases de dados, e no que diz respeito aos WPC, não foi encontrado nenhum registo.

Apesar de não estar estruturado como uma base de dados e não ter sido aqui considerado como tal, é útil referir contudo o website [www.wpcinfo.org](http://www.wpcinfo.org) (última consulta em 13/10/2008) gerido pela Universidade do Estado de Washington (USA). Este website apresenta uma compilação da informação existente sobre os compósitos termoplásticos reforçados com madeira, com ligações a artigos técnicos, a fabricantes de compósitos, e a fornecedores de equipamento, e apresenta exemplos de aplicações dos WPC.

#### 4.2. Análise dos dados recolhidos nas bases de dados e literatura

Os dados recolhidos na literatura<sup>109,110</sup>, nas bases de dados, e nas fichas técnicas da MatWeb, e no website da empresa inglesa WTL-INTERNATIONAL, estão reunidos na Tabela 1. Refira-se que os valores dados na base de dados da MatWeb para a resistência à tensão são os valores da tensão de cedência, ponto a partir do qual o material, por convenção, sai do regime de deformação elástica, para valores de deformação crescente. Verificou-se que a MatWeb utiliza nas

---

<sup>109</sup> Clemons, C., *Wood-Plastic Composites in the United States The Interfacing of Two Industries*. Forest Products Journal, 2002. **52**(6): p. 10-18.

<sup>110</sup> Stark, N.M. and M.J. Berger, *Effect of Species and Particle Size on Properties of Wood-Flour-Filled Polypropylene Composites*, in Proceedings, Functional Fillers. 1997: San Diego, CA.

suas fichas o termo *ultimate tensile strenght* (tensão última) de forma incorrecta, pois os mesmos dados apresentados no website da NORTH WOOD PLASTICS dizem respeito ao valor da *fail tensile strength*, ou seja à tensão de ruptura. Na verdade, o termo *ultimate strength* aplica-se à tensão máxima a que um material pode ser sujeito antes de entrar em ruptura.

Optou-se ainda por manter as unidades utilizadas para os dados de energia de impacto pelo método Izod, e indicar os valores para os dois tipos de teste, sem entalhe e com entalhe, de maneira a melhor comparar os dados da literatura com os da base de dados (obtidos segundo a norma ASTM 256)<sup>111</sup>.

---

<sup>111</sup> Nuno, J.P., C.A. Bernardo, and A.T. Marques, *Compósitos de Matriz Polimérica*, in *Materiais 2000*, M.A. Fortes and P.J. Ferreira, Editors. 2003, IST Press: Lisboa. p. 105-189.

---

TABELA 1: Valores obtidos a partir da bibliografia e das bases de dados.

FONTE	REFERENCIA	COMPOSICAO (PERCENTAGENS EM PESO)	Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia a Tracao (MPa)	Modulo de Young (GPa)	Resistencia a Flexao (MPa)	Modulo Elastico em Flexao (GPa)	Energia de Impacto (Izod) com Entalhe (J/m)	Energia de Impacto (Izod) sem Entalhe (J/m)	
CLEMONS (2002)		PP	900	28,50	1,53	38,30	1,19	20,9	656,0	
		PP + 40% FM	1005	25,40	3,87	44,20	3,03	22,2	73,0	
		PP + 40% Fb HW	1003	28,20	4,20	47,90	3,25	26,2	91,0	
		PP + 40% Fb HW + 3% AA	1003	52,30	4,23	72,40	3,22	21,6	162,0	
		PP + 20% FM SW	950	26,50	1,99	41,60	1,89	15,4	128,0	
		PP + 30% FM SW	980	24,60	3,24	43,10	2,58	19,0	95,0	
		PP + 40% FM SW	1004	25,50	3,71	44,20	3,22	20,8	76,0	
		PP + 50% FM SW	1009	23,00	4,25	41,80	3,66	20,5	58,0	
		PP + 60% FM SW	1130	20,10	4,56	38,80	4,04	21,1	41,0	
		PP + 20% FM HW	940	27,90	2,87	46,20	2,00	12,8	113,0	
STARK (1997)		PP + 30% FM HW	980	27,10	3,33	46,50	2,47	15,0	87,0	
		PP + 40% FM HW	1004	25,60	4,72	45,40	3,23	16,5	63,0	
		PP + 50% FM HW	1009	24,00	5,20	42,10	4,16	17,7	49,0	
		PP + 60% FM HW	1130	19,90	4,77	38,00	4,35	17,9	44,0	
	MATWEB	NORTH WOOD	PP + 20% Fb p/MI	966	27,00	2,50	47,00	2,20	30,0	160,0
			PP + 40% Fb p/MI	1039	26,00	3,30	48,00	3,30	22,0	84,0
			PP + 60% Fb p/MI	1145	20,00	6,20	39,00	4,90	23,0	40,0
			PP + 20% Fb p/EX	951	32,00	2,70	56,00	2,50	46,0	200,0
			PP + 40% Fb p/EX	1020	27,00	3,90	54,00	3,90	25,0	100,0
			PP + 60% Fb p/EX	1142	21,00	6,00	42,00	4,90	18,0	49,0
PS + 20% Fb			1074	23,00	4,00	48,00	3,20	41,0	80,0	
PS + 40% Fb			1156	29,00	5,80	56,00	5,20	20,0	50,0	
PS + 60% Fb			1250	28,00	ND	ND	8,30	ND	ND	
HDPE + 20% Fb			1003	17,00	1,70	31,00	1,40	28,0	140,0	
NATRAPLAST (a)	TIPWOOD	HDPE + 40% Fb	1054	18,00	2,70	35,00	2,40	21,0	55,0	
		HDPE + 60% Fb	1158	16,00	4,40	30,00	4,10	16,0	27,0	
		PP + 50% Fb	1080	24,50	ND	ND	2,50	34,3	ND	
		PP + 30% Fb	998	25,88	2,73	47,63	2,04	12,7	ND	
		PP + 30% Fb + 2% AA	996	34,81	3,82	59,14	2,29	15,5	ND	
		PP + 50% Fb	1070	25,09	4,07	47,66	2,84	8,5	ND	
		PP + 50% Fb + 2% AA	1069	40,86	4,48	71,13	2,93	11,5	ND	
		PP	932	32,60	1,79	47,80	1,43	79,1	807,0	
		PS	894	44,30	3,06	78,40	3,49	102,0	411,0	
		HDPE	954	26,00	1,00	27,50	1,07	80,2	256,0	

LEGENDA: PP-polipropileno; PS-poliestireno; HDPE-poliuretano de alta densidade; Fb-fibra de madeira; FM-farinha de madeira; SW-madeira macia; HW-madeira dura; AA-agente de acoplamento; MI-moldagem por injeção; EX-extrusão; ND-não determinado.

(a) A energia de impacto foi determinada pelo método Charpy.

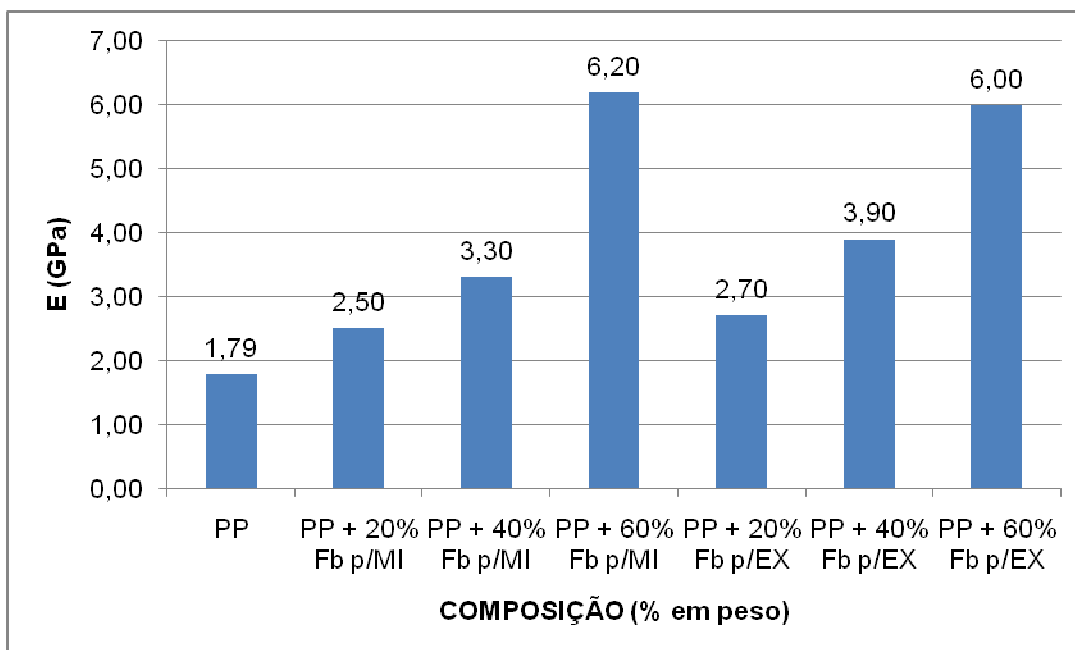


Figura 21: Valores do módulo de elasticidade E dos compósitos de WPC (dados da MatWeb).

