



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

COMPORTAMENTO E DESEMPENHO DE PRODUTOS PLÁSTICOS, MATERIAIS POLIMÉRICOS COM RECICLADOS E BIOCOMPÓSITOS COM APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO (ECOPOL)

**TAREFA T2.3 – Produtos poliméricos e compósitos de matriz
plástica contendo reciclados com aplicação na construção**

ECOPOL

Lisboa • junho 2021

I&D EDIFÍCIOS

RELATÓRIO 207/2021 – DED/NAICI

Título**COMPORTAMENTO E DESEMPENHO DE PRODUTOS PLÁSTICOS, MATERIAIS POLIMÉRICOS
COM RECICLADOS E BIOCOMPÓSITOS COM APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO (ECOPOL)**

TAREFA T2.3 – Produtos poliméricos e compósitos de matriz plástica contendo reciclados
com aplicação na construção

Autoria

DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS

Luís Eduardo Pimentel Real

Investigador Auxiliar, Núcleo de Acústica, Iluminação, Componentes e Instalações

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 207/2021

Proc. 0809/1102/19706

COMPORTAMENTO E DESEMPENHO DE PRODUTOS PLÁSTICOS, MATERIAIS POLIMÉRICOS COM RECICLADOS E BIO-COMPÓSITOS COM APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO (ECO POL)

Tarefa T2.3 - Produtos poliméricos e compósitos de matriz plástica contendo reciclados com aplicação na construção

Resumo

Neste relatório, conforme previsto nos objetivos da tarefa T2.3 do projeto ECO POL do P2I do LNEC, faz-se uma abordagem geral à reciclagem de plásticos e compósitos de matriz plástica, usados na construção, tendo como objetivo a sua reutilização.

Descrevem-se as várias tecnologias de reciclagem aplicáveis aos materiais plásticos mais usados na construção e as suas várias etapas, pormenorizando-as para os principais polímeros usados na construção, e indicando-se as dificuldades inerentes aos processos. Neste contexto, apresentam-se vários casos de estudo e exemplos de inovação tecnológica recente.

Aborda-se também o tema do controlo da qualidade, da certificação, e indica-se a normalização adotada na Europa para plásticos reciclados.

Apresentam-se alguns dados de mercado, nomeadamente a capacidade de produção, o mercado de aplicação dos plásticos e dos polímeros de base biológica, as quantidades de plástico reciclado e, para cada tipo de polímero, os dados estatísticos de reciclagem e as barreiras de colocação dos reciclados no mercado, referindo-se também as variáveis que imais influenciam os custos da reciclagem e o preço dos reciclados.

As conclusões extraídas deste relatório são de vários tipos. De forma sucinta permitem demonstrar que a reciclagem é um recurso fundamental para minimizar desperdícios e reduzir a poluição ambiental, constituindo uma abordagem estratégica para a gestão de resíduos de produtos plásticos de construção no fim da sua vida útil.

Referem-se ainda os principais desafios e perspetivas futuras que decorrem dos desenvolvimentos mais recentes nesta área.

Por fim, apresentam-se as recomendações estratégicas mais relevantes para prosseguir e concretizar a resolução do problema da reciclagem deste tipo de produtos e procurar concretizar os objetivos da economia circular, o que passa pelo desenvolvimento do mercado especializado da reciclagem e dos plásticos reciclados e, conseqüentemente, promover as operações de compra e venda dos agentes económicos e das partes interessadas (vendedores, compradores, consumidores, associações, recicladores, fabricantes de maquinaria de produção, etc.) de forma a aumentar também a reciclagem e a reciclabilidade de resíduos plásticos.

Palavras-chave: Plásticos / Compósitos / PVC / PE / PP / PU / Impacto ambiental / Sustentabilidade / Reciclagem / Reutilização / Economia circular

BEHAVIOUR AND PERFORMANCE OF PLASTIC PRODUCTS, POLYMERIC MATERIALS WITH RECYCLED AND BIOCMPÓSITES APPLIED IN CONSTRUCTION (ECOPOL)

Task T2.3 - Study on the use of plastic products containing recycled materials in construction applications

Abstract

In this report, as forecasted in of task T2.3 of the LNEC's P2I ECOPOL project, a general approach to the recyclability of plastics and composites used in construction, with the purpose of their reuse, is made.

The various recycling technologies applicable to the plastic materials most used in construction and their various stages are described, detailing them for the main polymers used in construction, and indicating the difficulties inherent in the processes. In this context, several case studies and examples of recent technological innovation are presented.

It also addresses the issue of quality control, certification, and indicates the standardization adopted in Europe for recycled plastics.

Some market data are presented, namely the production capacity, the market for the application of bio-based plastics and polymers, the quantities of recycled plastic and, for each type of polymer, statistical data on recycling and placement barriers of recycled materials in the market, also referring to the variables that most influence recycling costs and the price of recycled materials.

The conclusions drawn from this report are of several types. In a succinct way, they demonstrate that recycling is a fundamental resource to minimize waste and reduce environmental pollution, constituting a strategic approach to the management of waste from plastic construction products at the end of its useful life.

They also refer to the main challenges and future perspectives that arise from the most recent developments in this area.

Finally, the most relevant strategic recommendations are presented in order to continue and concretize the resolution of the problem of recycling this type of products and seek to achieve the objectives of the circular economy, which involves the development of the specialized market for recycling and recycled plastics and, consequently, promote the purchase and sale operations of economic agents and interested parties (sellers, buyers, consumers, associations, recyclers, manufacturers of production machinery, etc.) in order to also increase the recycling and recyclability of plastic waste.

Keywords: Plastics / Composites / PVC / PE / PP / PU / Environmental impact / Sustainability / Recycling / Reuse / Circular economy

Índice

1	Introdução	1
	1.1 Enquadramento	1
	1.2 Objetivo	1
	1.3 Organização do relatório.....	1
2	Ambiente e sustentabilidade	3
	2.1 Plásticos como fonte de poluição	3
	2.2 Sustentabilidade dos materiais e produtos plásticos.....	4
	2.3 Sustentabilidade dos plásticos usados na construção	5
	2.4 Economia circular. Reciclagem.....	6
	2.5 Contributos da regulamentação Europeia	6
3	Materiais plásticos e aditivos	7
	3.1 Generalidades.....	7
	3.2 Termoplásticos.....	7
	3.3 Termoendurecíveis	8
	3.4 Elastómeros	8
	3.5 Aditivos poliméricos	8
	3.6 Plásticos ecológicos.....	10
	3.6.1 Generalidades.....	10
	3.6.2 Plásticos degradáveis	10
	3.6.3 Bioplásticos	11
	3.6.4 Biocompósitos.....	13
	3.6.5 Plásticos reciclados	13
4	Estatísticas de mercado dos plásticos	14
	4.1 Generalidades.....	14
	4.2 Capacidade de produção e mercado de aplicação dos plásticos	14
	4.3 Capacidade de produção e mercado dos polímeros de base biológica.....	17
5	Uso de plásticos na construção	19
6	Uso de plásticos reforçados com fibras na construção	21
	6.1 Classificação dos compósitos.....	21
	6.2 Características dos compósitos de matriz polimérica	21
	6.3 Aplicação dos compósitos poliméricos na construção	22
	6.3.1 Generalidades.....	22
	6.3.2 Resíduos de PRF.....	23
	6.3.3 Produtos de PRF	23
7	Uso de biocompósitos na construção	26
	7.1 Generalidades.....	26
	7.2 Estatísticas dos biocompósitos no mercado da construção.....	27
8	Uso de plásticos reciclados na construção.....	30
	8.1 Generalidades.....	30
	8.2 Aditivos para plásticos reciclados de construção	31
9	Reciclagem.....	33
	9.1 Generalidades.....	33
	9.2 Classificação dos processos de reciclagem	33
	9.3 Princípios em cascata para reciclagem	34
	9.4 Cadeia de valor para resíduos de plástico	35

9.5	Recolha	35
9.6	Separação e triagem.....	37
9.6.1	Generalidades.....	37
9.6.2	Separação dimensional	38
9.6.3	Separação por densidade.....	38
9.6.4	Separação de metais por ação magnética ou por correntes parasitas	40
9.6.5	Separação ótica	40
9.7	Qualidade dos reciclados.....	44
9.7.1	Generalidades.....	44
9.7.2	Avaliação da qualidade. Normalização.....	45
9.7.3	Destino dos materiais rejeitados.....	48
9.8	Reprocessamento	48
9.9	Fabrico de produtos finais.....	49
9.10	Impacto dos diferentes processos de reciclagem.....	50
9.11	Tecnologias de reciclagem industrial de plásticos.....	51
9.11.1	Reciclagem química.....	51
9.11.2	Reciclagem mecânica.....	52
9.11.3	Desenvolvimentos recentes em reciclagem mecânica.....	57
9.11.4	Otimização de tecnologias de reciclagem e de separação	59
10	Dados económicos e estatísticos de reciclagem	60
10.1	Quantidades de plástico reciclado	60
10.2	Custos da reciclagem	65
10.3	Preços dos plásticos reciclados.....	65
10.4	Competitividade do setor de gestão de resíduos	66
11	Constrangimentos à aplicação de plásticos reciclados	67
11.1	Generalidades.....	67
11.2	Problemas ambientais associados à reciclagem.....	68
11.3	Principais dificuldades na reciclagem de plásticos.....	69
12	Reciclagem dos principais plásticos usados na construção	70
12.1	Reciclagem de PVC.....	70
12.1.1	Generalidades.....	70
12.1.2	Constrangimentos associados à reciclagem de PVC.....	72
12.1.3	Medidas de mitigação	74
12.1.4	Métodos de reciclagem.....	74
12.1.5	Dados estatísticos de reciclagem de PVC.....	75
12.1.6	Selo de sustentabilidade.....	77
12.2	Reciclagem de poliuretano	78
12.2.1	Generalidades.....	78
12.2.2	Constrangimentos associados à reciclagem de PU	78
12.2.3	Medidas de mitigação	78
12.2.4	Métodos de reciclagem.....	78
12.2.5	Dados estatísticos de reciclagem de PU	80
12.3	Reciclagem de polipropileno e polietileno	80
12.3.1	Generalidades.....	80
12.3.2	Métodos de reciclagem.....	81
12.4	Reciclagem de misturas de plásticos	81
12.4.1	Dificuldades	81
12.4.2	Medidas de mitigação	82

12.4.3	Métodos de reciclagem.....	82
12.5	Reciclagem de compósitos.....	82
12.5.1	Generalidades.....	82
12.5.2	Constrangimentos associados à reciclagem de compósitos.....	82
12.5.3	Medidas de mitigação.....	83
12.5.4	Métodos de reciclagem.....	83
12.5.5	Aplicações de compósitos reciclados.....	85
12.6	Casos ilustrativos de sucesso.....	86
12.6.1	Reciclados de PVC.....	86
12.6.2	Reciclados de PU.....	90
12.6.3	Reciclados de Poliolefinas (PP e PE).....	90
12.6.4	Reciclados de PS.....	92
12.6.5	Reciclagem de misturas de plásticos.....	92
12.6.6	Reciclados de compósitos.....	93
12.7	Projetos e estudos relevantes.....	94
13	Conclusões.....	97
14	Desafios.....	99
15	Recomendações.....	101
	Referências bibliográficas.....	105

Índice de figuras

Figura 4.1 – Produção mundial acumulada de plástico até 2019 (PlasticsEuropa).....	15
Figura 4.2 – Produção acumulada de plástico na Europa até 2019 (PlasticsEuropa)	15
Figura 6.1 – Exemplos de aplicações típicas dos materiais compósitos reforçados com fibras: a) pavimentos e mobiliário urbano exterior em aplicações correntes; b) Hotel Sheraton – aeroporto de Malpensa, Milão, IT; c) Camp Mackall, Carolina do Norte, USA; d) York, Maine. USA; e) Severn Crossing approaches, UK; f) Kolding, Dinamarca	24
Figura 8.1 – Resíduos resultantes da fabricação de tubos e acessórios	31
Figura 9.1 – Paletes de tubos de PE e PVC-U classificados (Whittle & Pesudovs, 2007)	36
Figura 9.2 – Registos espectrais obtidos pela tecnologia NIRS, para diferentes polímeros (Lofty, 2015)	42
Figura 9.3 – Imagem do equipamento usado no processo S3P (Profwaka, 2013)	54
Figura 9.4 – Processo de reciclagem PIM: a) material a que dá entrada na primeira fase do processo; b) material triturado proveniente da segunda fase; c) Pó/grânulos da terceira fase.....	56
Figura 9.5 – Compósitos fabricados pelo processo PIM, apresentando revestimentos superficiais de diversas cores	56
Figura 10.1 – Quantidade de embalagens geradas na Europa (Eu28 + NO/CH) por País e <i>per capita</i> (Eurostat)	60
Figura 10.2 – Evolução do tipo de tratamento realizado ao plástico pós-consumo, em percentagem, entre 2006 e 2018, na Europa (Eu28 + NO/CH) (Eurostat).....	61
Figura 10.3 – Evolução do tratamento de resíduos plásticos na Europa (EU ₂₈ + NO/CH), em milhões de toneladas, entre 2006 e 2018, na Europa (Eu28 + NO/CH) (Eurostat).....	61
Figura 10.4 – Evolução do tratamento de resíduos na Europa (EU ₂₈ + NO/CH), em milhões de toneladas, de 2006 a 2018	62
Figura 10.5 – Taxas de reciclagem, recuperação de energia e aterro, de plástico pós-consumo na Europa (EU ₂₈ + NO/CH), em 2018, por País (PlasticsEurope, 2020)	63
Figura 12.1 – Produtos de construção típicos em PVC; a) revestimento vinílico de pavimento; b) tubagem; c) perfis de janela; d) portas; e) tetos falsos.....	70
Figura 12.2 – Ilustração de um local com quantidades significativas de perfis de janela de PVC prontos para reciclagem (PRW, 2018)	76
Figura 12.3 – Quantidade e tipos de PVC reciclado no âmbito dos programas “Vinyl 2010” e “VinylPlus” (PRW, 2019c)	77
Figura 12.4 – Sistema pré-fabricado de recolha de água da chuva, na forma de coberturas isolantes, construídas a partir de tubos de PVC reciclado (Kristen Tapping, 2021)	89
Figura 12.5 – Desenho auto-cad de um conjunto de vivendas geminadas com o telhado constituído pelo sistema pré-fabricado de recolha de água da chuva da Tectum (Kristen Tapping, 2021)	89

Índice de quadros

Quadro 4.1 – Distribuição da Produção de Plástico em 2019 (PlasticsEurope, 2020).....	16
Quadro 4.2 – Procura total de plástico na Europa (EU ₂₈ + NO/CH) para conversão industrial, por setores de atividade, em 2019 (PlasticsEurope, 2020)	16
Quadro 4.3 – Mercado de plástico na Europa (EU ₂₈ + NO/CH), por tipo de resina e aplicação (PlasticsEurope, 2020).....	17
Quadro 9.1 – Documentos normativos mais usadas na Europa para reciclados	46
Quadro 9.2 – Requisitos de qualidade previstos na norma EN ISO 15347	47
Quadro 10.1 – Distribuição de reciclados por setor de atividade, na Europa (EU ₂₈ + NO/CH) , em 2019 (PlasticsEurope, 2020).....	64

Lista de abreviaturas

ABP: parâmetro de depleção abiótica (para LCA)

ABS: poli (estireno de acrilonitrilo e butadieno)

AP: parâmetro de acidificação (para LCA)

CEN: Comité Europeu de Normalização

CENELEC: Comité Europeu de Normalização Eletrotécnica

CH₄; metano

C₂H₂: acetileno

C₂H₄: etileno

CFC: clorofluorocarbono

CIS: Commonwealth of Independent States (Comunidade de Estados Independentes)

CO: monóxido de carbono

CPR: regulamento dos produtos de construção

DEHP: Bis (2-etilhexil) ftalato

DNA: ácido desoxirribonucleico

EC: Comissão Europeia

ELV: equipamentos de baixa voltagem

EP: parâmetro de eutrofização (em LCA)

EPPA: European PVC Window Profile and Related Building Products Association

EPS: poliestireno expandido

FRC ou FRP: compósitos/plásticos reforçados com fibras

GEE: gases com efeito de estufa

GRP: polímero/plástico reforçado com fibras de vidro

GWP: parâmetro de aquecimento global (em LCA)

H₂: hidrogénio molecular

HBP: plásticos hidro-biodegradáveis

HCN: ácido cianídrico

HDPE: polietileno de alta densidade

HIPS: poliestireno de resistência ao impacto melhorada

HTP: parâmetro de toxicidade humana (em LCA)

ISO: International Organization for Standardization (Organização Internacional de Normalização)

LCA: análise do ciclo de vida

LDH: hidróxido duplo em camadas

LDPE: polietileno de baixa densidade

NAFTA: North American Free Trade Agreement (acordo de comércio livre da América do Norte, envolvendo o Canadá, o México e os Estados Unidos, substituído pelo USMCA em 1 de julho de 2020)

NFC: nanofibra de celulose

NH₃: amoníaco

NO: monóxido de azoto

NIRS: espectroscopia de infravermelho próximo

O₂: oxigénio molecular

OBP: plástico oxibiodegradável

OLDP: parâmetro de depleção da camada de ozono (em LCA)

PA: poliamida (ou nylon)

PAC: poliacrilato

PB: polibutadieno ou polibutileno

PBT: tereftalato de polibutileno

PC: policarbonato

PE: polietileno

PET: tereftalato de polietileno

PHA: poli-hidroxiacanoato

PI: poli-isopreno.