Legenda: PP-polipropileno, Fb-fibra de madeira, MI-moldagem por injeção, EX-extrusão.

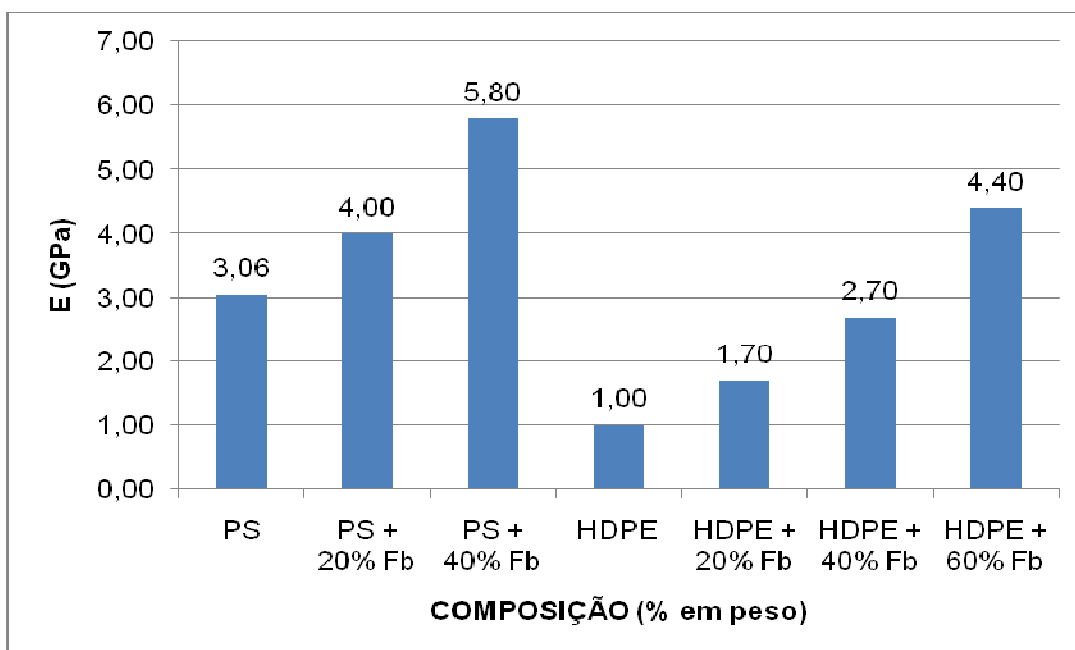


Figura 22: Valores do módulo de elasticidade E dos compósitos de WPC (dados da MatWeb).

Legenda: PS-poliestireno, Fb-fibra de madeira, HDPE-polietileno de alta densidade.

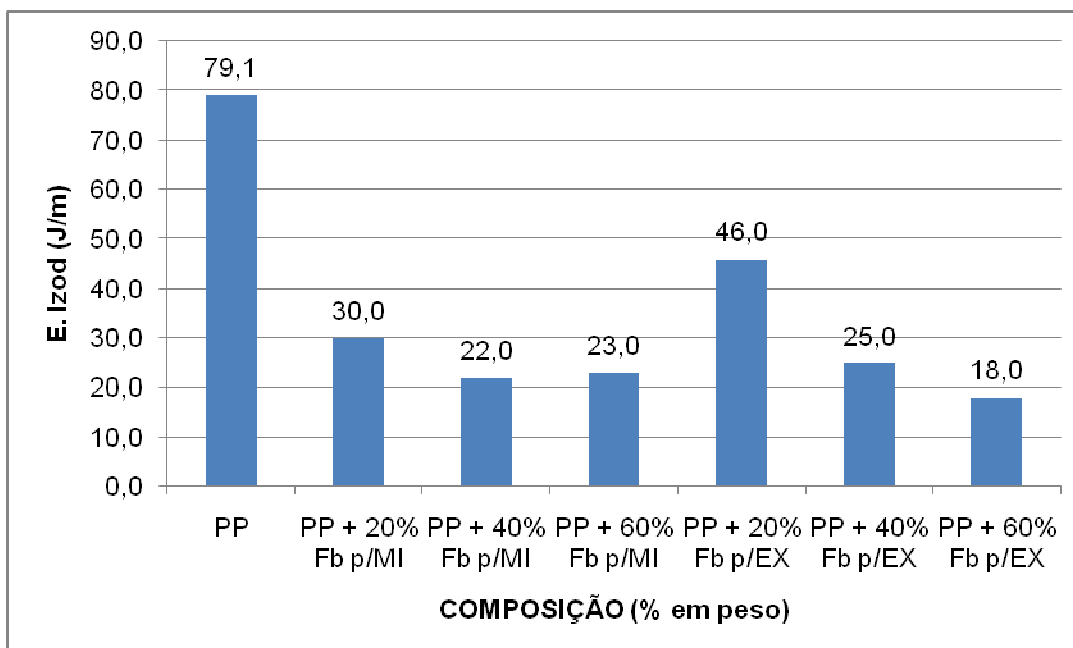


Figura 23: Valores da energia de impacto do ensaio Izod dos compósitos de WPC, provetes entalhados (dados da MatWeb).

Legenda: PP-polipropileno, Fb-fibra de madeira, MI-moldagem por injeção, EX-extrusão.

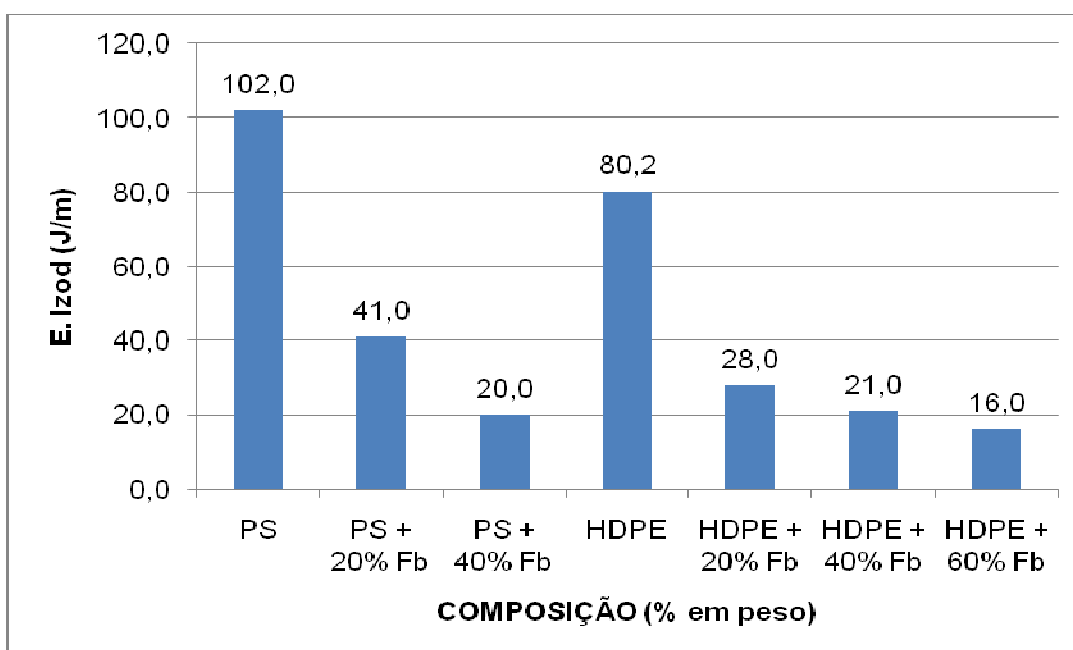


Figura 24: Valores da energia de impacto do ensaio Izod dos compósitos de WPC, provetes entalhados (dados da MatWeb).