PIM: moldagem por impressão de pó

PLA: ácido polilático

POCP: parâmetro de criação fotoquímica de ozono (em LCA)

POM: polióxido de metileno (ou poliacetal)

PP: polipropileno

PS: poliestireno

PU: poliuretano

PUR: poliuretano rígido (na forma de espuma)

PVC: poli(cloreto de vinilo)

RCF: fibra de carbono reciclada

RPC: reciclados pós-consumo

REACH: registro, avaliação, autorização e restrição de produtos químicos

S3P: tecnologia de pulverização por cisalhamento de estado sólido

SBS: poli (estireno-butadieno-estireno)

SPI: Sociedade da Indústria de Plásticos

TDI: diisocianato de tolueno

USMCA: Acordo Estados Unidos-México-Canadá

UV: ultravioleta

VFRC: compósitos reforçados com fibras vegetais

WEEE: resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos

WRAP: programa de ação para reciclagem de embalagem

XPS: poliestireno extrudido

1 | Introdução

1.1 Enquadramento

No âmbito do projeto P21 intitulado “Comportamento e desempenho de produtos plásticos, materiais poliméricos com reciclados e biocompósitos com aplicação na construção (ECO POL)”, inserido no eixo programático PATRIMÓNIO CONSTRUÍDO (Modernizar e inovar com qualidade: Materiais, componentes e tecnologias da construção) e no eixo transversal “Desenvolvimento de competências e transferência de conhecimentos”, foi proposta uma tarefa (T2.3) cujo objetivo consiste numa recolha de informação acerca da utilização de produtos de material plástico contendo reciclados, em aplicações de construção civil.

1.2 Objetivo

O objetivo deste relatório é apresentar o estado da arte relativa ao tema “reciclagem de materiais de construção”, compreendendo uma análise de mercado sintética, apresentando os últimos desenvolvimentos em tecnologias de reciclagem de plásticos, e fazendo algumas recomendações para otimizar o êxito da reciclagem e incentivar a economia circular.

1.3 Organização do relatório

O presente relatório encontra-se organizado da seguinte forma:

- O Capítulo 1 constitui a presente introdução;
- No Capítulo 2 faz-se a descrição sucinta do problema e aborda-se o tema da sustentabilidade dos plásticos;
- No Capítulo 3 descrevem-se os vários tipos de plásticos;
- No Capítulo 4 descrevem-se os tipos de plásticos considerados ecológicos;
- Nos Capítulos 5, 6, 7 e 8 descreve-se a utilização, na construção, de vários tipos de materiais plásticos, incluindo os compósitos, os biocompósitos e os plásticos reciclados;
- No Capítulo 9 descreve-se a cadeia de valor para resíduos plásticos, desde as tecnologias de separação e reciclagem até a introdução dos reciclados no mercado;
- No Capítulo 10 apresentam-se dados estatísticos e económicos;
- No Capítulo 11 referem-se os principais obstáculos e dificuldades associados à colocação de materiais plásticos reciclados no mercado;
- No Capítulo 12 descreve-se a reciclagem dos principais plásticos usados na construção e apresentam-se casos de sucesso relativos à reciclagem de cada tipo de polímero;
- No Capítulo 13 apresentam-se as conclusões;
- No Capítulo 14 referem-se os desafios que se perspetivam para o futuro a curto e médio prazo;

- Por último, no Capítulos 15 apresentam-se, as recomendações para garantir sucesso da reciclagem e incentivar a economia circular.

2 | Ambiente e sustentabilidade

2.1 Plásticos como fonte de poluição

Os resíduos plásticos, apesar de essenciais na vida quotidiana e da sua imprescindível utilização em diversas áreas, constituem uma fonte de poluição após a sua utilização.

A poluição do plástico está a ter um impacto negativo nos oceanos e na saúde da vida selvagem, o que confere a estes materiais o atributo de fonte de poluição.

Porém, a existência de animais feridos ou mortos por produtos de plástico, as ilhas de plástico que flutuam nos oceanos e “inundações# de resíduos de plástico em cidades e vilas, não são verdadeiramente uma responsabilidade que se possa atribuir ao plástico em si.

O plástico é um material único, com muitos benefícios, pois é barato, versátil, leve e resistente, o que o torna um material de excelência para muitas aplicações. Também pode trazer benefícios ambientais, pois desempenham um papel crítico na manutenção da qualidade, segurança e redução do desperdício de alimentos, nos transportes e nos equipamentos de energias alternativas, bem como no isolamento térmico e em inúmeras aplicações na construção (secção 2.2).

Estima-se que 20% de todos os resíduos de plástico nos oceanos provêm de fontes marinhas. Em algumas regiões, as fontes marinhas dominam. Por exemplo, na Grande Mancha de Lixo do Pacífico (GPGP), mais da metade dos plásticos são constituídos por redes, cordas e linhas de pesca (RITCHIE, 2018). O restante é proveniente de resíduos plásticos.

Os Países mais ricos geram mais lixo plástico *per capita*, mas têm sistemas de gestão de resíduos muito eficazes. Os países menos ricos e mais pobres têm um sistema de gestão de resíduos deficiente e constituem as principais fontes de poluição do plástico no oceano global.

Para resolver este problema é necessário pôr em prática uma estratégia de reciclagem e reutilização, assim como desencorajar o desperdício e abandono de plásticos por meio de campanhas de conscientização pública sobre o valor dos produtos plásticos, de forma a reduzir o descarte de produtos indesejados e inutilizáveis. A implementação de uma estratégia adequada de reciclagem (e reutilização) e a melhoria dos sistemas de gestão de resíduos em todo o mundo, permitiria reduzir a poluição do plástico. A implementação de um esquema de informação ambiental e de informação contínua às pessoas, bem como de medidas legislativas que permitam desincentivar o abandono clandestino de lixo e a sua descarga nos oceanos, conduziria a uma redução radical no descarte de produtos indesejados e inutilizáveis.

A reciclagem de materiais e produtos plásticos e compósitos, de base fóssil e biológica, muito usados na construção (conforme descrito neste relatório), além de reduzir a poluição, promove também a descarbonização, a economia circular e a sustentabilidade, reduzindo os impactes sobre o meio ambiente e contribuindo para conservar recursos. De facto, é possível reciclar vários plásticos inúmeras

vezes, aumentando a vida útil do material em centenas de anos, pelo que a incorporação de reciclados em materiais de construção e no fabrico de novos produtos está a ser cada vez mais explorado.

2.2 Sustentabilidade dos materiais e produtos plásticos

A sustentabilidade foca-se em atender às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras em atender às suas necessidades. O conceito de sustentabilidade é composto por três pilares: económico, ambiental e social.

A sustentabilidade dos plásticos é um assunto polémico. Por um lado, algumas pessoas referem que a contaminação quase permanente do ambiente natural com resíduos de plástico é uma preocupação crescente. Por outro lado, há especialistas que argumentam que os materiais plásticos são frequentemente alvo de críticas injustas e de falsos mitos, designadamente os relacionados com a origem fóssil e com o consumo de energia para a sua produção.

É um facto confirmado que o uso do plástico permite economizar mais petróleo do que aquele que é utilizado no seu fabrico (apenas 4%), pois estes produtos também ajudam a economizar energia em aplicações como aquecimento, transporte, etc., aplicações essas responsáveis por 96% da utilização de petróleo. Além disso, no final da sua vida útil, o valor inerente aos plásticos pode ser quase totalmente recuperado. Acresce a isso o facto de os plásticos também já poderem ser de fonte biológica.

Muitos estudos permitem evidenciar que os plásticos ajudam a economizar energia. Na verdade, de acordo com o relatório Denkstatt (Denkstatt, 2010), o consumo de energia dos plásticos foi de 4.270 GJ/ano em comparação com 6.690 GJ/ano consumido por outros materiais alternativos. De acordo com este relatório, a substituição de plásticos em toda a Europa (UE27 + 2) por materiais alternativos equivale a mais 53 milhões de toneladas de petróleo bruto e a mais 61% de emissões de gases com efeito de estufa (GEE).

Por fim, é importante destacar que os plásticos são, na sua maior parte, recicláveis, pelo que é óbvio que o uso de reciclados de polímeros contribui para a sustentabilidade, de duas formas: primeiro, desviando de aterro milhares de toneladas de plástico por ano e, em segundo lugar, preservando os recursos naturais, com reflexos na economia associada ao consumo de energia, e proporcionando uma redução significativa nas emissões de gases com efeito de estufa.

Os plásticos permitem melhorar a qualidade de vida de milhões de pessoas em todo o mundo, tornando-a mais fácil, segura e agradável, ao mesmo tempo que são essenciais para acelerar a transição europeia para uma economia circular de baixo carbono, onde os recursos e a energia são utilizados da forma mais eficaz.

A sociedade só será capaz de atingir e aproveitar todo o potencial desses materiais extraordinários se enfrentar os desafios globais relacionados com o seu impacto negativo no meio ambiente, no fim da sua vida útil.

As questões globais exigem abordagens globais e soluções globais. É necessário criar parcerias fortes na cadeia de valor de plásticos com todas as partes interessadas, sejam elas locais, nacionais ou globais, e desenvolver soluções inovadoras e sustentáveis, de forma a criar uma estrutura para impulsionar a economia circular para os plásticos e desenvolver um projeto coletivo que permita acelerar a transformação para um futuro mais sustentável, de forma a garantir que os plásticos continuem a oferecer benefícios sociais e, simultaneamente, tenham um impacto positivo no meio ambiente (PlasticsEurope, 2020).

2.3 Sustentabilidade dos plásticos usados na construção

Embora os plásticos usados na construção civil sejam destinados a aplicações de longa duração (tubos, cabos, perfis de janelas e portas, revestimentos, isolamentos, etc.) e, por isso, estes materiais não apresentem tantos problemas como para outro tipo de aplicações, de utilização intensiva e de baixa durabilidade (sacos, embalagens, etc.), a má imagem dos plásticos poluidores não deixa de se refletir negativamente também em todos os produtos plásticos.

Porém, como o setor de construção requer cada vez mais materiais, logística e transportes, embalagens e gestão de resíduos, entre outros aspetos, este setor e a sua cadeia de fornecimento contribuem, em larga escala, para padrões de consumo e produção que têm impacto em aspetos ambientais fundamentais como a pegada de carbono, a energia incorporada, a água e os resíduos (UNEP-SBCI, 2012).

Como o setor da construção de edifícios é, atualmente, o maior utilizador de energia na Europa (40%) e, conseqüentemente, o maior emissor de gases com efeito de estufa (39%), significa que este setor pode ter um impacto enorme na economia de energia.

Os plásticos ajudam a conservar recursos em edifícios porque são leves e bons isolantes térmicos, pelo que também contribuem decisivamente para a sustentabilidade na construção, pois para além de se mostrarem eficazes numa ampla gama de fatores de sustentabilidade, permitem melhorar a eficiência energética dos edifícios e reduzir as emissões de CO₂. Complementarmente, estes materiais também contribuem para aumentar a durabilidade dos edifícios, devido a serem menos suscetíveis de corrosão.

A sua baixa massa volúmica também influencia a economia de energia nos transportes e nos equipamentos de energias alternativas (por ex. as hélices das torres eólicas).

Conseqüentemente, pode-se constatar que os materiais plásticos não devem ser banidos, mas antes intensificada a sua utilização.

Se se considerar o potencial uso de plásticos e compósitos reciclados e de base biológica na construção civil, o cenário será ainda melhor em termos de sustentabilidade.

Aumentar a incorporação do plástico reciclado em novos produtos de construção, agregando o desenvolvimento de produtos plásticos, aditivos e tecnologias mais ecológicas, garantindo simultaneamente metas de durabilidade e o bom desempenho final dos produtos plásticos, constitui um

enorme contributo para promover a economia de baixo carbono (descarbonização), a produção circular e a sustentabilidade, reduzindo os impactos sobre o meio ambiente, gerando emprego, inovação e desenvolvimento tecnológico.

2.4 Economia circular. Reciclagem

A aplicação de conceitos da produção circular implica um menor consumo de recursos naturais e uma maior eficiência dos processos, com conseqüente redução de custo e dos impactos ambientais. A economia circular e os ciclos fechados dos plásticos estão a dominar a agenda atual, e a reciclagem está no centro de inúmeros desenvolvimentos, também extensíveis à área da construção, pois permite reduzir drasticamente as emissões de GEE, ampliar a produção e o consumo de energias limpas e atingir ganhos de eficiência energética e produtiva.

Aumentar a quantidade e a qualidade do plástico e de compósitos reciclados, maximiza a retenção e a recuperação do valor inerente a estes materiais, contribuindo para uma “economia circular”, porque permite reprocessar plásticos provenientes de fluxos contendo resíduos de baixo valor e transformá-los em produtos de construção de qualidade, comerciais e com valor acrescentado.

2.5 Contributos da regulamentação Europeia

A Comissão Europeia definiu como objetivo tornar o setor da construção mais sustentável, abordando o desempenho de sustentabilidade dos produtos de construção na revisão do Regulamento dos Produtos de Construção (CPR), conforme anunciado no Plano de Ação para a Economia Circular, salvaguardando a manutenção do preço dos produtos de construção (EP, 2021).

No referido plano, a Comissão assume o compromisso de alinhar e tornar mais consistente a legislação sobre produtos de construção com as políticas ambientais horizontais e salienta a necessidade geral de uma transição para uma economia sustentável e mais circular no abastecimento, fabrico, reutilização e reciclagem de produtos de construção e na sua utilização em obras de construção; salienta a necessidade de melhorar a sustentabilidade dos produtos de construção e a disponibilidade de produtos e materiais secundários e renováveis no mercado.

Os atuais requisitos básicos para as obras de construção definidos no CPR revisto, já podem constituir a base para a preparação de mandatos de normalização e especificações técnicas harmonizadas no que diz respeito ao desempenho ambiental e à sustentabilidade dos produtos de construção.

Por fim, a Comissão Europeia (EC) pretende estabelecer um espaço de dados europeu, comum, para aplicações circulares inteligentes, com dados e informações sobre os produtos de construção, incluindo produtos reutilizados, ou reconicionados, ou fabricados a partir de materiais reciclados.

3 | Materiais plásticos e aditivos

3.1 Generalidades

O termo "plásticos" é usado para descrever uma ampla variedade de resinas ou polímeros com diferentes características e usos. O termo "polímero" é frequentemente usado como sinónimo de plástico, mas embora todos os plásticos sejam polímeros, nem todos os polímeros são plásticos. Polímeros raramente são úteis por si só, e são mais frequentemente modificados ou formulados com aditivos (ver secção 3.5.), sendo o produto composto geralmente denominado um plástico.

Ao longo do último século, os plásticos ofereceram soluções inovadoras para as necessidades e desafios em constante evolução da sociedade. Versáteis, duráveis e incrivelmente adaptáveis, os plásticos são uma família de materiais notáveis com ciência e inovação no seu DNA. Por isso, o plástico foi considerado o material do século 21 (PlasticsEurope, 2020).

Hoje em dia, os plásticos permitem atender a uma miríade de aplicações funcionais e estéticas.

Os polímeros que a seguir se descrevem, podem ser classificados em 3 categorias: termoplásticos, termoendurecíveis e elastómeros.

3.2 Termoplásticos

Os polímeros termoplásticos são compostos por cadeias longas de moléculas, lineares ou ramificadas, flexíveis, o que significa que as moléculas podem fluir sob pressão quando aquecidas acima de seu ponto de fusão; e essa característica também as torna recicláveis mecanicamente. Comportam-se como líquidos viscosos a altas temperaturas (abaixo da temperatura de degradação ou de despolimerização).

Os polímeros termoplásticos apresentam um comportamento plástico, podendo ser derretidos quando aquecidos, e ficam duros quando arrefecem. Por isso, podem ser aquecidos e transformados repetidamente.

Estes polímeros são obtidos por reações de adição e as macromoléculas ligam-se entre si por meio de ligações de fraca intensidade (Van der Waals e ligações hidrogénio) e por emaranhamento (Real, 2007). Estes materiais são rígidos a uma temperatura inferior à temperatura de transição vítrea, e são muito flexíveis entre esta temperatura e a temperatura de fusão. Os termoplásticos com maior grau de cristalinidade (polietileno e polipropileno) devem ser usados a uma temperatura superior à temperatura de transição vítrea. Os termoplásticos amorfos ou de baixo grau de cristalinidade (poliestireno e policloreto de vinilo) não apresentam gama de temperatura de fusão e devem ser usados a uma temperatura inferior à temperatura de transição vítrea.

Assim, os termoplásticos são muito mais fáceis de se adaptar à reciclagem, pois as suas características são reversíveis. Os termoplásticos podem ser reaquecidos, remodelados e arrefecidos repetidamente.

Existem dezenas de tipos de termoplásticos, variando cada um em organização cristalina e densidade. Os tipos de polímeros termoplásticos que são mais frequentemente produzidos e utilizados são o polipropileno (PP), o polietileno (PE), o qual pode ser classificado pela sua densidade (baixa, LDPE, ou alta HDPE), o policloreto de vinilo (PVC), o poliestireno (PS), o tereftalato de polietileno (PET), a poliamida (PA), o politetrafluoretileno (PTFE), o polimetacrilato de metilo (PMMA) e o policarbonato (PC). Alguns produtos de plástico formulados com os polímeros mencionados, comumente usados para embalar produtos domésticos, mostram um sistema de codificação numérico criado pela Society of the Plastics Industry no final dos anos 1980. A identificação "OUTROS" refere-se a plásticos geralmente estratificados ou mistos, sem potencial de reciclagem e que devem ser depositados em aterro.

3.3 Termoendurecíveis

Os termoendurecíveis são obtidos por condensação e são constituídos por cadeias longas que se encontram fortemente reticuladas umas às outras, formando estruturas tridimensionais, às quais não se pode aplicar a noção de massa molecular. Estes polímeros são amorfos e infusíveis e depois de aquecidos e formados, não podem ser reaquecidos e formados novamente. São, em geral, mais rígidos e resistentes do que os termoplásticos, mas também são mais frágeis. Como não apresentam uma gama de fusão, eles não podem ser facilmente reprocessados após a reticulação, pois não se transformam em líquidos viscosos por aquecimento, mas conservam a sua rigidez até se degradarem, por combustão ou oxidação (Real, 2007). Exemplos de termoendurecíveis são as resinas epoxídicas e fenólicas, os poliésteres, o poliuretano (PU), as aminas e o silicone.

3.4 Elastómeros

Os elastómeros são dotados de uma estrutura intermédia, na qual também existe alguma reticulação. Estes polímeros têm a capacidade de sofrer enormes alongamentos por deformação elástica (até 1000%), sem alteração permanente da sua forma original. Estes materiais têm de ser utilizados acima da sua temperatura de transição vítrea (Real, 2007). Exemplos de elastómeros são o copolímero de estireno-acrilonitrilo-butadieno (ABS), o copolímero de estireno-butadieno-estireno (SBS), o polibutadieno (PB) e o poli-isopreno (PI).

3.5 Aditivos poliméricos

Os aditivos poliméricos, quando adicionados aos polímeros, permitem formar compostos úteis (designados por plásticos), materiais com características adequadas ao processo de fabrico e à utilização a que se destina o produto final.

Os aditivos para plásticos subdividem-se em adjuvantes e cargas. Os adjuvantes são todas as substâncias não poliméricas introduzidas num polímero, em pequenas quantidades, com o objetivo de facilitar o seu processamento, modificando ou melhorando o seu comportamento reológico e/ou as suas propriedades físicas, e para lhe conferir estabilidade ao longo do tempo, fundamentalmente à ação da

radiação ultravioleta, à oxidação e ao impacto. Estas substâncias são, normalmente, produtos orgânicos ou organometálicos e possuem, geralmente, baixa massa molecular quando comparados com os próprios polímeros (Real, 2007).

As restantes substâncias, geralmente minerais, utilizadas em concentrações elevadas, designam-se por cargas. No entanto, certos produtos minerais podem também classificar-se como adjuvantes, desde que a sua função assim o justifique. Exemplo disso são os carbonatos mistos de alumínio e de magnésio, usados na estabilização térmica do PVC, ou o negro de carbono, usado também como antioxidante em poliolefinas (Real, 2007).

Os adjuvantes classificam-se em categorias, de acordo com a sua função: estabilizantes térmicos, estabilizantes fotoquímicos, corantes, antioxidantes, lubrificantes, plastificantes, modificadores de impacto, desativadores de metais, agentes de nucleação, antidepositantes, retardantes de chama, desmoldantes, antiestáticos, espumantes, antiaderentes, etc.

A aditivação faz-se antes ou após a polimerização, muitas vezes durante a fase de granulação. A utilização de aditivos não é apenas dependente do desempenho das formulações e das aplicações, mas também da legislação, da pressão dos consumidores, de fatores ambientais e toxicológicos e do desenvolvimento tecnológico (Real, 2007).

A eficácia dos adjuvantes é fundamentalmente determinada pelas funções químicas presentes nas suas moléculas, mas a estrutura molecular, mais ou menos complexa onde os grupos funcionais estão inseridos, contribui para o seu comportamento físico no seio do polímero, pondo em relevo aspetos associados à sua compatibilidade e dispersibilidade, os quais governam os fenómenos de migração, exsudação e extração.

A compatibilidade entre os polímeros e os adjuvantes depende da morfologia do polímero (as partes cristalinas são geralmente impermeáveis aos adjuvantes, pelo que estes se acumulam nas zonas amorfas), das características físicas do adjuvante (volatilidade, por exemplo) e de fatores estruturais (interação polímero-adjuvante). A eficácia do adjuvante é tanto melhor quanto mais uniformemente ele se repartir na matriz polimérica, pelo que o seu limite de solubilidade às temperaturas normais de utilização é um fator importante na definição da concentração ótima de adjuvante na formulação. A sua utilização em quantidades acima daquele limite conduz a uma separação de fases ao longo do tempo, originando a migração do adjuvante para a superfície do material. Para garantir uma dispersão conveniente, pode adicionar-se um aditivo compatibilizante que assegure a ligação, à superfície, das partículas dispersas, entre o adjuvante e o polímero. Uma parte da molécula do agente de ligação tem uma afinidade pelo aditivo a dispersar e outra parte tem uma afinidade pelo polímero. Para facilitar a utilização dos adjuvantes podem preparar-se misturas granuladas, contendo concentrações elevadas de aditivos, as quais serão posteriormente adicionadas aos grânulos de resina sem adjuvantes (Real, 2007).

Para além daqueles fatores (compatibilidade e grau de dispersão), na preparação das formulações também é necessário ter em consideração a possibilidade de antagonismos de ações sobre as propriedades ou entre aditivos. De facto, um adjuvante pode melhorar uma dada característica num

polímero e, simultaneamente, modificar de forma indesejável uma outra propriedade desse mesmo polímero. Por outro lado, existe também a possibilidade de que ocorram efeitos antagônicos (ou sinérgicos) entre aditivos (Real, 2007).

3.6 Plásticos ecológicos

3.6.1 Generalidades

Por questões ambientais, existe atualmente um grande interesse na produção de materiais plásticos que possam ser descartados com segurança e facilidade no meio ambiente, ou seja, em produzir polímeros que sejam verdadeiramente biodegradáveis e que possam ser usados nas mesmas aplicações que os polímeros convencionais.

Este incentivo crescente ao recurso de alternativas sustentáveis e materiais mais amigos do ambiente, tem originado, por parte da indústria de plásticos e compósitos, o desenvolvimento de polímeros biodegradáveis, plásticos de base biológica e biocompósitos, ou seja de uma classe de materiais mais ecológicos e que apresentam custos reduzidos de energia e menor poluição durante a sua produção, além de também poderem apresentar um maior potencial de reaproveitamento após a fim de vida.

3.6.2 Plásticos degradáveis

As pastas de base biológica são produzidas a partir de fontes de biomassa, cana-de-açúcar e milho, e são semelhantes aos polímeros produzidos a partir de combustíveis fósseis. Os biocompósitos, feitos a partir de resinas de base biológica e incorporando fibras naturais, também são biodegradáveis.

Os plásticos degradáveis podem ser de dois tipos: os plásticos fotodegradáveis, que não contêm aditivos orgânicos, mas que se quebram quando expostos à luz solar, e as resinas plásticas biodegradáveis que podem ser degradadas por microrganismos em CO₂, água e biomassa por meio de um processo de biodeterioração, biofragmentação e assimilação.

Um exemplo de plásticos fotodegradáveis é o designado plástico oxo-degradável, que se quebra ao ser exposto à luz ultravioleta e ao calor, através de um processo que é catalisado por aditivos. Este processo químico acelera a degradação real, mas o material não pode ser considerado compostável. A biodegradabilidade ou oxodegradabilidade pode corromper potencialmente a funcionalidade dos plásticos recicláveis; e plásticos com estas funcionalidades devem, portanto, ser evitados em processos de reciclagem mecânica (Plastic Zero, 2013a).

Foi identificado já um grande número de bactérias e de enzimas produzidas por microrganismos com capacidade para degradar polímeros biodegradáveis do segundo tipo, não oxodegradáveis. Porém, estes não podem degradar todos os tipos de polímeros biodegradáveis, e a eficácia e/ou taxa de biodegradação dependem das propriedades do polímero, designadamente das condições de superfície, estrutura química, massa molecular, propriedades físicas e morfologia. Em muitos casos, a degradação microbiana deve ser precedida por UV ou degradação hidrolítica, ou deve criar-se um ambiente de compostagem específico (Luyt, 2007).

Alguns plásticos biodegradáveis são, no entanto, suficientemente estáveis para serem usados em mobiliário e pavimentos, entre outras aplicações características dos materiais de construção, porque a sua decomposição depende exclusivamente da presença de microrganismos que vivem em ambientes anaeróbicos. Assim, para se degradarem, esses materiais devem ser mantidos em ambientes que não estejam em contato com o ar, como por exemplo, serem colocados em aterro ou em local de compostagem.

Os requisitos mais importantes para utilização deste tipo de polímeros na construção consistem em poderem ser processados no estado de fusão, serem impermeáveis à água e manterem a sua integridade durante o seu uso normal.

As principais questões sobre o uso de plásticos e compósitos biodegradáveis são as seguintes:

- Agravamento potencial da crise alimentar, se forem feitos de milho, cana-de-açúcar, trigo ou outras culturas geneticamente modificadas;
- Instabilidade potencial de alguns desses bioplásticos, quando comparados com os plásticos convencionais à base de petróleo. Como se degradam mais rapidamente, nem todos são bons para materiais de construção, os quais devem ter alta durabilidade e boa resistência aos agentes atmosféricos.
- Necessidade de criação de locais de compostagem comerciais em todos os países do mundo, onde os diferentes polímeros biodegradáveis possam ser separados e compostados em ambientes que contenham micro-organismos eficazes para a biodegradação de cada polímero específico.

Espera-se que, num futuro próximo, estes problemas sejam resolvidos e que os biocompósitos apresentem uma maior durabilidade, maior resistência ao fogo e à humidade, bem como um melhor desempenho de isolamento térmico (e acústico), principalmente quando combinados sinergicamente com nanomateriais (como por exemplo aerogéis de sílica).

A indústria da construção é muito exigente no que respeita às características dos materiais, que devem ser adequados à aplicação a que se destinam e apresentar, quer um bom desempenho quer uma durabilidade apropriada. Por outro lado, os produtos novos têm muita dificuldade em penetrar no mercado da construção, e substituir os produtos tradicionais, já bem conhecidos. No entanto, tal utilização tem vindo a ser incrementada devido à pressão crescente exercida pelos consumidores e/ou por imposição legislativa, o que tem vindo a incentivar a utilização de materiais mais sustentáveis (Real, 2017).

3.6.3 Bioplásticos

Os bioplásticos são um impulsionador importante da evolução dos plásticos, contribuindo significativamente para uma sociedade mais sustentável. Atualmente, as principais áreas de aplicação deste tipo de plásticos são nas embalagens, no catering, na agricultura e horticultura, na indústria automóvel, em aplicações eletrónicas, em fibras e têxteis, nos brinquedos e em artigos de lazer e de desporto. Os bioplásticos são pouco usados em materiais de construção, embora já existam

experiências de incorporação de ácido polilático (PLA) em compósitos de madeira-plástico, sendo a maior desvantagem a sua baixa resistência à temperatura durante o processo de produção.

Os bioplásticos são feitos de materiais naturais (em vez de combustíveis fósseis), como por exemplo, o amido de milho, a cana-de-açúcar, a beterraba, a proteína de soja, o ácido lático ou a celulose (principal componente dos tecidos vegetais). O pol-hidroxicanoato (PHA) e o PLA são exemplos de biopolímeros, usados para fabricar produtos bioplásticos.

Alguns bioplásticos possuem a funcionalidade de também serem biodegradáveis. No entanto, essa propriedade só pode ser utilizada se o sistema de gestão de resíduos for projetado para tratar os resíduos biológicos de forma especial, o que muitas vezes não acontece. Assim, não é fácil avaliar para que propósitos os bioplásticos terão uma vantagem sobre o plástico convencional, considerando tanto as funcionalidades do material como o fluxo de massa dos recursos (Plastic Zero, 2013a).

Em princípio, a fabricação de produtos de plástico "verdes" requer a mesma energia do que a fabricação de plásticos à base de combustível fóssil. O mesmo se pode referir em relação ao transporte. Mas, a necessidade de recorrer a aditivos específicos para melhorar certas características dos bioplásticos constitui uma desvantagem, uma vez que conduz a um maior consumo de energia e emissão de CO₂.

Na generalidade, a necessidade global de terras cultiváveis para de produzirem polímeros de base biológica é de apenas 0,006% das terras agrícolas globais (RITCHIE, 2018). A principal matéria-prima de biomassa usada para a produção de polímeros de base biológica é o glicerol, como subproduto biogénico (37%). Porém, a utilização do solo, água, fertilizantes, adubos, plantações (frequentemente transgênicas, para cultivo de grandes quantidades de milho, cana-de-açúcar ou beterraba constitui uma desvantagem ambiental intransponível dos bioplásticos, pois essas terras agrícolas e esses meios poderiam ser usados para o cultivo de alimentos (Plastic Zero, 2013a).

A maior vantagem destes plásticos centra-se na menor energia incorporada das matérias-primas e na maior facilidade de degradação após o seu fim de vida. De facto, os bioplásticos são compostáveis e decompõem-se facilmente em poucas semanas, contrariamente aos plásticos convencionais, os quais podem levar mais de 500 anos para se degradarem. O PLA, por exemplo, também produz quase 70% menos de gases de efeito estufa quando se decompõe em aterros sanitários, do que os plásticos tradicionais.

Também se tem verificado que as empresas do ramo de plástico ecológico têm maior probabilidade de adotar processos alternativos ou de baixo consumo de energia, uma vez que visam o mercado "verde". De facto, as empresas de bioplásticos têm instituído novos processos de fabricação que reduzem em 60% as suas emissões de gases de efeito estufa e em 30% as suas necessidades energéticas, permitindo ainda emitir menos 77% de CO₂ do que a produção de um plástico típico à base de petróleo.