Legenda: PS-poliestireno, Fb-fibra de madeira, HDPE-polietileno de alta densidade.

As figuras anteriores dizem respeito aos valores de módulo de elasticidade E (módulo de Young) e aos valores de energia de impacto do ensaio Izod, para compósitos de WPC, recolhidos na MatWeb. Da observação dos gráficos conclui-se que:

- a) O módulo de Young dos compósitos WPC é superior ao do material da matriz, seja ela polipropileno, poliestireno ou polietileno de alta densidade;
- b) O módulo de Young dos compósitos WPC aumenta com o teor de fibras de madeira até 60%, para qualquer uma das matrizes: polipropileno, poliestireno ou polietileno de alta densidade;
- c) A energia de impacto do ensaio Izod apresentada pelos compósitos é sempre bastante inferior à do material da matriz, seja ela polipropileno, poliestireno ou polietileno de alta densidade;
- d) A energia de impacto do ensaio Izod diminui com o teor de fibras de madeiras, para qualquer uma das matrizes: polipropileno, poliestireno ou polietileno de alta densidade.

Estas observações estão de acordo com as referidas na literatura por Stark<sup>112</sup> e por Hillig<sup>113</sup>, no que se refere à influência do teor de madeira no módulo de elasticidade do compósito.

No que diz respeito à influência do teor de madeira na energia de impacto do ensaio Izod, os resultados encontrados estão em acordo com os referidos por Hillig<sup>114,115</sup> e por Cui<sup>116</sup>. Por outro lado, esses resultados divergem do

---

<sup>112</sup> Ibid.

<sup>113</sup> Hillig, É., *Viabilidade Técnica de Produção de Compósitos de Polietileno (HPDE) Reforçados com Resíduos de Madeira e Derivados das Indústrias Moveleiras*. 2006, Universidade Federal do Paraná: Curitiba. p. 193.

<sup>114</sup> Ibid.



comportamento descrito por Stark<sup>117</sup>, que observou aumentos da energia de impacto, no ensaio com amostras entalhadas, com o aumento do teor de partículas de madeira, embora tenha registado decréscimo da energia de impacto com provetes sem entalho, como documentam os resultados coligidos na Tabela 1.

A observação dos dados da Tabela 1 e da tendência de variação do módulo de Young com o aumento da fracção de fibras de madeira nas figuras 20 e 21, fornece evidências de que o modelo linear é uma descrição grosseira do comportamento elástico do WPC. Uma extrapolação linear, com o melhor ajuste a uma linha recta, produz valores de E abaixo dos valores conhecidos para a maioria dos materiais de madeira natural. A dependência do módulo de Young sobre a fracção de fibras de madeira é melhor descrita como uma função exponencial, Figura 24. A extrapolação das linhas de tendência exponencial para a fracção de volume de fibras de madeira origina valores de E que coincidem com os valores tabelados para a maior parte das madeiras naturais de média e alta densidade (tabelas do CES EduPack). Essa tendência exponencial de E em compósitos de partículas foi verificada por Braem<sup>118</sup>. Tal tendência está de acordo com as previsões de um modelo, recentemente proposto<sup>119</sup>, para compósitos de partículas com um bom grau de adesão na interface reforço-matriz, e em que o rácio do módulo das partículas ( $p$ ) sobre o módulo da matriz ( $m$ ) é moderadamente elevado,  $E_p / E_m \leq 32$ . As previsões deste modelo são uma evolução das modificações de Lewis e Nielsen<sup>120</sup> para fracções volúmicas

---

<sup>115</sup> Hillig, É., et al., *Modelagem de Misturas na Fabricação de Compósitos Polímero-Fibra, Utilizando Polietileno e Serragem de Pinus sp.* Ciência Florestal, 2006. **16**(3): p. 343-351.

<sup>116</sup> Cui, Y., et al., *Fabrication and interfacial modification of wood/recycled plastic composite materials* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008. **39**(4): p. 655-661.

<sup>117</sup> Ibid.

<sup>118</sup> Braem, M., V. E. van Doren, P. Lambrechts, G. Vanherle, *Determination of Young's Modulus of Dental Composites: A Phenomenological Model.* J. Mater. Sci., 1987. **22**, p. 2037-2042 (1987).

<sup>119</sup> Pal, R., *Influence of Interfacial Phenomena on the Mechanical Properties of Particulate Composite Membranes*, Polymer Composites, (2008), DOI 10.1002/pc

<sup>120</sup> Lewis, T.B. and L.E. Nielsen, *Dynamic Mechanical Properties of Particulate-filled Composites*, Journal of Applied Polymer Science , **14** (6) 1449. (1970)

---

elevadas de inclusões na equação de Kerner<sup>121</sup> para as constantes elásticas em compósitos com reforços esféricos não diluídos.

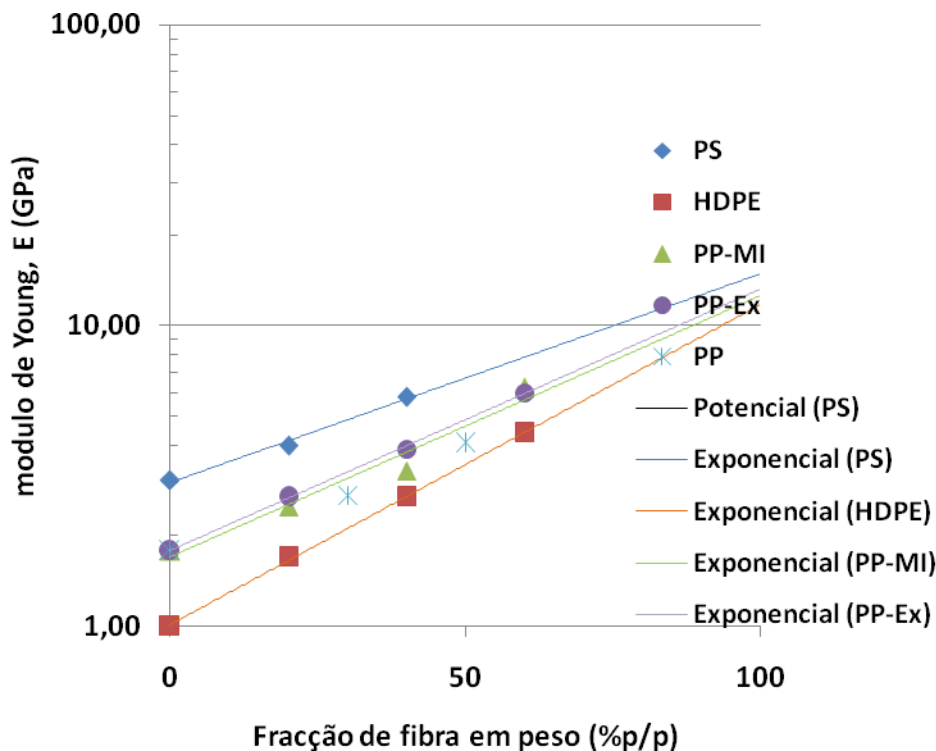


Figura 25: Dependência exponencial do módulo de Young, E, com a fracção em peso de fibras nos WPC, (dados da MatWeb). Legenda: PP-polipropileno, PS-poliestireno, HDPE-polietileno de alta densidade, MI-moldagem por injeção, EX-extrusão.

A dependência dos valores de energia de impacto,  $E_{Izod}$  da fracção de fibras dos WPC, Tabela 1, mostra uma diminuição natural oposta ao aumento do módulo de Young. O produto de  $E_{Izod}$ , que é uma medida da energia de fractura, pelo valor do módulo de Young do compósito mostra uma função que varia pouco em função do conteúdo de fibras do compósito, para teores destas entre os 20 e os 60% em peso, Figura 25, sendo que este produto está relacionado com a tenacidade à fractura do material. Como resultado, ambos os valores de resistência à tracção e de resistência à flexão dos WPC variam muito pouco com o conteúdo de fibras, Figura 26.