Portanto, as várias desvantagens referidas para estes materiais só podem ser realmente compensadas mediante a redução da poluição (lixo), do consumo de energia e da emissão de CO₂, numa análise global de ciclo de vida.

No entanto, é importante ter em atenção que também há informação enganosa, em parte motivada por estar em voga a preferência por produtos "verdes", pois muitas indústrias incorporam, nos seus

produtos, pequenas quantidades de plástico fabricado com álcool destilado a partir de plantas ou cereais, e atribuem, por isso, a estes produtos, tampas verdes, logótipos com folhas ou plantas verdes, mas que no fundo não passam de produtos que permanecem centenas de anos no meio ambiente e em nada se distinguem dos plásticos tradicionais, fabricados a partir de combustíveis fósseis.

3.6.4 Biocompósitos

Os biocompósitos abrangem vários tipos de materiais compósitos, nomeadamente polímeros não biodegradáveis derivados do petróleo, reforçados com biofibras: biopolímeros reforçados com biofibras (os mais ecológicos, referidos como "compósitos verdes"); biopolímeros reforçados com fibras sintéticas, como vidro ou carbono; e materiais inorgânicos contendo fibras naturais

Embora os produtos biocompósitos já tenham um desempenho satisfatório em muitas aplicações de construção, ainda precisam ser melhorados em algumas características específicas, que requerem investigação e desenvolvimento tecnológico (Real, 2017).

Também, neste caso, existe competição com a agricultura alimentar, o que constitui a maior desvantagem deste tipo de produtos.

3.6.5 Plásticos reciclados

Os produtos plásticos que são recuperados (de várias fontes, incluindo o oceano) e reciclados para fazer novos produtos são chamados de plásticos reciclados.

Porém, reciclar materiais antigos para criar novos produtos tem as suas desvantagens, pois essa produção consome, com raras exceções, a mesma quantidade de tempo e energia que qualquer outro produto plástico.

A grande vantagem da reciclagem consiste na implementação da economia circular, ou seja reduzir a poluição e o consumo de recursos naturais (matérias primas), promover a descarbonização, a produção circular e a sustentabilidade, reduzir as emissões de gases com efeito de estufa (GEE), recuperar o valor inerente aos materiais reciclados, através do reprocessamento de plásticos provenientes de fluxos contendo resíduos de baixo valor e transformá-los em produtos de construção de qualidade, comerciais e com valor acrescentado.

4 | Estatísticas de mercado dos plásticos

4.1 Generalidades

Embora existam várias organizações europeias que obtêm e fornecem informação e dados estatísticos de mercado relativamente à cadeia de valor de plásticos, nomeadamente a PlasticsEurope, a EuPC (the European Plastics Converters), a EuPR (the European Plastics Recyclers) e a EPRO (the European Association of Plastics Recycling and Recovery Organisations), o acesso a dados estatísticos de mercado atualizados e fiáveis, nem sempre é fácil.

Os dados que aqui se apresentam correspondem aos existentes na bibliografia, em particular nos relatórios anuais da PlasticsEurope.

4.2 Capacidade de produção e mercado de aplicação dos plásticos

A indústria de plásticos é vital para a economia da Europa e para o seu plano de recuperação. Juntos, os produtores de matérias-primas plásticas, transformadores de plásticos, recicladores de plásticos e fabricantes de máquinas, representam uma cadeia de valor que emprega mais de 1,5 milhões de pessoas na Europa, por meio de mais de 55.000 empresas relacionadas, a maioria delas PME, operando em todos os países europeus. Em 2019, estas empresas faturaram mais de 350 biliões de euros e contribuíram com mais de 30 biliões de euros para as finanças públicas europeias (PlastisEurope,2020).

Em 2019, a produção global de plásticos quase atingiu 370 milhões de toneladas (359 em 2018). Na Europa, a produção de plásticos chega a quase 58 milhões de toneladas (cerca de 62 em 2018).

A Figura 4.1 representa a produção de plástico no mundo até 2019 (gráfico cumulativo). A Figura 4.2 apresenta a produção acumulada de plástico na Europa até 2019. Ambos os gráficos são baseados em dados extraídos de diversas publicações da PlasticsEurope (PlasticsEurope, 2006-2020).

Já o Quadro 4.1 apresenta a distribuição percentual da produção de plásticos nas várias regiões do mundo (PlasticsEurope, 2020), o que permite constatar que a China é o maior produtor mundial de plástico.

Em 2019, a procura total de plástico na Europa (EU₂₈ + NO/CH) para conversão industrial foi de 50,7 milhões de toneladas, distribuídas pelos segmentos indicados no Quadro 4.2 (PlastisEurope,2020).

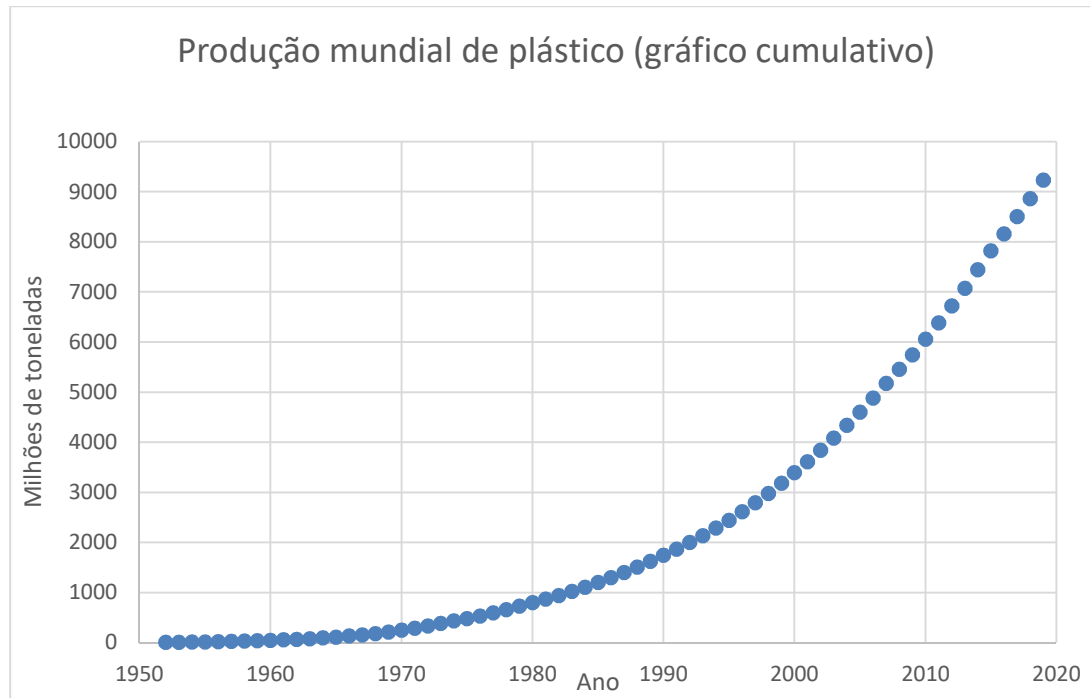


Figura 4.1 – Produção mundial acumulada de plástico até 2019 (PlasticsEuropa)

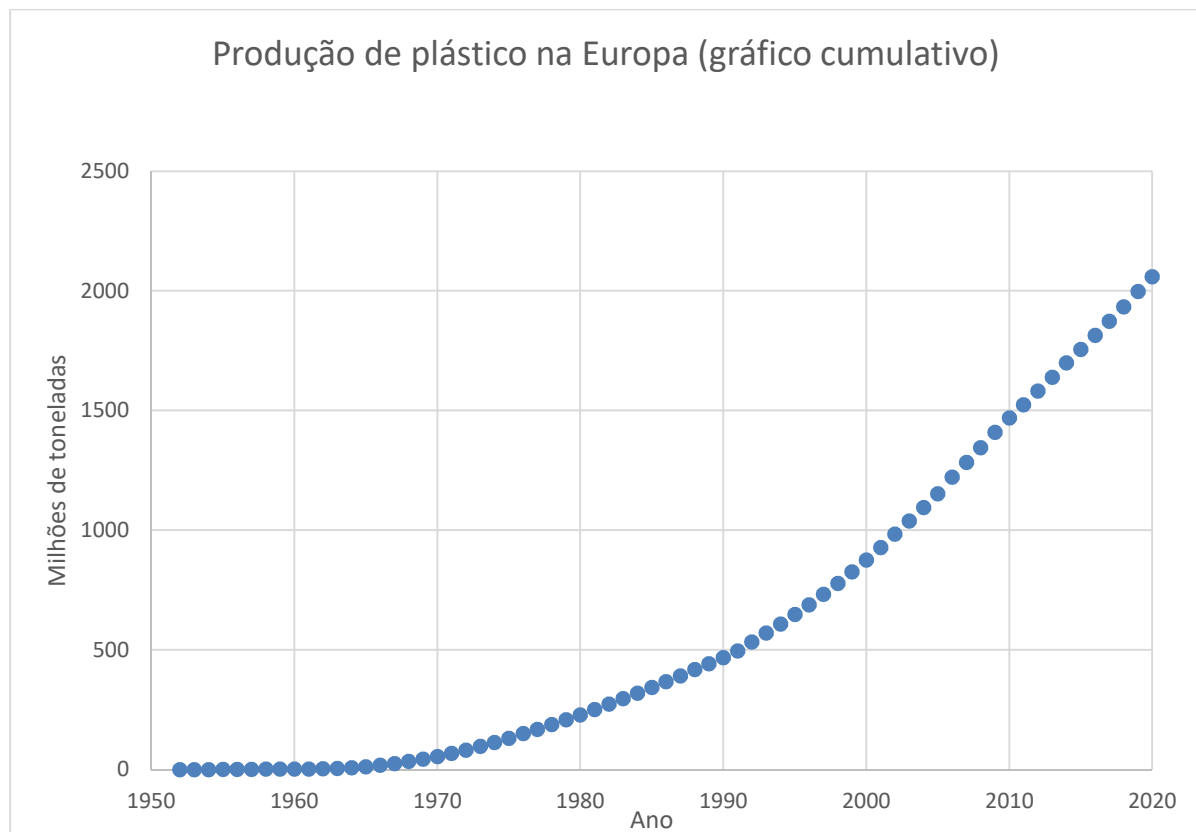


Figura 4.2 – Produção acumulada de plástico na Europa até 2019 (PlasticsEuropa)

Quadro 4.1 – Distribuição da Produção de Plástico em 2019 (PlasticsEurope, 2020)

Região	%
Ásia (China)	51 (31)
EUA e México (NAFTA)	19
Europa	16
Médio Oriente e África	7
América latina	4
Comunidade de Estados Independentes (CIS: Rússia, etc.)	3

Quadro 4.2 – Procura total de plástico na Europa (EU₂₈ + NO/CH) para conversão industrial, por setores de atividade, em 2019 (PlasticsEurope, 2020)

Sector de atividade	%
Embalagem	39,6
Construção	20,4
Indústria automóvel	9,6
Eletricidade e eletrónica	6,21
Aplicações domésticas, lazer e desporto	4,1
Agricultura	3,4
Outros (Engenharia mecânica, mobiliário, medicina, etc.)	16,7

Como se pode concluir a partir do Quadro 4.2, os setores da embalagem e da construção são aqueles que lideram o mercado, seguido da indústria automóvel.

No Quadro 4.3 apresenta-se o mercado de plásticos na Europa (EU₂₈ + NO/CH), em 2019, por tipo de resina e aplicação (PlasticsEurope, 2020).

Quadro 4.3 – Mercado de plástico na Europa (EU₂₈ + NO/CH), por tipo de resina e aplicação (PlasticsEurope, 2020)

Resina	Aplicações	%
PP	Embalagem alimentar, invólucros de doces e aperitivos, tampas com dobradiças, recipientes para micro-ondas, tubos e acessórios, peças de automóvel, notas de banco, etc.	19,4
PEBD (homo e copolímeros) e PELBD (copolímeros lineares)	Sacos reutilizáveis, bandejas, recipientes, filmes para agricultura, filmes para embalagens alimentares, etc.	17,4
PEAD e PEMD	Brinquedos, garrafas de leite e de champô, tubagem, utensílios domésticos, etc.	12,4
Outros termoplásticos	Diversas	11,6

Praticamente todo o tipo de termoplásticos referidos no Quadro 4.3 são usados em embalagem, e quase todos (exceto o PET) são usados também na construção, na indústria automóvel e em equipamentos elétricos e eletrónicos.

4.3 Capacidade de produção e mercado dos polímeros de base biológica

O ano de 2020 foi um ano promissor para polímeros de base biológica. Em 2020, o volume total de produção de polímeros de base biológica foi de 4,2 milhões de toneladas, o que representa 1% do volume total de produção de polímeros de base fóssil. Pela primeira vez, em muitos anos, a taxa composta de crescimento anual (CAGR) é, com 8%, significativamente maior do que o crescimento geral de polímeros (3-4%), tendência que se prevê que continue até 2025 (Nova, 2021).

Depois da Ásia, como região líder, que instalou as maiores capacidades de produção de base biológica mundial com 47% em 2020, segue-se a Europa com 26%, a América do Norte com 17% e a América do Sul com 9%, respetivamente, tendo a Austrália uma capacidade de produção de cerca de 1% (Nova, 2021). Com uma CAGR esperada de 16% entre 2020 e 2025, a Ásia exhibe o maior crescimento de capacidades de polímero de base biológica em comparação com outras regiões do mundo. Este aumento deve-se principalmente às maiores capacidades de produção de PA, PBAT, PHA e PLA (Nova, 2021).

Atualmente, os polímeros de base biológica podem ser usados em quase todos os segmentos de mercado; mas as várias aplicações por polímero podem ser muito diferentes. Os setores que lideram a utilização dos bioplásticos são a indústria das fibras (principalmente acetato de celulose e tereftalato de polítrimetileno) e a das embalagens (ambos com 24% de participação no total), seguindo-se a indústria automóvel e os transportes (usando principalmente resinas epóxi, PUR e policarbonatos alifáticos) com 16%. A percentagem de utilização em edifícios e na construção é de 14% (principalmente resinas epóxi e poliamidas). Os segmentos de mercado agro-horticultura, elétrica e eletrónica, funcional e outros, têm uma quota de mercado inferior a 5% (Nova, 2021).

Informação mais detalhada acerca do mercado dos bioplásticos, pode ser consultada na referência (European Bioplastics, 2021).

5 | Uso de plásticos na construção

A ampla gama de propriedades de aparência e desempenho dos plásticos são derivadas das características inerentes do material polimérico individual, sua composição (polímero mais aditivos) e como ele é processado e usado.

Embora os plásticos nem sempre sejam visíveis nos edifícios, a indústria da construção civil recorre cada vez mais a estes materiais para uma ampla gama de aplicações, incluindo isolamento térmico e acústico, tubagem, condutas de exaustão e ventilação, caixilharia e *design* de interiores. Esse crescimento de aplicações, deve-se principalmente às características únicas dos plásticos, designadamente à sua resistência química, às propriedades mecânicas (resistência, estabilidade dimensional), às propriedades de isolamento (elétrico, térmico e acústico), à sua durabilidade, possibilidade de reciclagem e muitas outras. A indústria da construção civil tem um papel importante a desempenhar na redução do uso de energia e de emissões de dióxido de carbono, que são o maior contribuinte para o aquecimento global, pelo que o recurso aos materiais plásticos contribui para a sustentabilidade na construção (ver secção 2.3).

Os polímeros mais frequentemente usados em edifícios e construção são os seguintes: PE, PP, PVC, PC, poliestireno expandido (EPS), poliestireno extrudido (XPS), espuma de poliuretano (PU), acrílicos (normalmente o PMMA) e compósitos. Porém, também estão sempre a surgir plásticos novos, pois são materiais em contínuo desenvolvimento, com uma grande componente de inovação. Por exemplo, recentemente, a indústria de plástico foi pioneira na criação de um novo polímero que aumenta a resistência térmica, usando até 50% menos de matéria-prima (EuPC, 2014).

Em 2019, o setor da construção civil consumiu 10,3 milhões de toneladas de plástico, ou seja 20,4% do consumo total de plástico na Europa (EU₂₈ + NO/CH), tornando-se a segunda maior aplicação de plástico depois da embalagem (Quadro 4.2).

As principais aplicações dos materiais plásticos não reforçados na construção, são as seguintes:

- sistemas de tubagem para diversas utilizações;
- tanques enterrados, caixas de visita e sistemas para instalações de tratamento de águas residuais;
- telas e geomembranas de revestimento e isolamento;
- portas e janelas;
- suportes de carris em vias férreas;
- estruturas de apoio na linha costeira (por ex. docas);
- coberturas e tetos falsos;
- revestimento interiores e de fachadas de edifícios; e
- sistemas de reforço sísmico e almofadas para dissipação de energia sísmica, colocados entre os edifícios e as respetivas fundações.

Na maior parte destas aplicações é possível a utilização de materiais poliméricos, parcial ou totalmente reciclados, portanto com benefícios sociais e ambientais evidentes.

Para possibilitar a produção de materiais reciclados de alta qualidade, os resíduos de plástico dos produtos, em fim de vida, usados nas aplicações acima referidas, devem ser separados de acordo com a natureza do polímero constituinte.

No entanto, existe uma grande quantidade de diferentes variedades de resinas plásticas e misturas de resinas utilizadas em produtos de construção, sem códigos, que são difíceis de separar, recolher e reciclar, pelo que estes devem ser encaminhados para incineração ou para fluxos de resíduos mistos.

6 | Uso de plásticos reforçados com fibras na construção

6.1 Classificação dos compósitos

Os compósitos podem ser classificados de acordo com a natureza da matriz (cerâmica, polimérica ou metálica) e pelo tipo de resina polimérica (termoplástica, termoendurecível) e respetiva origem (sintética, biológica ou mista).

Os plásticos reforçados com fibras são designados compósitos de matriz polimérica e resultam da combinação de fibras (naturais ou sintéticas), que podem ser contínuas ou discretas, em concentrações tipicamente na gama de 12%-60% em volume, envoltas numa matriz de resinas termoplásticas ou termoendurecíveis.

Estes compósitos podem ter cargas inorgânicas na formulação, normalmente até 20% em volume, mas alguns tipos de compósitos poliméricos podem conter até 50% do seu peso em cargas, geralmente carbonato de cálcio, talco ou pós de mica (Yazdanbakhsh & Bank, 2014).

Os compósitos poliméricos também podem ser classificados com base no tipo de reforço (fibras, partículas ou estruturas - laminadas ou em sanduíche) e pela natureza das fibras (orgânicas, inorgânicas, biológicas ou sintéticas). Os compósitos reforçados com fibras também podem ser classificados pelo comprimento das fibras (longas alinhadas e contínuas, ou curtas, descontínuas, alinhadas ou orientadas aleatoriamente).

Por fim, os compósitos utilizados em edifícios podem também ser classificados em dois grupos principais: materiais compósitos estruturais e não estruturais, dependendo se suportam ou não cargas significativas durante a sua utilização. Constituem exemplos de compósitos estruturais os aplicados em paredes de suporte, escadas, sistemas de cobertura, passeios e estradas pedestres, docas, calçadas e lajes de pavimentação. São exemplos de compósitos não estruturais e semiestruturais aqueles utilizados em diversas situações de menor exigência estrutural, como revestimentos de paredes interiores e exteriores, elementos decorativos, falsos azulejos, isolamentos térmicos e acústicos, móveis, janelas, portas e outros produtos do mesmo tipo (Real, 2017).

6.2 Características dos compósitos de matriz polimérica

Os materiais compósitos de matriz plástica reforçada com fibras (à base de PRF) são uma classe de materiais que exibem um grande potencial para utilização em infraestruturas de engenharia civil, tendo demonstrado durante as últimas 3 décadas a sua utilidade em diversas áreas da construção.

Devido à sua boa resistência e rigidez específica, baixo peso, estabilidade dimensional, flexibilidade arquitetónica e aparência estética, têm vindo a substituir alguns dos materiais tradicionais usados na construção, podendo referir-se uma ampla gama de aplicações.

Os compósitos poliméricos à base de FRP têm vantagens importantes sobre muitos outros materiais de construção tradicionais (como o aço e betão, e madeira, em certas circunstâncias). Essas vantagens incluem tipicamente densidades mais baixas (isto é, baixo peso), propriedades mecânicas mais elevadas em direções específicas (de orientação das fibras, por exemplo), facilidade de instalação e maior durabilidade em ambientes químicos e aquosos agressivos. As desvantagens em relação aos materiais de construção convencionais incluem geralmente custos mais elevados, menor resistência à temperatura e logo pior desempenho ao fogo, e alguma dificuldade de reciclagem.

6.3 Aplicação dos compósitos poliméricos na construção

6.3.1 Generalidades

A maior parte dos compósitos poliméricos utilizados na construção civil são à base de resinas de poliéster ou epóxido reforçadas com fibras contínuas de vidro ou carbono (FRC ou FRP). Existem alguns exemplos de estruturas eficientes de alta durabilidade, constituídas por esses materiais, o que tem facilitado e promovido a aceitação do FRP na construção.

A flexibilidade dos FRP tem permitido a sua ampla utilização na construção, tanto em componentes não estruturais como semiestruturais e também em desenvolvimentos estruturais inovadores, sem comprometer a integridade estrutural e, geralmente, sem acréscimo de custos, pelo que também se desenvolveram superestruturas constituídas exclusivamente por FRC.

A principal vantagem destes materiais provém da sinergia que é possível obter em utilizações integradas, com outros materiais mais convencionais. Tomando como exemplo as pontes, existe uma grande quantidade de estruturas híbridas, em que apenas uma parte da superestrutura é feita de FRC. A superfície do compósito também pode ser texturada para facilitar a ligação a outros materiais convencionais, como por exemplo as argamassas e o betão.

A sua facilidade de transformação durante o processo de fabrico de produtos acabados e a sua compatibilidade com outros materiais de construção, confere mais flexibilidade dimensional e arquitetónica, pois permite a obtenção de formas complexas, que não podem ser obtidas com tanto facilidade e economia com os materiais tradicionais, mais criativas e inovadoras, de aparência agradável e de fácil aceitação social.

A sua excelente resistência à corrosão (comparativamente com os materiais metálicos, evidentemente) reduz as necessidades de manutenção e assegura uma maior durabilidade.

Os benefícios associados ao transporte, instalação e segurança prevalecem com a utilização de elementos estruturais de PRF. Dotados de menor densidade, os FRP diminuem os custos de transporte e tornam-se mais seguros de manusear no local da obra. É possível também a pré-fabricação de elementos modulares, facilitando a montagem no local da obra e diminuindo o tempo de instalação.

6.3.2 Resíduos de PRF

A produção de FRP e a sequente fabricação de produtos de FRP libertam uma quantidade notável de resíduos. Em processos altamente eficientes, como a pultrusão, o desperdício (refugo) está na gama de 3% a 5%, enquanto que em processos de *lay-up* manual, menos eficientes, se aproxima normalmente de 15% (Yazdanbakhsh & Bank, 2014).

As aplicações de resíduos de FRP em betão incluem a sua incorporação em lajes de pavimentação pré-moldadas, telhas, painéis de parede, blocos de pavimentação e materiais de revestimento exterior de cariz arquitetónico.

Os resíduos gerados a partir da produção de produtos de reforço em polímero reforçado com fibras de vidro (GRP), normalmente na forma de vergalhões curtos ou vergalhões defeituosos com fibras de vidro mal aderidas, pode ser usada diretamente na incorporação em peças ou elementos de betão com menor resistência estrutural, por exemplo o usado para cobrir lajes de pavimento (Yazdanbakhsh & Bank, 2014).

Um uso potencialmente viável para os resíduos de plástico reforçado com fibras consiste na substituição parcial de cargas ou agregados em materiais cimentícios (particularmente de argamassa de cimento *portland* e betão) (Yazdanbakhsh & Bank, 2014) e em vários materiais de construção (Job, 2010), com efeito pouco significativo na durabilidade.

6.3.3 Produtos de PRF

Existe uma grande quantidade de aplicações dos materiais plásticos reforçados com fibras e compósitos, designadamente as seguintes:

- reparação e reabilitação de elementos estruturais;
- sistemas de reparação e de reforço de estruturas de madeira;
- perfis estruturais e estruturas de pequena dimensão para edifícios;
- cofragem;
- guardas de proteção em pontes;
- passadiços inferiores fechados para circulação em pontes;
- fortalecimento de vigas em pontes;
- paredes estruturais leves;
- revestimentos exteriores de paredes;
- isolamentos;
- pavimentos;
- coberturas, incluindo as aplicações acústicas especiais, as energeticamente eficientes e em construção passiva;
- elementos decorativos absorventes sonoros;
- cercas exteriores e divisórias interiores;
- reforço de juntas de vigas com pilares;
- reforço de lajes, muros, silos, chaminés e túneis;

- sistemas de ancoragem;
- varões de transmissão de carga para infraestruturas rodoviárias;
- construção de pontes pedonais apoiadas ou suspensas;
- vias pedonais;
- docas;
- painéis solares e estruturas e turbinas de energia eólica;
- *kits* de proteção contra explosão.

Ilustra-se na Figura 6.1, algumas aplicações típicas dos compósitos poliméricos, designadamente em aplicações urbanas exteriores (a); envolvente exterior (fachadas e coberturas) de edifícios (b); pontes pedonais e destinadas ao tráfego de veículos (c); pontes ferroviárias (d); passadiços inferiores de pontes (e) e elementos resistentes de pontes pedonais suspensas (f)

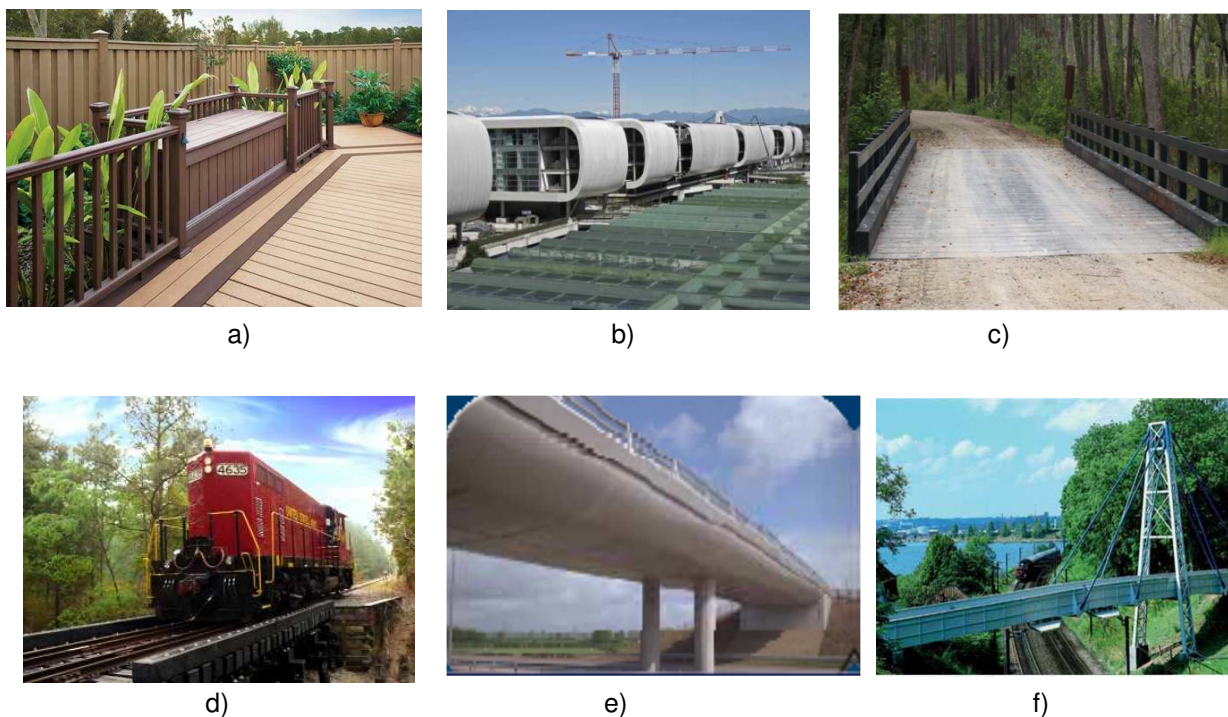


Figura 6.1 – Exemplos de aplicações típicas dos materiais compósitos reforçados com fibras: a) pavimentos e mobiliário urbano exterior em aplicações correntes; b) Hotel Sheraton – aeroporto de Malpensa, Milão, IT; c) Camp Mackall, Carolina do Norte, USA; d) York, Maine, USA; e) Severn Crossing approaches, UK; f) Kolding, Dinamarca

De entre as aplicações acima referidas, destaca-se a frequente utilização dos FRP para reparar estruturas de betão e reconstruir tubos enterrados.

As vigas compósitas também têm sido muito usadas em várias pontes, quer devido ao seu baixo peso quer à sua elevada resistência mecânica. Assim, as vigas e as lajes de pavimentos em PRF já constituem uma alternativa eficiente, económica e mais facilmente instalável, para substituição de lajes

antigas de pontes com vão reduzido que já não cumprem as exigências atuais requeridas para as pontes (Alampalli *et al*, 2002).

Os painéis de PRF também são usados para servir como sistemas de cofragem de elementos de betão, vertendo-se o betão diretamente sobre os painéis de fibra de vidro interligados. Como os painéis são resistentes à corrosão e leves, não precisam de ser removidos, funcionando assim como cofragem perdida. Desta forma economiza-se no custo de mão de obra e realiza-se uma instalação mais rápida.

7 | Uso de biocompósitos na construção

7.1 Generalidades

O ressurgimento de compósitos reforçados com fibras vegetais (VFRC) e outros tipos de biocompósitos resulta de existir atualmente um grande interesse em tecnologia sustentável, devido à sua menor energia incorporada. As fibras vegetais são um tipo de recurso natural renovável, de disponibilidade e acessibilidade abundantes, que proporcionam um menor impacto ambiental do que os tradicionais compósitos reforçados com outro tipo de fibras.

As vantagens das fibras naturais e biocompósitos ocorrem aos mais diversos níveis (Sharma et al, 2007), (Faruk & Sain; 2014), (Real, 2017):

- ambientais: representam recursos renováveis e requerem pouca energia durante a produção;
- biológicos: são produtos orgânicos naturais e não são perigosos para a saúde, pois não acarretam efeitos dérmicos adversos no seu manuseamento e não apresentam perigo biológico quando são descartados;
- tecnológicos: possuem boas propriedades mecânicas (amortecimento e rigidez, por exemplo), são mais leves, conferem um bom isolamento térmico, elétrico (devido à estrutura tubular das fibras, com muitos espaços vazios), têm excelente desempenho a baixas temperaturas, baixo coeficiente de dilatação térmica, versatilidade para formas 2D complexas, são não abrasivos e com grande flexibilidade de processamento;
- econômica: as biofibras são mais baratas do que as fibras sintéticas;
- sociais: têm benefícios para a agricultura porque constituem um rendimento secundário para os agricultores, e também estão disponíveis a uma escala mais global;
- risco: as biofibras são mais seguras, pois são menos propensas a causar acidentes durante a fragmentação e estilhaçamento quando sujeitas a ações mecânicas.

As desvantagens dos biocompósitos estão relacionadas com a sua menor durabilidade em aplicações em ambientes húmidos, e com a sua menor resistência ao fogo (Real, 2017).

Estes materiais são também sensíveis ao ataque microbiano, resultando numa dilatação volumétrica das fibras que causa perda parcial, ou total, das suas propriedades de reforço. Essa dilatação também pode levar ao enfraquecimento da ligação interfacial com a resina e à formação de microfissuras, que aumentam ainda mais o transporte e a absorção de água, tanto no estado líquido como no gasoso (vapor). Além disso, algumas fibras naturais (como o linho, por exemplo) apresentam uma elevada tendência de enrolamento e uma baixa permeabilidade à água (Real, 2017).