<sup>121</sup> Kerner, E.H., *The Elastic and Thermo-Elastic Properties of Composite Media*, Proceedings of the Physical Society of London Section B, 69 (8) 808-813 (1956)

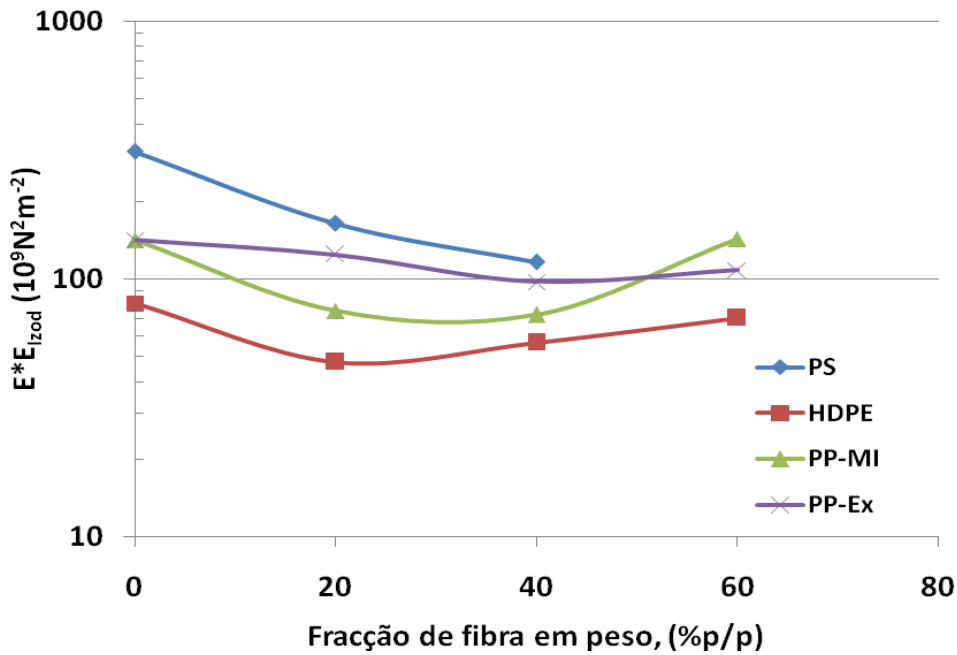


Figura 26: Dependência do produto do módulo de Young pela energia de impacto Izod (provetes entalhados),  $E \cdot E_{Izod}$ , com a fração em peso de fibras nos WPC, (dados da MatWeb). Legenda: PP-polipropileno, PS-poliestireno, HDPE-poliétileno de alta densidade, MI-moldagem por injeção, EX-extrusão.

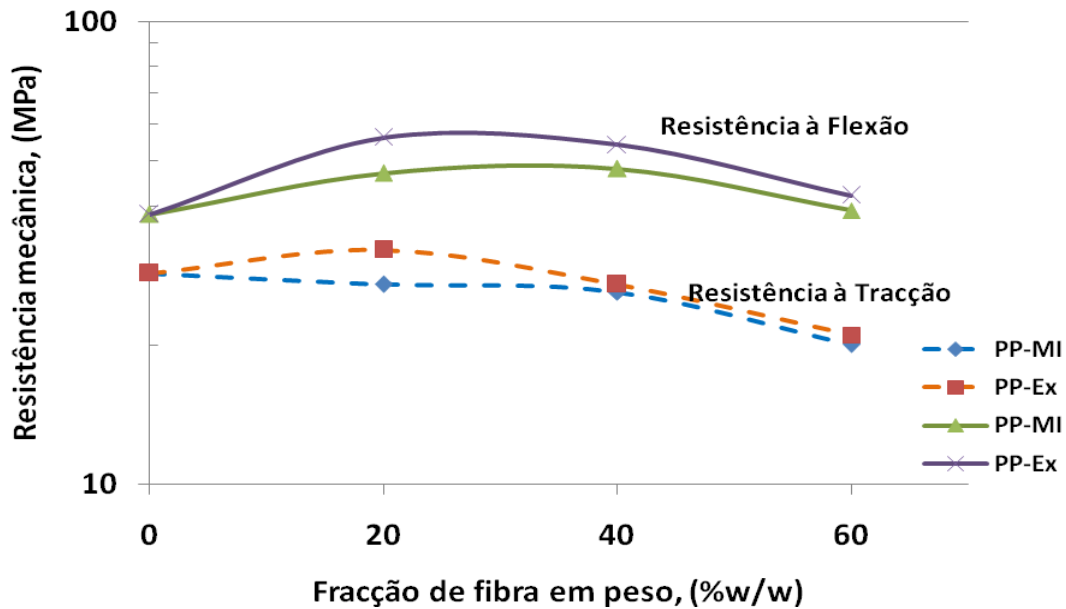


Figura 27: Dependência da resistência à tracção e da resistência à flexão com a fração em peso de fibras nos WPC, (dados da MatWeb). Legenda: PP-polipropileno, PS-poliestireno, HDPE-poliétileno de alta densidade, MI-moldagem por injeção, EX-extrusão.

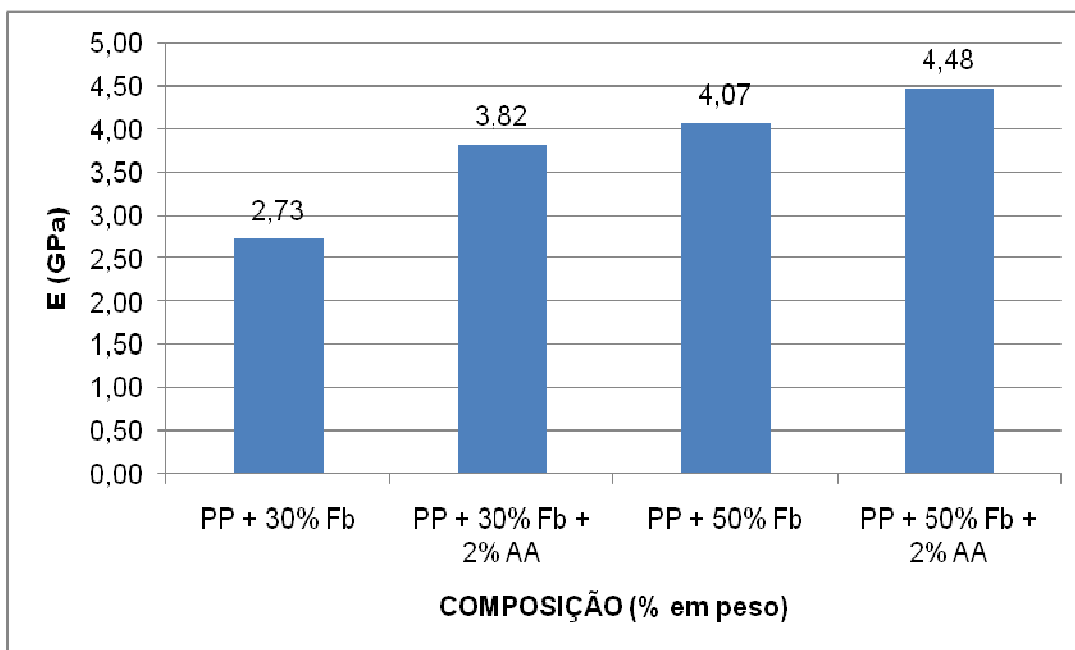


Figura 28: Valores do módulo de elasticidade E para compósitos Natraplast<sup>®</sup> da WTL-INTERNATIONAL.

Legenda: PP-polipropileno, Fb-fibra de madeira, AA-agente de acoplamento.