As principais desvantagens e limitações dos biocompósitos em aplicações de longa duração são, em resumo, as seguintes (Faruk & Sain; 2014), (Real, 2017):

- baixa estabilidade térmica, resultando em dificuldades para encontrar uma técnica de fabricação adequada;

- fraca resistência à adsorção de humidade devido à natureza hidrofílica das fibras, que compromete as propriedades de adesão na interface entre as fibras e a matriz;
- baixa resistência à radiação e conseqüente degradação fotoquímica quando exposto à radiação UV;
- baixa temperatura de fusão;
- baixa resistência ao fogo e baixa classificação de reação ao fogo;
- decomposição em ambientes alcalinos;
- suscetibilidade ao ataque biológico;
- instabilidade dimensional das fibras devido às tensões residuais induzidas durante o processamento;
- alta variabilidade das propriedades físicas e mecânicas, na medida em estas dependem dos materiais, do ambiente e da tecnologia de processamento.

Todos esses aspetos comprometem as propriedades mecânicas dos biocompósitos, bem como a sua estabilidade dimensional e composição química, limitando o potencial de aplicação dos biocompósitos na área de construção.

Para aumentar a durabilidade e o desempenho dos materiais biocompósitos, é necessário atuar em várias vertentes, como no tratamento e modificação da superfície da fibra, adição de resinas naturais e revestimento dos biocompósitos finais.

7.2 Estatísticas dos biocompósitos no mercado da construção

Embora seja mais frequente encontrar fibras naturais no reforço de compósitos nos anos mais recentes, em vez das habituais fibras de vidro e de carbono, a sua utilização não é nova.

Várias fibras naturais, tais como o bagaço de cana, bambu, madeira, trigo, palha de cereais, azevinho e arroz, caules de girassol, coco, cânhamo, algodão, kenaf, banana, abacaxi e folhas de tabaco, foram amplamente utilizados entre os anos 70 e 90 para a fabricação de painéis (Yatim et al., 2013).

Na Índia, uma variedade de materiais de construção, usando resíduos industriais e agrícolas e integrando cimento e materiais cimentícios como aglutinantes, foi usada para fazer lajes térreas, telhas e revestimentos resistentes às intempéries (Yatim et al., 2013).

O compósito de cimento reforçado com fibra era um dos materiais mais promissores para o uso exterior e interior de edifícios, na forma de cercas, tetos, revestimentos exteriores e interiores, pavimentos, paredes, tijolos, caixilharia, elementos decorativos, para simulação de outros materiais (telhas e ardósia) e placas para diversas aplicações na construção.

Os compósitos de fibrocimento, contendo cimento e madeira, têm sido amplamente usados para substituir produtos antigos de cimento com fibras de amianto (entretanto banido), bem como muitos outros materiais de construção não estruturais, como telas para pavimentos, calçadas, produtos de madeira de cedro, telhas, bases para a aplicação de telhas, elementos arquitetónicos e materiais de substituição de produtos derivados de madeira (Madhuri et al., 2005; Yatim et al., 2003). Esses compósitos apresentam maior resistência ao fogo, à humidade, aos fungos, ao ataque de insetos e,

consequentemente, apresentam uma maior durabilidade do que a madeira convencional. No entanto, alguns desses materiais continuam a ter problemas e exibem degradação por exposição à humidade e a ciclos de secagem e, portanto, requerem manutenção e proteção por meio da aplicação de revestimentos de vernizes ou revestimentos de pintura.

Como exemplo adicional de construção envolvendo misturas de fibras naturais com materiais inorgânicos, pode referir-se a construção monolítica usando cal com fibras de cânhamo, cujo material pode ser reciclado como fertilizante, ou misturas de cânhamo e cal para agregados. Os potenciais benefícios destas soluções incluem uma melhor permeabilidade ao ar e ao vapor, importantes propriedades higroscópicas e baixa condutividade térmica. A cal também protege os componentes do cânhamo ao fogo e aos vermes (evitando a necessidade de tratamentos químicos tóxicos). As fibras naturais também podem ser utilizadas como reforço de painéis de betão prefabricados aplicados para estabilização de taludes e para retenção de solos.

Os biocompósitos reforçados com fibras naturais, como por exemplo os compósitos de madeira-plástico (WPC), são amplamente usados em aplicações exteriores, como substitutos para madeira maciça e produtos à base de madeira, tais como móveis para jardim e piscina, pavimentos, paredes, portas e janelas. Os WPC também são amplamente utilizados como materiais de isolamento acústico, em docas, guardas, *decks* e telhados, tetos falsos, painéis interiores, revestimentos de parede, beirais de telhado e como elementos decorativos em paredes e tetos, bem como para aplicações acústicas especiais, tal como paredes absorventes sonoras (Yatim et al., 2013).

Os sistemas de cofragem perdida à base de biocompósitos, são um desenvolvimento dos sistemas de cofragem perdida de PP, que vieram substituir, com vantagens, os sistemas tradicionais de cofragem em madeira. Estes sistemas são utilizados em diversas aplicações, nomeadamente nas seguintes (Yatim et al., 2013; Cassaforma Muro, 2016):

- Para separar os vãos das vigas das pontes, substituindo o aço, por serem mais leves e porosos, e por terem a capacidade de ser facilmente quebrados em caso de necessidade de inspeção do tabuleiro da ponte pela parte inferior;
- para reforço de betão de paredes sobre-elevadas, vigas invertidas e sapatas de fundação, reduzindo os tempos de construção das fundações;
- para a realização de tanques de dispersão e/ou recolha de água (obras cada vez mais necessárias nos mais diversos contextos construtivos);
- para a realização de balsas nervuradas (estruturas não utilizadas normalmente devido ao trabalho excessivo de cofragem e desmoldagem);
- para a realização simultânea de vigas de fundação e laje;
- para a realização, de uma só vez, da laje superior com aberturas e vigas interiores e periféricas de fundação da estrutura; e
- para qualquer obra que requeira, por diversos motivos, uma cofragem elaborada e geometricamente complexa.

As propriedades desses sistemas, tais como a porosidade (permitindo a evaporação da água através dos elementos e evitando a corrosão das peças metálicas), a resistência mecânica (capaz de suportar

cargas elevadas, sem vigas), o baixo peso e a facilidade de executar elementos modulares, apresentam inúmeras vantagens em relação aos sistemas tradicionais.

Os sistemas de cofragem perdida à base de biocompósitos, para além de permitirem ao projetista alterar os parâmetros geométricos para se adaptarem a todas as situações com grande liberdade arquitetónica, apresentam ainda várias vantagens económicas. De facto, são fáceis e rápidos de montar sem necessidade de mão de obra especializada, permitem a betonagem simultânea da fundação das vigas e da laje (o que permite economia de tempo), dispensam limpeza (pois são perfeitamente lisos e limpos), e permitem economizar em custos de armazenamento e transporte (já que o material é compacto e resistente às intempéries).

Desenvolvimentos recentes em sistema de pavimentos compósitos, constituído por sistemas de cofragem perdida em plástico reforçado e lajes de betão (Koteš & Vičan, 2014; Remy *et al.*, 2011], dotados de maior capacidade de carga, são promissores para o desenvolvimento futuro de soluções semelhantes, substituindo as fibras de vidro por fibras naturais.

Os biocompósitos reforçados com fibras de *rami* são utilizados em painéis balísticos, permitindo atingir um nível II de resistência à penetração balística em compósitos de matriz de poliéster ou nível III em compósitos híbridos de poliéster e Kevlar, ao que corresponde uma absorção de energia de 1362 J a 624 m/s ou de 3185 J a 837 m/s, em painéis com espessura de 15 e 25 mm respetivamente (Faruk & Sain, 2014).

Para além das utilizações acima mencionadas, os biocompósitos encontram-se atualmente em muitas outras aplicações comuns no domínio da construção, nomeadamente em corrimões, revestimentos, pavimentos, vedações, tetos falsos, mobiliário de jardim e de interior (bancos, cadeiras, mesas), numa grande variedade de painéis para portas e perfis de janelas, balcões, lava-louças, produtos e acessórios sanitários, placas onduladas ou nervuradas, telhas, guardas, pequenas construções (bangalôs, etc.), materiais de isolamento acústico com características ecológicas, escadas, docas, suportes para passagem de cabos, pontes pedonais, grelhas de drenagem, telhados energeticamente eficientes e produtos diversos para utilização em casas com características passivas.

Alguns compósitos biodegradáveis, feitos de fibras naturais e resinas plásticas biodegradáveis, são suficientemente estáveis para utilização numa ampla variedade de elementos de construção, pois apenas sofrem degradação em condições anaeróbias.

Quando sujeitos a biodegradação, os compósitos biodegradáveis libertam gás metano que pode ser capturado e queimado para recuperação de energia ou reutilizado para produzir mais biocompósitos.

8 | Uso de plásticos reciclados na construção

8.1 Generalidades

Na indústria da construção, o plástico é usado principalmente em tubos, isolamento térmico e acústico, revestimentos de paredes e pisos, acessórios de interiores, caixilhos de janelas, tábuas de andaimes e cercas. Os plásticos que podem ser mais facilmente reciclados e convertidos em produtos com reutilização do mesmo polímero, são do tipo termoplásticos, designadamente os seguintes: PET, HDPE, LDPE, PP, PVC, PS e ABS.

O plástico recuperado pode ser usado na construção em muitas aplicações, incluindo membranas contra a humidade, tubos de drenagem, dutos, pavimentos, *decks*, embalagens, em aplicações relacionadas com aspetos paisagísticos (passarelas, molhes, pontões, pontes, cercas e sinais), mobiliário urbano (bancos, caixotes de lixo, placas de sinalização e floreiras), contentores e sacos de lixo, sistemas de gestão de tráfego, cintas industriais para embalagem e até como cargas ou fileres para incorporar na constituição de outros materiais (principalmente no caso de plásticos termoendurecíveis, mais dificilmente recicláveis).

O processo de fabricação de produtos de plástico também origina grandes quantidades de resíduos e de refugo), principalmente no arranque de linha de fabrico e no material recusado após controlo da qualidade interno. Este pode ser convertido em granulados e enviado em sacos de para reprocessamento, dando ao fabricante uma opção de descarte, sem custo e ecologicamente correta para o plástico reaproveitado, e para os sacos (também normalmente, fabricados em material reciclado). Um bom exemplo disto é o adotado frequentemente na indústria da tubagem plástica (Figura 8.1).

Mesmo na fase final de vida útil, os plásticos continuam a ser um recurso valioso pelo que não devem ser descartados. Se a Europa conseguisse alcançar as melhores práticas e ter tecnologias de reciclagem e de recuperação de energia eficientes, poder-se-iam reciclar mais 5 milhões de toneladas de plásticos, evitando a emissão de 7 milhões de toneladas por ano de CO₂ (equivalente a retirar 2,4 milhões de viaturas de circulação em estradas) e uma geração adicional de 300 TWh de eletricidade.

De acordo com os regulamentos e normas vigentes, a incorporação de materiais reciclados em tubagem plástica para distribuição de água potável, continua a não ser permitida, devido à possibilidade de contaminação. Também no caso de tubos para aplicações sob pressão, a sua incorporação não é recomendada devido à possibilidade de formação de pontos fracos que facilitem a rotura. Uma forma possível de aplicação de material reciclado em tubo de pressão restringe-se à sua utilização em camadas intermédias de tubos estruturados e multicamada, pois os tubos coextrudidos, contendo uma camada intermédia de matéria reciclada compacta ou espumada, mantêm uma resistência mecânica e uma durabilidade equivalentes à dos tubos convencionais.

Este tipo de solução também se aplica à tubagem para drenagem subterrânea, sem pressão, e à tubagem para esgoto, designadamente os sistemas de tubagem de parede estruturada de PVC não plastificado (PVC-U), de PP ou de PE, cobertos pela norma EN 13476-2.

Aliás, o CEN tem vindo a introduzir alterações ao nível da possibilidade de incorporar plásticos reciclados, em determinados produtos e aplicações, de forma a contribuir para a economia circular.



Figura 8.1 – Resíduos resultantes da fabricação de tubos e acessórios

8.2 Aditivos para plásticos reciclados de construção

Os reciclados plásticos que contenham uma mistura de polímeros e de cargas, apresentam geralmente falta de compatibilidade entre eles e podem causar uma mistura deficiente, e originar superfícies ásperas e propriedades finais pobres. Nestes casos, os agentes de ligação e os compatibilizadores atuam nas interfaces moleculares de superfícies diferentes para melhorar as propriedades e o processamento.

Os aditivos modificadores de viscosidade, lubrificantes e auxiliares de processamento também podem ser eficazes na melhoria das condições de fabrico de produtos a partir de fluxos provenientes de reciclagem. Existem ainda no mercado produtos combinados, específicos para vários polímeros, como por exemplo os projetados para PP reciclado com alto teor de PE, ou os destinados a compostos de poliéster “contaminados” com outras resinas.

Parte do plástico usado para fabrico de compósitos de madeira-plástico (WPC) pode resultar de reciclados pós-consumo (RPC), pelo que, pode ter mau odor em resultado de aminas e/ou componentes voláteis de enxofre formados por reações químicas pós-processamento. Existem aditivos específicos para neutralizar o odor associado a cargas naturais, como lignina e celulose, e ao processamento e reprocessamento de polímeros. Alguns fabricantes de aditivos desenvolveram séries de aditivos na área de redução de odores; existem exemplos de aditivos que resultam da combinação de um lubrificante e de uma máscara de neutralização de odores projetada para produtos específicos, como por exemplo em compósitos de madeira-plástico (PPE, 2019).

Além dos aditivos que visam melhorar o desempenho dos plásticos reciclados, existe também um tipo especial de aditivos para conferir biodegradabilidade aos plásticos, designados por produtos oxodegradáveis.

O uso destes aditivos dá origem a um tipo específico de plástico biodegradável, designado por plástico oxibiodegradável (OBP). Enquanto os plásticos hidro-biodegradáveis (HBP) são feitos de produtos de base biológica, como milho, trigo, cana-de-açúcar, produtos à base de petróleo ou uma mistura dos dois, os OBP são feitos pela adição, a plásticos tradicionais, de uma pequena porção de compostos de ácidos gordos de metais de transição específicos, a plásticos tradicionais. O carbono do OBP é convertido em CO₂ durante um período de tempo mais longo, enquanto o HBP se degrada e se biodegrada mais rapidamente do que o OBP (Rosato, 2016).

O OBP sofre degradação química, por hidrólise e oxidação respetivamente; o OBP degrada-se pela cisão oxidativa da cadeia catalisada por sais metálicos, levando à produção de moléculas de cadeia mais curta; em ambientes contendo oxigénio, os plásticos contendo aditivos de oxodegradação degradam-se e fragmentam-se, sendo que os fragmentos menores e com menor massa molecular são propícios à biodegradação (Rosato, 2016).

Várias organizações, universidades, ambientalistas, especialistas da indústria, fornecedores e empresas de tecnologia envolveram-se numa controvérsia sobre OBP *versus* HBP. A “European Bioplastics Association” emitiu um documento de posicionamento distanciando-se do setor oxibiodegradável, e o Conselho de Bioplásticos da SPI (“Society of the Plastics Industry”), com sede nos EUA, emitiu um documento de posicionamento sobre aditivos oxibiodegradáveis e outros aditivos degradáveis em apoio à European Bioplastics Association. Estas entidades consideram que a utilização de aditivos degradantes não é uma forma sustentável de enfrentar esta questão da gestão de resíduos, pois não está indiscutivelmente provado que os materiais que contêm esses aditivos biodegradáveis se biodegradem realmente em aterros, ou que possam ser reciclados. Dito de outro modo, aditivos degradantes não agregam valor aos resíduos plásticos (Rosato, 2016).

9 | Reciclagem

9.1 Generalidades

A sociedade está cada vez mais focada nas questões ambientais e na reciclabilidade de plásticos, o que se reflete em iniciativas normativas e legislativas.

As empresas com estratégias visando reduzir o impacto ambiental dos seus produtos, também precisam de rever todos os processos que intervêm no desenvolvimento de um produto e encontrar soluções para maximizar a sua reciclabilidade no final de vida útil, de forma a contribuir para a sustentabilidade e para a economia circular.

9.2 Classificação dos processos de reciclagem

O processo de reciclagem primário consiste na reutilização de materiais e produtos noutros que contenham características semelhantes ao produto original, sendo apenas viável com plásticos provenientes de resíduos industriais semilimpas, pelo que este processo não é amplamente utilizado.

O processo secundário, também designado por reciclagem mecânica, consiste no tratamento físico das resinas pós-consumo para efeitos de reprocessamento do material. Este método de reciclagem foi usado com sucesso, durante muito tempo, em resíduos industriais e tecnológicos de classificação única (provenientes de janelas, tubos, embalagens, etc., em fim de vida). Atualmente, este tipo de reciclagem de material continua a ser um método de reciclagem em expansão, oferecendo uma variedade de benefícios. Ao contrário da incineração, as implicações ambientais são mínimas e os custos de investimento são muito mais baixos em comparação com a reciclagem química. A reciclagem mecânica é o método de reciclagem mais frequentemente adotado, uma vez que no método de reciclagem química os resíduos têm de ser submetidos a tratamentos químicos complexos.

O processo terciário, também designado por reciclagem química, envolve a produção de produtos químicos básicos e combustíveis a partir do plástico. Este tipo de processo de reciclagem é cada vez mais aplicado devido à necessidade de adaptação aos elevados níveis de contaminação existentes nos resíduos.

A última forma de reciclagem é o processo quaternário, referida também como reciclagem termoquímica ou incineração, que utiliza a energia proveniente do plástico por meio de queima (recuperação de energia). Esse processo é comum e amplamente utilizado na reciclagem, devido ao elevado teor de energia calorífica da maioria dos plásticos. A maioria dos incineradores pode atingir temperaturas da ordem dos 900 a 1000 °C. Atualmente a maior preocupação com este processo é a diminuição da quantidade de poluentes atmosféricos que são libertados

O contributo mais benéfico deste processo consiste na redução em massa (em 80%) e em volume (em 90%) dos resíduos através do processo de aquecimento a alta temperatura. No entanto, alguns plásticos são menos adequados para recuperação de energia, como por exemplo os plásticos

halogenados, porque podem formar, em resultado da incineração, dioxinas altamente tóxicas. Esses efeitos colaterais negativos para o meio ambiente e para a saúde, associados à emissão de gases tóxicos, podem ser, pelo menos, parcialmente eliminados pela aplicação de catalisadores que permitam oxidar gases nocivos *in situ*.

Os materiais que sobram desse processo são então colocados em aterros. A deposição em aterro não é um processo de reciclagem e deve ser a última solução a ser adotada.

Recentemente, foi publicado em Portugal o Decreto-Lei n.º 102-D/2020 (DL 102, 2020), que aprova o regime geral da gestão de resíduos, bem como o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro e que altera o regime da gestão de fluxos específicos de resíduos, transpondo as Diretivas (UE) 2018/849, 2018/850, 2018/851 e 2018/852. No Artigo 51.º (triagem e fragmentação de resíduos de construção e demolição (RCD)), refere que os materiais que não sejam passíveis de reutilização e que constituam RCD são obrigatoriamente objeto de triagem na obra com vista ao seu encaminhamento, por fluxos e fileiras de materiais, para reciclagem ou outras formas de valorização, devendo ser assegurada a triagem dos RCD, pelo menos, para vários materiais, incluindo plástico. Além disso, os resíduos contendo plástico não podem ser admitidos num aterro para resíduos inertes, exceto em quantidades vestigiais.

9.3 Princípios em cascata para reciclagem

A reciclagem do plástico pode ser vista como uma cascata com diversos níveis de qualidade (Plastic Zero, 2013a). É possível usar plásticos reciclados várias vezes dependendo do tipo de polímero. No entanto, a contaminação e a quebra e reticulação de estruturas poliméricas tornar-se-ão fatores limitativos para o prolongamento dos ciclos.

O sistema de reciclagem cobre toda a gama de resíduos plásticos, desde polímeros puros, de elevado valor acrescentado, até qualidades mistas, de baixo valor, uma vez que não é possível separar todos os resíduos plásticos em grau de qualidade “puro”.

Existem muitas qualidades de reciclados no mercado. Esta razão principal é que algumas fontes são capazes de fornecer resíduos plásticos mais puros e homogêneos do que outras, e resíduos industriais de polímero único *versus* resíduos domésticos de embalagem misturados.

Portanto, é necessário que a reciclagem seja tratada como um processo em cascata, onde os plásticos de alta qualidade podem ser, eventualmente, classificados em qualidades inferiores.

Os custos da triagem de resíduos chegarão a um ponto de equilíbrio, no qual deixa de ser economicamente viável melhorar a qualidade por meio de triagem posterior, mas esse ponto é difícil de identificar porque irá variar de acordo com a regulamentação de cada País e com a implementação do tratamento de resíduos plásticos, bem como com a flutuação dos preços das matérias-primas. Isso poderia ser ultrapassado mediante regulamentação que impusesse uma tributação para utilização de aterros sanitários ou para incineração de resíduos, e se fosse implementado um esquema de responsabilidade do produtor e eventualmente de financiamento para essas situações, entre outras possíveis medidas. Além disso, as metas de reciclagem politicamente determinadas estabelecem, para

a gestão de resíduos, metas quantitativas em vez de qualitativas. Sem haver metas claras para a qualidade da reciclagem, parece haver falta de incentivos para aumentar a qualidade da reciclagem de plástico e evitar a reciclagem de ciclo inferior, correntemente designada por “downcycling” (Plastic Zero, 2013a).

Quando os plásticos são aglomerados e usados como materiais de construção ou similares, normalmente serão incinerados após utilização (Plastic Zero, 2013a).

9.4 Cadeia de valor para resíduos de plástico

De um ponto de vista sistemático, a cadeia de valor da reciclagem de plástico pode ser dividida nas seguintes operações gerais:

- abastecimento em grande quantidade de plástico usado;
- recolha de plásticos usados;
- triagem e separação dos plásticos recolhidos;
- reprocessamento (produção de matéria-prima secundária);
- fabricação de novos produtos.

As diferentes etapas da cadeia de valor são afetadas em função das restantes. As características (composição, tipo e qualidade) do plástico recolhido afetarão a seleção da tecnologia de classificação, que novamente afetará a qualidade do fluxo à saída e, conseqüentemente, o tipo de aplicações em que o plástico secundário pode ser usado (Plastic Zero, 2012).

Os resíduos recolhidos podem ser resíduos pré-consumo (resíduos industriais, provenientes do fabrico de produtos) ou resíduos pós-consumo (resíduos resultantes da utilização de produtos plásticos no mercado consumidor). As etapas seguintes no processamento dos resíduos dependerão, em grande parte, da origem e composição dos mesmos. Frequentemente, os resíduos pré-consumo terão sido submetidos a uma recolha de mono material (não misturado) e terão baixos níveis de impurezas, enquanto os resíduos pós-consumo geralmente precisam de tratamento mais intensivo.

Devido à alta qualidade dos resíduos plásticos pré-consumo, é muitas vezes economicamente viável reciclar esses fluxos de resíduos internamente, na instalação de produção, ou por meio de canais externos.

9.5 Recolha

A recolha é o primeiro patamar da cadeia de valor, pois pode desde logo contribuir para definir os limites para o cumprimento dos requisitos de qualidade dos compradores, uma vez que a qualidade variável do material de entrada constitui uma barreira para a procura de plásticos reciclados.

O estabelecimento de circuitos de material fechados requer geralmente um sistema de recolha separado para evitar a mistura dos produtos alvo com outros produtos.

No caso de garrafas de vidro, é possível separar as garrafas de uma mistura de fluxos de resíduos, porque são relativamente fáceis de reconhecer e são encontradas em grandes quantidades. Há também outra forma comum de recolher garrafas, através de sistemas de depósito e retorno.

Porém, nem sempre é fácil garantir um bom nível de separação em outros tipos de produtos, incluindo mesmo as embalagens de plástico.

O risco de misturar cores e tipos de polímeros e/ou contaminar o plástico com materiais não direcionados na fase de recolha, aumenta com a diversidade dos resíduos misturados, conduzindo à necessidade de uma classificação posterior mais rigorosa.

É do interesse dos recicladores estimular e promover a triagem na origem, pois aumenta o valor do plástico residual e reduz o custo do reprocessamento. Para tornar eficiente a separação na origem, é importante fornecer continuamente aos cidadãos informações sobre como separar o material plástico para reciclagem. Esta é uma barreira importante para uma reciclagem mais aprimorada (Plastic Zero, 2012).

Tendo em conta a enorme gama de aplicações dos plásticos e o nível de procura de materiais plásticos e compósitos para utilização na construção, esta área pode considerar-se potencialmente grande e promissora para a utilização de reciclados. Embora a separação em obras de construção de produtos de plástico, por tipo de produto e tipo de material plástico ou compósito não seja difícil (Figura 9.1), os esquemas de recolha necessários para os plásticos de resíduos volumosos e resíduos de construção e demolição, nem sempre podem ser estabelecidos, o que é um obstáculo para múltiplos ciclos de reciclagem.



Figura 9.1 – Paletes de tubos de PE e PVC-U classificados (Whittle & Pesudovs, 2007)

9.6 Separação e triagem

9.6.1 Generalidades

A triagem faz parte de uma cadeia de valor da reciclagem de resíduos plásticos, vista na perspetiva de um sistema de gestão de resíduos.

A triagem refere-se às atividades que ocorrem na estação de tratamento e inclui muitos tipos diferentes de tecnologias para separação de materiais, bem como descontaminação de polímeros e produção de matéria-prima.

Embora no caso de materiais de construção não se apliquem geralmente os métodos de separação aplicados a outros resíduos, é relevante referir estes métodos, na medida que alguns destes resíduos podem posteriormente vir a ser utilizados para a produção de materiais de construção.

Um processo de separação e de classificação típico compreende várias etapas de classificação, pelas quais diferentes tipos de materiais são removidos do fluxo primário de resíduos mistos. O processo de classificação inclui frequentemente os seguintes subprocessos (Plastic Zero, 2012; Plastic Zero, 2013b):

- triagem inicial;
- triagem manual para remoção de filmes, papelão e artigos volumosos;
- redução de dimensões por trituração ou corte;
- separação dimensional, recorrendo a esteiras, classificadores de ar e separadores balísticos para remoção de peças pequenas/leves/bidimensionais, como filme e papel, e para remoção de peças pesadas, como vidro e pedras;
- separador magnético para remoção de metais ferrosos;
- separador de corrente parasita para remoção de alumínio;
- separação ótica de materiais para isolar artigos bidimensionais (como papel e papelão) de artigos tridimensionais (como recipientes e embalagens);
- separação manual para triagem de polímeros;
- redução de dimensão dos resíduos de plástico por granulação, para fragmentos com dimensões entre 10 e 40 mm por exemplo, antes dos processos de limpeza e separação;
- limpeza do plástico por lavagem e secagem a seco, para remover a sujidade da superfície e as etiquetas de papel. A cola pode ser removida com água quente e soda cáustica. Na lavagem a seco, os contaminantes são removidos por fricção ao girar as partículas a alta velocidade;
- classificação ótica de polímeros por tipo e cor;
- separação por densidade e por tipo de polímero;
- pós-triagem;
- purificação de plástico de qualidade alimentar;
- extrusão para produção de granulados (*pellets*);
- controlo de qualidade mediante ensaios de laboratório;
- embalagem do reciclado, a granel ou enfardado.

A maioria das instalações europeias de separação e classificação utilizam uma combinação das tecnologias acima mencionadas para garantir uma classificação económica e eficiente do material de entrada, com qualidade satisfatória à saída. A composição exata das tecnologias usadas deve ser ajustada de acordo com o material de entrada e também com a qualidade exigida para o material de saída.

9.6.2 Separação dimensional

O equipamento de separação dimensional divide os resíduos recicláveis que são alimentados no fluxo, de acordo com a dimensão individual do resíduo. Os equipamentos tipicamente usados para isso são separadores tubulares cilíndricos rotativos, ou separadores vibratórios (Plastic Zero, 2013b).

Os materiais alimentados à entrada do equipamento de separação dimensional são geralmente constituídos por resíduos misturados, como por exemplo resíduos de embalagens recicláveis misturados. O equipamento de separação dimensional constitui normalmente a primeira classificação primária, e pode ocorrer ou não após trituração.

Normalmente, o separador divide os resíduos em três frações:

- Dimensão pequena: <50 mm
- Dimensão média: 50 a 300 mm
- Dimensão grande: > 300 mm

Os plásticos aparecem normalmente nas frações de dimensão média e grande. Os resíduos 2D e 3D de dimensão média, normalmente serão classificados posteriormente num separador balístico e, eventualmente, também num classificador por fluxo de ar (ver secção 9.6.3.4). A fração de dimensão grande passa normalmente para uma cabine de classificação manual, para seleção dos filmes plásticos 2D de grande dimensão (Plastic Zero, 2013b).

9.6.3 Separação por densidade

9.6.3.1 *Generalidades*

Como, na generalidade, os polímeros têm densidades diferentes (ou gamas de densidades diferentes), o plástico pode ser separado por imersão num meio fluido. Os contaminantes, constituídos por outros materiais presentes no fluxo de plástico, também podem ser removidos (Plastic Zero, 2012).

No passado, antes do aparecimento do método NIR (secção 9.6.5.1), esta tecnologia era mais usada para separar PVC e PP com enchimento, do fluxo de resíduos plásticos. Porém, esta tecnologia tem vindo a ser substituída por tecnologias de separação ótica, não sendo já muito comum na Europa. No entanto, no Reino Unido ainda existe uma instalação (MBA Polymers UK) que possui um processo de separação em larga escala baseado nesta tecnologia de separação por densidade.

A utilização mais adequada para esta tecnologia consiste na separação dos materiais da fração intermediária proveniente de equipamentos de separação dimensional (Plastic Zero, 2013b), e/ou para melhorar o desempenho do equipamento subsequente de classificação por infravermelho próximo.

O método de separação por densidade pode ser efetuado com uma variedade de tecnologias diferentes, as quais são descritas a seguir.

9.6.3.2 Método de flutuação

O método de flutuação e afundamento consiste na classificação por densidade usando um meio fluido, o qual permite a separação, até um grau de pureza de 98%, de diferentes materiais plásticos num fluxo de plásticos mistos (Plastic Zero, 2013b).

Esta tecnologia também pode ser usada para separar o plástico de materiais mais pesados.

A separação de poliolefinas (PE e PP) de outros polímeros, por flutuação, pode ser muito eficiente (90 a 94%), sendo mais difícil produzir produtos de alta pureza de tipos específicos de polímeros com densidades semelhantes, tal como por exemplo o PS e PET (WRAP, 2008).

As frações de plástico separadas com 90% a 95% do polímero alvo, são posteriormente refinadas para um grau de pureza de 99 a 100% antes de serem reprocessadas.

9.6.3.3 Hidrociclones

O uso de hidrociclones permite a separação por densidade com base na força centrípeta de resistência ao fluido criada por um redemoinho (Plastic Zero, 2013b). Os resíduos serão alimentados para o hidrociclone na forma de uma suspensão aquosa. As frações mais leves serão transportadas para cima, enquanto as partículas mais densas terminarão no fundo do ciclone.

A redução dimensional é geralmente feita antes do tratamento em hidrociclones.

9.6.3.4 Classificador por fluxo de ar

Por este método, a separação é realizada de acordo com a variação da "velocidade de queda dos materiais" num fluxo de ar. O objetivo é separar as partes leves e pesadas do fluxo de resíduos. Existem diferentes tipos de classificadores de ar que se podem usar em instalações de separação de resíduos. O classificador por ar é especialmente adequado para a separação de plásticos 2D de materiais mais pesados (plásticos 3D e outros materiais/impurezas).

9.6.3.5 Separador balístico

Um separador balístico é constituído por uma plataforma vibratória perfurada. Uma pequena inclinação no tabuleiro faz com que os materiais pesados caiam para o nível mais baixo do tabuleiro, enquanto os materiais mais leves, como folhas de plástico, mantêm-se no lado de cima. Os materiais finos caem pelo fundo perfurado. A classificação faz-se de forma automática de acordo com a dimensão, densidade e rigidez, resultando em três frações:

- Fração leve (partes não pesadas e planas, com formato 2D).
- Fração pesada (partes não leves e com formato 3D).
- Fração fina (por exemplo, com dimensão inferior a 20 mm).

Por meio da alteração da inclinação do tabuleiro de separação, o desempenho do separador pode ser ajustado.