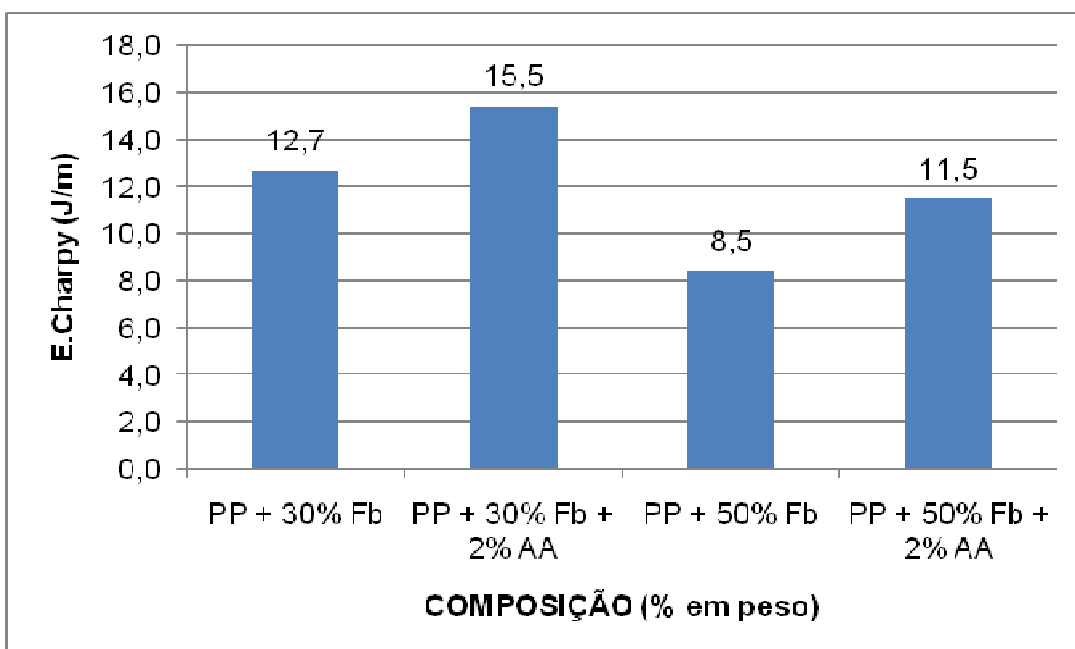


Figura 29: Valores da energia de impacto do ensaio Charpy para compósitos Natraplast<sup>®</sup> da WTL-INTERNATIONAL, para provetes entalhados.

Legenda: PP-polipropileno, Fb-fibra de madeira, AA-agente de acoplamento.

As figuras 27 e 28 dizem respeito aos valores de módulo de elasticidade de de energia de impacto do ensaio Charpy, para compósitos de WPC produzidos pela WTL-INTERNATIONAL, sob o nome comercial Natraplast<sup>®</sup>, e cujas fichas existem no site da empresa. Da observação dos gráficos conclui-se que:

- a) O módulo de elasticidade dos compósitos aumenta com o teor de fibras de madeira, nas composições com, e sem, adição do agente de acoplamento;
- b) A energia de impacto do ensaio Charpy diminui com o teor de fibras de madeira, nas composições com, e sem, adição do agente de acoplamento;
- c) Tanto o módulo de elasticidade, como a energia de impacto do ensaio Charpy, aumentam com a adição do agente de acoplamento.

As duas primeiras observações corroboram as anteriores, com os dados recolhidos na MatWeb.

A influência da agente de acoplamento no módulo de elasticidade e na energia de impacto, está de acordo com o relatado por Slaughter<sup>122</sup>, por Cui e outros<sup>123</sup>, e por Bledzki e Faruk<sup>124</sup>.

---

<sup>122</sup> Slaughter, A.E., *Design and Fatigue of a Structural Wood-Plastic Composite*, in Department of Civil and Environmental Engineering. 2004, Washington State University.

<sup>123</sup> Cui, Y., *et al.*, *Fabrication and interfacial modification of wood/recycled plastic composite materials* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008. **39**(4): p. 655-661.

<sup>124</sup> Bledzki, A.K. and O. Faruk, *Wood Fibre Reinforced Polypropylene Composites: Effect of Fibre Geometry and Coupling Agent on Physico-Mechanical Properties*. Applied Composite Materials, 2003. **10**: p. 365-379.

---

### 4.3. Posicionamento dos compósitos plástico-madeira nas cartas de selecção de materiais de Michael Ashby

Da Tabela 1 foram definidos os seguintes intervalos de valores da densidade, módulo de elasticidade, resistência à tensão e resistência à flexão para o conjunto dos compósitos WPC.

Tabela 2: Valores máximos e mínimos de algumas propriedades dos WPC retirados da Tabela 1.

PROPRIEDADE	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	940	1158
Módulo de Elasticidade (GPa)	1,7	6,2
Resistência à Tensão (MPa)	16,0	52,0
Resistência à Flexão (MPa)	30,0	72,4

Estes intervalos foram introduzidos no selector de materiais do CES EduPack por forma a delimitar a área onde se encontram os WPC e, de uma forma geral, outros materiais com características sobreponíveis com estes compósitos

Do conjunto de 3000 materiais da base de dados do CES EduPack, nível 3 – avançado, foram seleccionados, pelo software, 57 materiais cumprindo os critérios acima definidos, 51 dos quais polímeros.

A partir dos conjuntos dos 51 polímeros seleccionados foram construídos as seguintes cartas: Densidade x Módulo de Young, Densidade x Resistência à Tensão, Resistência à Tensão x Módulo de Young; representadas nas figuras 29, 30 e 31.

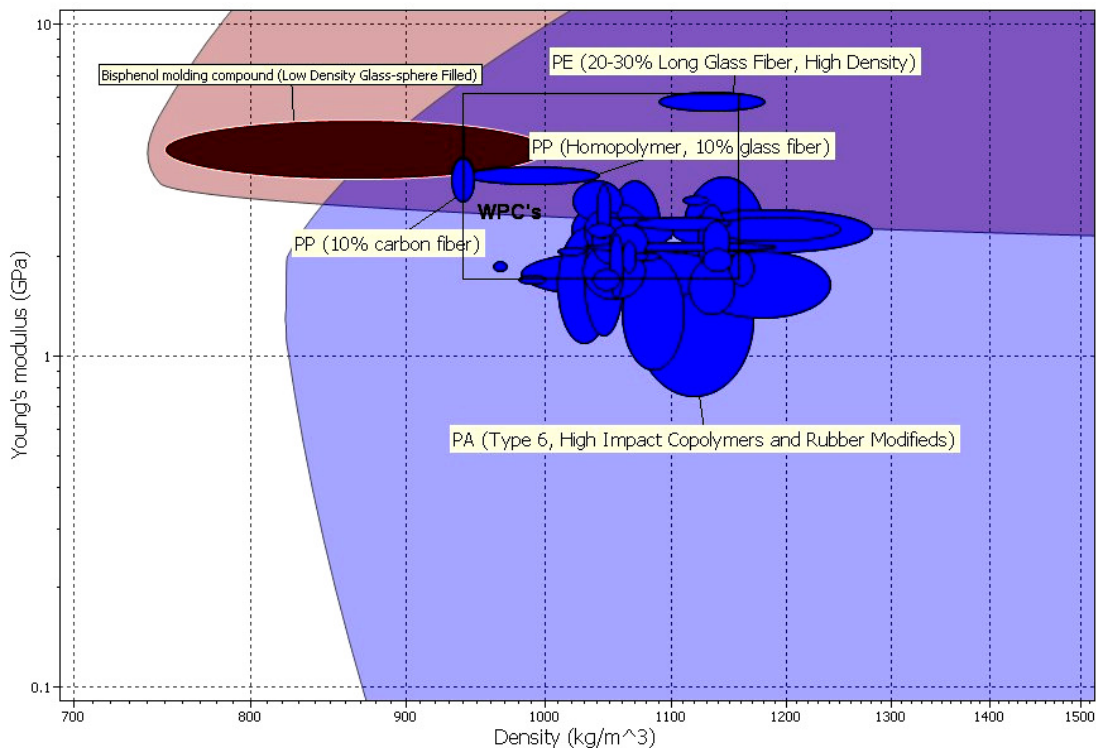


Figura 30: Carta de selecção de materiais densidade x módulo de Young, a partir dos limites propostos definidos na Tabela 2.

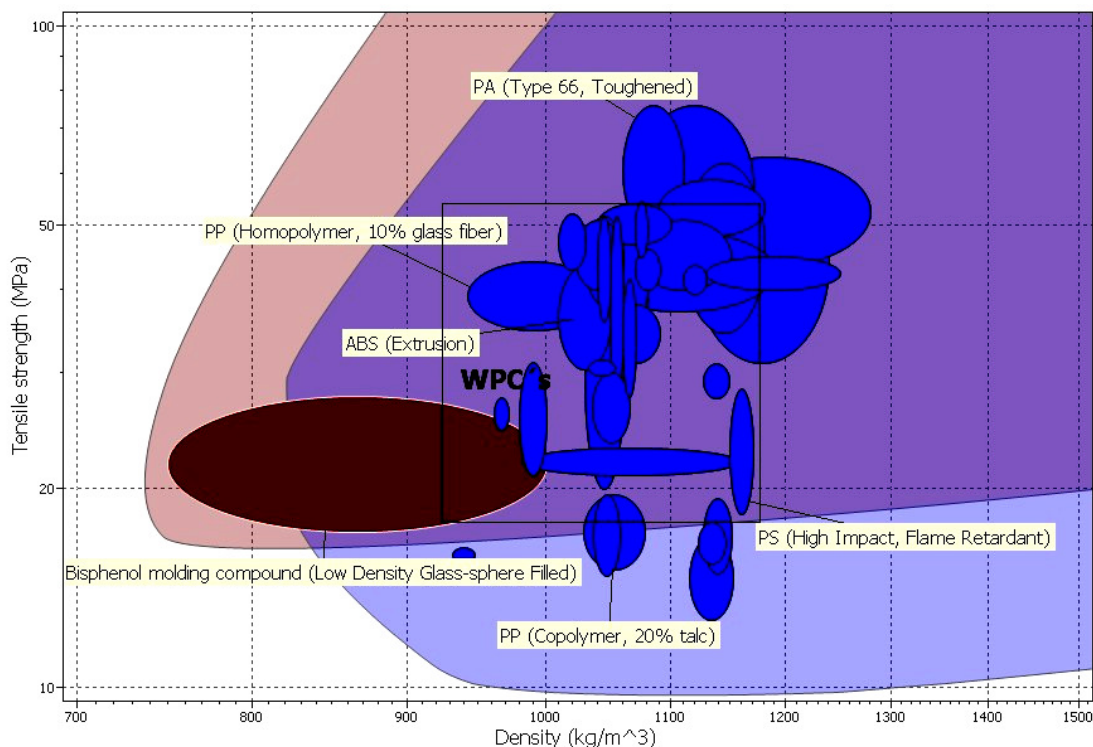


Figura 31: Carta de selecção de materiais densidade x resistência à tensão, com a selecção dos materiais feita a partir dos limites definidos na Tabela 2.

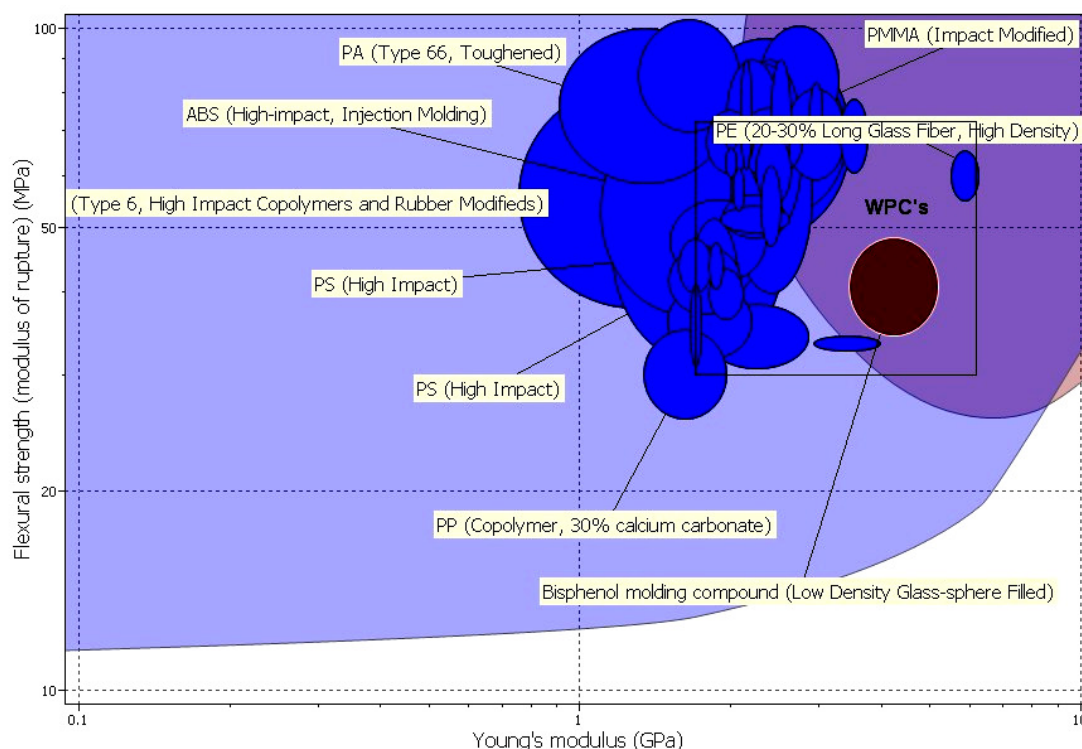


Figura 32: Carta de selecção de materiais resistência à tensão x módulo de Young, com a selecção dos materiais feita a partir dos limites definidos na Tabela 2.

Da análise dos gráficos conclui-se que os WPC estão localizados na zona de intersecção das famílias dos materiais naturais, como madeiras e seus derivados, e polímeros.

Hillig e outros<sup>125</sup> verificaram que propriedades dos WPC como a resistência à tracção, a resistência à flexão, a densidade, e a dureza, seguem o chamado modelo linear, ou regra das misturas, ou seja, são influenciadas apenas pelas características individuais de cada componente na mistura:

$$P_C = P_A \cdot V_A + P_B \cdot V_B \quad (1)$$

Em que  $P_C$  é a propriedade do compósito;  $P_A$  e  $P_B$  são as propriedades dos componentes A e B, e  $V_A$  e  $V_B$  são as fracções volúmicas dos componentes A e B respectivamente.



Dos 57 materiais com valores de propriedades dados na Tabela 2 (página 68) e que se sobrepõe aos valores das propriedades os WPC, verificou-se que a quase totalidade são polímeros e compósitos de matriz polimérica.

A partir do intervalo de preços indicado pela WTL International para o produto de WPC, Natraplast®: 900£/ton para composições com 70%, em peso, de fibras de madeira e sem aditivos até 1600£/ton para composições com 55%, em peso, de fibras de madeira e com aditivos, com a taxa de câmbio de 1£ igual a 1,07€, obteve-se o intervalo de preços de 0,96€/kg a 1,71€/kg. Acrescentando o intervalo de preços aos valores da Tabela 2 no selector de materiais do CES EduPack, os 57 materiais encontrados antes, passaram a apenas 5 materiais, como podemos observar na figura 32. Os 5 materiais são:

- Fiberboard extra hard, com as fibras perpendiculares à placa;
- *Hardboard (standard)*, com as fibras perpendiculares à placa;
- *Hardboard (tempered)*, com as fibras perpendiculares à placa;
- Polipropileno (copolímero) reforçado com 30% (em peso) de carbonato de cálcio;
- Polipropileno (homopolímero) reforçado com 30% (em peso) de carbonato de cálcio.

Se tivermos em conta a possibilidade dos WPC poderem ser produzidos em formas complexas, seja por extrusão, seja por moldagem por injeção, temos os 5 materiais resultantes da comparação das propriedades referidas, e da comparação de preço, reduzidos apenas a dois, ambos compósitos de matriz polimérica reforçados com carbonato de cálcio.

De forma diferente da posição relativa vantajosa dos WPC discutida acima, a questão do índice preço/performance surge claramente e de imediato no projecto

---

<sup>125</sup> Hillig, É., et al., *Modelagem de Misturas na Fabricação de Compósitos Polímero-Fibra, Utilizando Polietileno e Serragem de Pinus sp.* Ciência Florestal, 2006. **16**(3): p. 343-351.

---

de novos produtos desta fileira de compósitos (WPC) quando se propõe a substituição dos polímeros da matriz por polímeros de fontes renováveis, de síntese biológica, os quais podem reduzir a presente dependência de combustíveis fósseis, e diminuir as emissões de CO<sub>2</sub>, beneficiando o meio ambiente devido à sua natureza biodegradável. De facto, o preço, para além de alguma inconsistência de propriedades, é uma das questões que podem afastar, para já, a utilização de matrizes de polímeros biodegradáveis como os ácidos poliláctidos (PLA) ou os polihidroxicanoatos (PHA) na elaboração dos compósitos reforçados com partículas/fibras de madeira<sup>126</sup>.

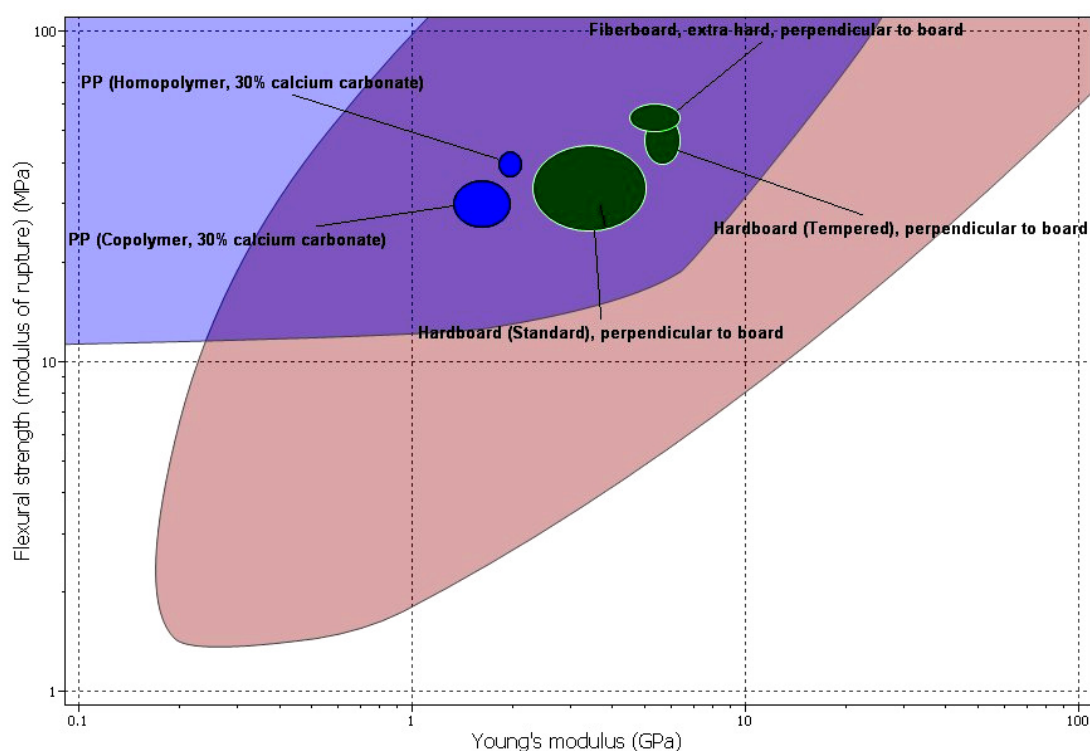


Figura 33: Carta de selecção de materiais resistência à tensão x módulo de Young, com a selecção dos materiais feita a partir dos limites definidos na Tabela 2, entrando em consideração com os limites propostos para os preços dos peletizados de WPC.

De reter o facto de não ter sido encontrada, em nenhuma das bases de dados, qualquer informação sobre os compósitos de WPC em que a matriz é o cloreto de

<sup>126</sup> Pilla, S., et al., *Poly lactide-Recycled Wood Fiber Composites*, Journal of Applied Polymer Science, 2009, **111**, p. 37–47.

polivinilo (PVC), apesar de este polímero ser utilizado como matriz de WPC em aplicações mais estruturais, como na construção civil<sup>127</sup>.

Os dados recolhidos neste estudo, tendo por base todo o conjunto de fontes consultadas, indicam que já existe informação suficiente, e fidedigna, para iniciar a construção de uma ficha de perfil desta sub-classe de materiais compósitos, tal como as apresentadas para outras classes de materiais no CES EduPack bem como no trabalho de Ashby e Johnson<sup>128</sup>. De facto, a percepção de muitos dos índices sensoriais destes compósitos pode ser extraída por observação das aplicações existentes actualmente, e descritas no Capítulo 1.

A resistência dos WPC às condições climatéricas, e as propriedades mecânicas destes materiais, até agora as mais estudadas, podem ser obtidas, com coerência, nas bases de dados existentes. No que concerne aos métodos de conformação e processamento existentes, estes já estão bastante desenvolvidos, bem como já estão investigadas as relações destes com as propriedades dos WPC, nomeadamente no que se refere a dois dos métodos mais utilizados no fabrico destes compósitos, a extrusão e a moldagem por injeção. Porém, a informação acerca de outros conjuntos de propriedades, como as relacionadas com os comportamentos eléctricos, ópticos e térmicos dos WPC, é insuficiente.

---

<sup>127</sup> Jiang, H. and D.P. Kamdem, *Development of Poly(vinyl chloride)/Wood Composites. A Literature Review*. Journal of Vinyl & Additive Technology, 2004. **10**(2): p. 59-69.

<sup>128</sup> Ashby, M. and K. Johnson, *Materials and Design, The Art and Science of Material Selection in Product Design*. 2002, Oxford: Butterworth & Heinemann.

---

## 5. Conclusões e Trabalho Futuro

Os compósitos de matriz termoplástica reforçados com madeira encontram aplicações crescentes e em novos domínios. A necessidade do designer de projecto em aceder à informação sobre o material, que possa levá-lo a ser seleccionado para uma determinada aplicação, depende da qualidade da informação existente sobre as suas propriedades, sejam elas de carácter técnico ou sensorial. Quando se analisa a bibliografia existente nas várias fontes, da consulta as bases de dados disponíveis sobre propriedades de materiais, e da consulta às empresas produtoras, e se questiona a qualidade da informação existente sobre as propriedades dos WPC, conclui-se que a informação existente está bastante dispersa, apesar de haver tentativas de compilação, como é o caso do website [www.wpcinfo.org](http://www.wpcinfo.org) da Universidade do Estado de Washington (USA).

No que diz respeito às bases de dados sobre propriedades de materiais, bastante utilizadas pelos designers na sua fase de projecto, concluiu-se que existe pouca informação sobre os WPC. Da análise da informação sobre as propriedades físicas dos WPC, de natureza essencialmente técnica, feita por comparação com os resultados encontrados na literatura, verifica-se que a informação técnica disponível nas bases de dados pode ser tomada como representativa das características desses compósitos. Existe nestas bases de dados uma lacuna, pois não foi encontrada nenhuma informação sobre os compósitos em que a matriz é o cloreto de polivinilo (PVC), apesar da sua utilização, como se verificou da consulta bibliográfica, em aplicações de carácter mais estrutural, principalmente ligadas à construção civil.

Da análise dos *websites* das empresas produtoras de peletizados pré-compostos de WPC, concluiu-se que existe pouca, em alguns casos, nenhuma, informação sobre as suas características técnicas e/ou sensoriais destes materiais. Quando inquiridas a respeito dos preços dos seus produtos, apenas uma das empresas consultadas respondeu. Os princípios do design de comunicação recomendam um maior empenho dos fabricantes na divulgação das características dos seu

---

produtos, de maneira a facilitar a escolha dos mesmos em futuros projectos industriais, seja nos seus *websites*, seja nas bases de dados disponíveis para consulta livre.

Da observação do posicionamento dos WPC nas cartas de selecção de materiais, elaborados com o recurso ao software do CES EduPack, verifica-se que estes materiais encontram-se na zona de intersecção dos grupos dos polímeros com os materiais de origem natural, como as madeiras, com as quais compete e de onde derivam naturalmente.

Embora as propriedades destes compósitos tais como a densidade, a dureza, a rigidez elástica e a resistência mecânica, possam ser expressas em primeira aproximação pelo modelo linear ou regra das misturas, em que as propriedades dos compósitos são influenciadas apenas pelas características individuais de cada componente da mistura, são necessárias descrições mais precisas das propriedades dos WPC nas fases avançadas do design de produto.

Observou-se que a dependência do módulo de Young em relação ao teor de partículas de madeira é melhor descrita segundo uma lei exponencial, e que tal é suportado pelas equações de modelos de compósitos de partículas com boa adesão na interface matriz-partícula. As estimativas de tenacidade à fractura, com base nos efeitos de sentido oposto da fracção de partículas de madeira sobre o módulo de Young e a energia de fractura dos WPC, podem explicar os valores pouco variáveis, quase constantes da resistência mecânica dos compósitos, que apresentam um máximo local em torno dos 40% de fibras de madeira, com uma tendência para descer com o teor de fibras de madeira superiores.

Os resultados deste estudo sugerem, como trabalhos futuros, (a) a promoção, em interface com as instituições que gerem as bases de dados, da integração desta sub-classe de materiais compósitos, (b) a necessidade de uma melhor especificação das características funcionais destes compósitos, com novos

---

estudos centrados nas lacunas detectadas a nível do comportamento eléctrico, das propriedades ópticas e térmicas.

No contexto regional, e desde que oportuno para este estudo, sobressai ainda a utilidade de realização de trabalhos integrados de engenharia, design e economia, visando o desenvolvimento de estruturas com estes compósitos integradas na orla costeira.

---



## Bibliografia:

Nota de editor, *Interpack - A Promessa Cumprida*, in *Revipack - Revista Técnica de Embalagem*. Abril-Junho 2008: Odivelas. p. 9-15.

Nota de editor, *WPCs extend service life for Venetian structures in Plastics, Additives and Compounding*. May-June 2008, Elsevier. p. 17.

Ashby, M. and K. Johnson, *Materials and Design, The Art and Science of Material Selection in Product Design*. 2002, Oxford: Butterworth & Heinemann.

Ashby, M., H. Shercliff, and D. Cebon, *Materials - engineering, science, processing and design*, ed. Butterworth-Heinemann. 2007, Oxford: Elsevier. 514.

Ashby, M.F., *Materials Selection in Mechanical Design*, Pergamon Press (1992)

Ashori, A., *Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries!* *Bioresource Technology* 2008. **99**(11): p. 4661-4667

Bledzki, A.K. and O. Faruk, *Wood Fibre Reinforced Polypropylene Composites: Effect of Fibre Geometry and Coupling Agent on Physico-Mechanical Properties*. *Applied Composite Materials*, 2003. **10**: p. 365-379.

Bledzki, A.K. and O. Faruk, *Wood Fiber Reinforced Polypropylene Composites: Compression and Injection Molding Process*. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2004. **43**(3): p. 871-888.

---



Braem, M., V. E. van Doren, P. Lambrechts, G. Vanherle, *Determination of Young's Modulus of Dental Composites: A Phenomenological Model*. J. Mater. Sci., 1987. **22**, p. 2037-2042.

Carus, M. and C. Gahle, *Injection moulding with natural fibres Reinforced Plastics*, 2008. **52**(4): p. 18-22, 24-25.

Clemons, C., *Wood-Plastic Composites in the United States The Interfacing of Two Industries*. Forest Products Journal, 2002. **52**(6): p. 10-18.

Correa, C.A., et al., *Compósitos Termoplásticos com Madeira*. Polímeros: Ciência e Tecnologia, 2003. **13**(3): p. 154-165.

Cui, Y., et al., *Fabrication and interfacial modification of wood/recycled plastic composite materials* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008. **39**(4): p. 655-661.

Faruk, O., A.K. Bledzki, and L.M. Matuana, *Microcellular Foamed Wood-Plastic Composites by Different Processes: a Review*. Macromolecular Materials and Engineering, 2007. **292**(2): p. 113-127.

Gardner, D.J. *Wood-Plastic Composite Extrusion Overview*. [cited; Available from: <http://www.umaine.edu/adhesion/gardner/5502002/wpc%20ext%20over%2003-11-02.pdf>.

Guo, G., et al., *Influence of wood fiber size on extrusion foaming of wood fiber/HDPE composites*. Journal of Applied Polymer Science 2008. **107**(6): p. 3505-3511.

Guo, G., et al., *Flame Retarding Effects of Nanoclay on Wood-Fiber Composites*. Polymer Engineering and Science, 2007. **47**(3): p. 330-336.

Hillig, É., *Viabilidade Técnica de Produção de Compósitos de Polietileno (HPDE) Reforçados com Resíduos de Madeira e Derivados das Indústrias Moveleiras*. 2006, Universidade Federal do Paraná: Curitiba. p. 193.

Hillig, É., et al., *Modelagem de Misturas na Fabricação de Compósitos Polímero-Fibra, Utilizando Polietileno e Serragem de Pinus sp*. Ciência Florestal, 2006. **16**(3): p. 343-351.

Jacob, A., *WPC industry focuses on performance and cost*. Reinforced Plastics, 2006(May): p. 32-33.

Jiang, H. and D.P. Kamdem, *Development of Poly(vinyl chloride)/Wood Composites. A Literature Review*. Journal of Vinyl & Additive Technology, 2004. **10**(2): p. 59-69.

Karana, E., P. Hekkerta, and P. Kandachara, *Material considerations in product design: A survey on crucial material aspects used by product designers* Materials & Design, 2008. **29**(6): p. 1081-1089.

Kerner, E.H., *The Elastic and Thermo-Elastic Properties of Composite Media*, Proceedings of the Physical Society of London Section B, 1956, 69 (8) 808-813 .

Kesteren, I.E.H.v., *Product designers' information needs in materials selection*. Materials and Design, 2008. **29**: p. 133-145.

Lai, S.-M., *et al.*, *Comparative study of maleated polyolefins as compatibilizers for polyethylene/wood flour composites*. Journal of Applied Polymer Science, 2003. **87**(3): p. 487-496.

Lewis, T.B. and L.E. Nielsen, *Dynamic Mechanical Properties of Particulate-filled Composites*, Journal of Applied Polymer Science , 1970, 14 (6) 1449.

Ljungberg, L.Y., *Materials selection and design for development of sustainable products*. Materials and Design, 2007. **28**: p. 466-479.

Markarian, J., *Outdoor living space drives growth in wood-plastic composites*. Plastics Additives & Compounding, 2008: p. 20-25.

Matuana, L.M., C.B. Park, and J.J. Balatinecz, *Processing and Cell Morphology Relationships for Microcellular Foamed PVC/Wood - Fiber Composites*. Polymer Engineering and Science, 1997. **37**(7): p. 1137-1147.

---

McGraw, D.F. and P.M. Smith, *Opportunities for woodfiber-plastic composites in the U.S. recreational bridge market*. Forest Products Journal, 2007. **57**(3): p. 76-83.

Medina, H.V.d., *Eco-design for Materials Selection in Automobile Industry*, in Proceedings of 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering (LCE2006). 2006: Leuven - Belgium p. 299-304.

Morrell, J.J., *et al.*, *Durability of Wood-Plastic Composites*. Wood Design Focus, 2006. **16**(3): p. 7-10.

Najafi, S.K., E. Hamidinia, and M. Tajvidi, *Mechanical Properties of Composites from Sawdust and Recycled Plastics*. Journal of Applied Polymer Science, 2006. **100**: p. 3641-3645.

Nuno, J.P., C.A. Bernardo, and A.T. Marques, *Compósitos de Matriz Polimérica*, in *Materiais 2000*, M.A. Fortes and P.J. Ferreira, Editors. 2003, IST Press: Lisboa. p. 105-189.

Pal, R., *Influence of Interfacial Phenomena on the Mechanical Properties of Particulate Composite Membranes*, Polymer Composites, 2008, DOI 10.1002/pc .

Pilla, S., *et al.*, *Poly lactide-Recycled Wood Fiber Composites*, Journal of Applied Polymer Science, 2009, **111**, p. 37-47.

Ramalhete, P.M., *Design e selecção de materiais: novos contributos digitais para uma escolha fundamentada*, in Departamento de Comunicação e Arte. 2006, Universidade de Aveiro: Aveiro.

Saheb, D.N. and J.P. Jog, *Natural Fiber Polymer Composites: A Review*. Advances in Polymer Technology, 1999. **18**(4): p. 351-363.

Slaughter, A.E., *Design and Fatigue of a Structural Wood-Plastic Composite*, in Department of Civil and Environmental Engineering. 2004, Washington State University.

Smith, P.M. and M.P. Wolcott, *Opportunities for Wood/Natural Fiber-Plastic Composites in Residential and industrial Applications*. Forest Products Journal, 2006. **56**(3): p. 4-11.

Stark, N.M. and M.J. Berger, *Effect of Species and Particle Size on Properties of Wood-Flour-Filled Polypropylene Composites*, in Proceedings, Functional Fillers. 1997: San Diego, CA.

Wolcott, M.P. and K. Englund, *A Technology Review of Wood-Plastic Composites*, in 33rd International particleboard/composite materials symposium, P. Wolcott Michael, J. Tichy Robert, et al., Editor. 1999: Washington State University.

Woolcot, M.P., P.M. Smith, and J. Hermanson, *Opportunities and challenges for WPC's emerging product areas*, in 8th International Conference in Woodfiber-Plastic Composites. 2005: Madison, WI.

WRAP, *WOOD PLASTIC COMPOSITES STUDY - TECHNOLOGIES AND UK MARKET OPPORTUNITIES*, T.W.a.R.A. Programme, Editor. 2003: Oxon.

Yadama, V., *Residential Opportunities for Wood-Plastic Composites*, in Smallwood 2006. 2006: Richmond, Virginia.

---