Considerando a separação de plástico, este equipamento de separação é aplicado para separar os materiais plásticos 2D e 3D, bem como para separar os principais materiais não plásticos. No separador balístico 2D, o plástico aparecerá na fração leve (junto com outros materiais leves de forma 2D, tal como papéis, cartão e têxteis). Essa fração leve precisará de mais uma ou duas etapas de separação para separar o plástico do papel e cartão, o que se pode fazer recorrendo a um classificador por fluxo de ar.

Os materiais plásticos 3D aparecerão na fração 3D mais pesada, juntamente com outros materiais pesados de forma 3D (madeira, couro, vidro, metais). Essa fração pesada precisará de mais uma ou duas etapas de classificação para separar o plástico. O metal pode ser separado com recurso a um equipamento de classificação de metal.

9.6.4 Separação de metais por ação magnética ou por correntes parasitas

Esta tecnologia, que pode recorrer a separadores eletromagnéticos e a separadores magnéticos permanentes, é aplicada para separar materiais ferromagnéticos e metais não ferrosos (por exemplo, alumínio).

O íman é capaz de separar peças ferromagnéticas de outros materiais não ferromagnéticos, mas não permite separação de aço inoxidável, e de outros metais. O equipamento é instalado paralelamente ou perpendicularmente à esteira de alimentação.

O separador de corrente parasita¹ é aplicado para separar metais não ferromagnéticos, como alumínio, cobre, magnésio e prata, não sendo eficaz para separar zinco, latão e estanho, bem como aços ligados. Permite separar as partes não metálicas e metais não ferrosos dos metais ferrosos, (Plastic Zero, 2013b).

9.6.5 Separação ótica

Esta tecnologia engloba as seguintes variantes (Plastic Zero, 2013b):

- espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS);
- colorimetria;
- fluorescência de raios-X (XRF).

¹ Corrente elétrica localizada, induzida num condutor por um campo magnético variável.

Os equipamentos dotados de sensor ótico permitem separar materiais como papel, cartão, madeira, vidro, componentes elétricos e eletrônicos, minerais e materiais plásticos (como PET, HDPE e LDPE, PP, PVC, EPS, HIPS e ABS), bem como por diferentes cores.

Os elementos de cor negra não podem normalmente ser separados devido à sua falta de capacidade refletora.

9.6.5.1 *Espectroscopia de infravermelho próximo*

Como os métodos físico-macroscópicos, nomeadamente os que recorrem a medições de densidade, não são suficientes para separar eficientemente os vários tipos de plásticos, a identificação tem sido feita com métodos de monitorização de propriedades estruturais ou moleculares dos polímeros constituintes, designadamente recorrendo a uma técnica originalmente desenvolvida pelo “Fraunhofer Institute for Chemical Technology”, baseada em espectroscopia de infravermelho próximo.

Nesta tecnologia, o plástico é classificado por tipos de polímeros e cores por meio de tecnologias de classificação ótica baseadas em câmaras NIR. As câmaras são ajustadas para detetar certas propriedades, como tipos de materiais, tipos de polímeros ou cores. Os sensores de infravermelho identificam os materiais através do seu comprimento de onda específico, os quais são posteriormente separados em diferentes compartimentos mediante ação de jatos de ar, pelo que, também, qualquer pedaço de material não identificado é assim ejetado da correia transportadora (Plastic Zero, 2012).

A faixa espectral do NIRS é de 700 a 2.500 nm, o que permite a identificação das bandas espectrais das ligações atómicas C-H, O-H, N-H e C-O (Figura 9.2), permitindo detetar 1.000 espectros e identificar 20 peças/s durante a reciclagem mecânica de plásticos (Lofty, 2015).

Este sistema pode ser otimizado com o uso de um detetor de uma matriz de plano focal (FPA), para medições remotas e *online* numa escala macroscópica.

Esta tecnologia é normalmente aplicada para a separação de:

- polímeros, por tipo, em fluxos de plásticos mistos, incluindo bioplástico à base de PLA;
- madeira e têxteis;
- papel, cartão e embalagens;
- PVC em fluxos de resíduos indefinidos.

O programa “Wrap Recycling Action Program” (WRAP) conduziu testes de tecnologia NIR para separar embalagens plásticas misturadas (WRAP, 2008). Os resultados dos testes mostram uma pureza de 87% para o poliestireno, 93-96% para outros tipos de plástico (PVC, PE, PP, PET) e 97% para o bioplástico PLA.

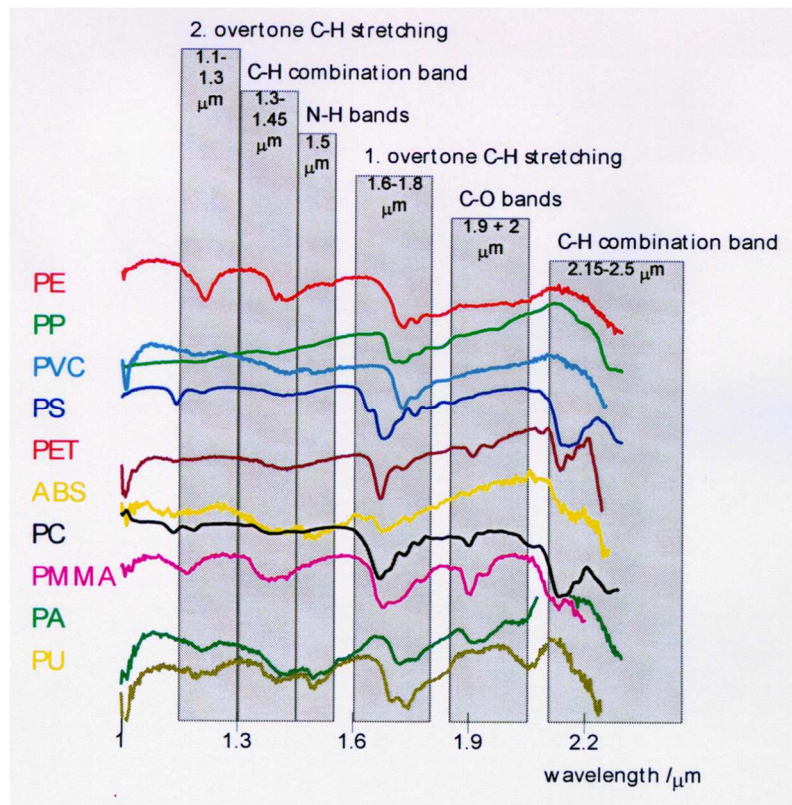


Figura 9.2 – Registos espectrais obtidos pela tecnologia NIRS, para diferentes polímeros (Lofty, 2015)

É também possível classificar um polímero de uma única cor, com aproximadamente 90% de pureza (mas isso exigirá várias unidades óticas para cada polímero ou fluxo de recirculação).

Porém, a tecnologia de classificação NIR têm algumas limitações. Os principais pontos fracos são (WRAP, 2008; Lofty, 2015):

- quando os artigos contêm mais de um tipo de material ou plástico (por exemplo, etiqueta, produtos laminados), podem não ser reconhecidos corretamente pelo sensor NIR;
- as cargas, os plastificantes, os corantes/pigmentos e outros aditivos influenciam a forma dos espectros de materiais plásticos. Assim, por exemplo, o negro de fumo absorve toda a luz e mesmo pequenas quantidades ($> 0,1\%$) reduzem a reflexão ou transmissão da luz NIR a níveis que não são suficientes para a identificação. Portanto, as peças de cor negra não são identificadas, pelo que ficarão subsequentemente no fluxo residual;
- quando o artigo está dentro de outro, esse não é identificado;
- os objetos sujos não são reconhecidos se a luz não puder ser refletida.

9.6.5.2 Câmaras colorimétricas

Esta tecnologia baseia-se na classificação ótica automática mediante o recurso a câmaras para identificar a cor dos materiais (no espectro visível) por meio de reconhecimento fotográfico. Os materiais são posteriormente distribuídos por diferentes compartimentos mediante ação de jatos de ar. Embora

menos usada do que a tecnologia NIRS, os custos de ambas as tecnologias são semelhantes, pelo que se espera que a sua utilização aumente no futuro para melhorar a eficiência da separação, bem como a qualidade dos materiais separados (Plastic Zero, 2013b).

O equipamento de colorimetria em linha inclui:

- um alimentador de vibração;
- uma câmara;
- uma fonte de luz;
- uma unidade de rejeição com ar pressurizado.

A câmara colorimétrica em linha é normalmente aplicada para separação de diferentes cores de produtos de plástico (por exemplo garrafas, filmes), resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos, vidro e minerais.

A câmara colorimétrica em linha também é capaz de separar os resíduos de papel (revistas, jornais, embalagens de cartão, etc.), determinar o teor de chumbo no vidro, separar tampas de garrafas (câmara 3D) e separar plástico de cor negra.

9.6.5.3 Fluorescência de raios-X

Esta tecnologia consiste na separação baseada num sensor automático de fótons de raios-X, os quais, ao colidirem com um material alvo, originam movimentos de elétrons, de que resulta a emissão subsequente de espectros de raios-X (XRF), os quais permitem reconhecer e distinguir diferentes materiais.

A separação de fluorescência de raios-X é aplicada para separação de diferentes metais não ferrosos (cobre, latão, aço inoxidável, alumínio, zinco), resíduos de equipamentos eletrônicos (placas de circuito impresso) e minerais.

Atualmente, a separação por fluorescência de raios X não é amplamente utilizada na separação de resíduos mistos de plásticos, porque esta tecnologia não é capaz de fazer a distinção entre polímeros.

9.6.5.4 Separação manual

O uso de equipamentos de separação por infravermelho e de outros tipos de equipamentos de separação baseados em sensores substituíram, ao longo do tempo, grande parte do trabalho de separação manual. Porém, a separação manual de materiais recicláveis separados mecanicamente ou opticamente é, no entanto, ainda amplamente utilizada em diferentes aplicações, para garantir pureza suficiente (entre 96 e 99%, dependendo do tipo de material).

As aplicações típicas são designadas por classificação positiva ou negativa (Plastic Zero, 2013b):

- como classificação positiva, para separação de objetos grandes, como filmes plásticos 2D, de outros plásticos mistos recicláveis. Esta aplicação surge como uma das primeiras operações numa instalação de triagem central ou para separação na fração de dimensão maior após passagem no separador tubular cilíndrico;

- como classificação negativa, para remover materiais não direcionados de fluxos de resíduos de origem única. Os materiais não direcionados podem ser impurezas ou tipos de resíduos de embalagens não certificados (em sistemas de responsabilidade do produtor). Essa ação também pode ser chamada de controlo de qualidade dos materiais de saída com o objetivo de obter a pureza suficiente para um dado fim.

A capacidade de classificação manual depende muito do objetivo real (classificação positiva ou negativa) e da exatidão da classificação, bem como do tipo de material a ser separado. Por exemplo, uma pessoa tem menor rendimento (em kg/h) a separar artigos de plástico mais pequenos do que maiores e mais pesados.

Neste tipo de separação, as questões de saúde e segurança ocupacional são importantes. As medidas de mitigação para saúde e segurança ocupacional aceitáveis incluem amplamente as seguintes intervenções:

- ventilação eficaz dos locais de trabalho;
- uso de luvas de proteção, máscaras etc.;
- intervalos frequentes de atividades de separação manual;
- troca de local de trabalho;
- verificação médica frequente.

9.7 Qualidade dos reciclados

9.7.1 Generalidades

As opções de utilização do plástico reciclado dependem da qualidade e homogeneidade do polímero, porque as propriedades dos materiais são as principais preocupações do mercado. Uma fonte limpa e livre de contaminantes, de um único polímero proveniente de resíduos plásticos reciclados, tem mais opções de uso final e maior valor do que uma fonte mista ou contaminada de resíduos plásticos (Plastic Zero, 2012).

Um objetivo importante da indústria de reciclagem é geralmente manter, para um material plástico reciclado, a mesma aplicação daquela que tinha, pois desta forma é mais fácil aproveitar as propriedades do polímero e os seus aditivos e, conseqüentemente, respeitar os requisitos legais desses produtos.

No entanto, não é fácil obter fluxos homogêneos de resíduos plásticos. Embora os sistemas de plásticos mistos sejam mais baratos, a separação dos diferentes polímeros depende das tecnologias aplicáveis, que ainda não são perfeitas, embora estejam em constante evolução (Plastic Zero, 2012).

Os materiais plásticos rígidos de cor negra, continuam a ser um desafio para identificar e classificar positivamente, pois os corantes de negro de fumo evitam que o plástico seja detetado por um equipamento de seleção ótica. Em consequência disso, o plástico negro acaba frequentemente no fluxo residual dos materiais rejeitados (WRAP 2012).

Alguns polímeros também têm facilidade em, indesejavelmente, se misturar, como por exemplo, acontece entre o PVC e o PET (contaminação cruzada).

O foco para a classificação dos reciclados está na fase entre o pré-tratamento (recolha e separação) e o reprocessamento.

Assim, na etapa de recolha e classificação, é importante obter um fluxo puro de um ou dois polímeros para reciclagem. A classificação da qualidade do reciclado é função do tipo de polímero, da cor, do grau de transparência e da pureza.

A classificação ineficiente faz com que o material plástico misturado não seja reciclado, ou seja reciclado em ciclo descendente. Além disso, os resíduos de plástico devem estar limpos. Os materiais não plásticos devem ser removidos. A contaminação com alimentos e outras substâncias deve ser eliminada.

9.7.2 Avaliação da qualidade. Normalização

Existem dois grupos principais de especificações técnicas e normas que podem ser aplicados para resíduos de plástico para reciclagem.

A primeira categoria trata da fase entre a recolha e o reprocessamento de resíduos plásticos. A segunda categoria de normas é dirigida principalmente para plásticos reciclados e produtos finais, e caracterizam o material plástico no estágio de matéria-prima secundária, por exemplo para regranulados e “*pellets*”, após o reprocessamento (Plastic Zero, 2012).

O Quadro 9.1 apresenta uma lista de documentos normativos mais usados na Europa para a avaliação da qualidade de plásticos reciclados².

A norma EN 15347, pertencente à primeira categoria de normas atrás referida, visa "a caracterização de resíduos de plásticos, estabelecendo as especificações sobre resíduos plásticos, ou seja, material de entrada para reprocessamento e para alguns tipos de conversão, e as especificações para resíduos intermédios à base de plástico (por exemplo, regranulados), que são materiais de saída do reprocessamento, e que são usados como entrada para a fabricação de produtos finais (Quadro 9.2).

As normas EN para reciclados específicos, indicadas no Quadro 9.1, definem os requisitos de qualidade para um reciclado específico (que podem ser obrigatórios ou opcionais), bem como os procedimentos de ensaio relevantes.

Na prática, os requisitos mais específicos podem ser acordados, pois normalmente as especificações do comprador envolvem requisitos de qualidade mais exigentes, e a responsabilidade de ensaio é geralmente do reprocessador. A fiabilidade do laboratório do fabricante é frequentemente sustentada,

² É de destacar o facto de haver já em desenvolvimento, uma futura norma, estabelecendo os requisitos de qualidade para aplicação de reciclados de plástico em produtos de diversos polímeros, subdividida em partes (1: Geral; 2 – PE; 3 – PP; 4 – PVC; 5 – PET; 6 – PS; 7 – PA; 8 – ABS; 9 – PC).

em certificado de qualidade fornecido por uma organização externa que certifica e conduz auditorias externas.

Quadro 9.1 – Documentos normativos mais usadas na Europa para reciclados

Documento normativo	Título
EN 13430:2004	Packaging - Requirements for packaging recoverable by material recycling
CEN/TR 13688:2008	Packaging - Material recycling - Report on requirements for substances and materials to prevent a sustained impediment to recycling
CEN/TS 14541:2013	Plastics pipes and fittings - Characteristics for utilisation of non-virgin PVC-U, PP and PE materials
EN 15342:2007	Plastics. Recycled plastics. Characterization of polystyrene (PS) recyclates
EN 15343:2007	Plastics. Recycled plastics. Plastics recycling traceability and assessment of conformity and recycled content
EN 15344:2007	Plastics. Recycled plastics. Characterization of polyethylene (PE) recyclates
EN 15345:2007	Plastics. Recycled plastics. Characterization of polypropylene (PP) recyclates
EN 15346:2007	Plastics. Recycled plastics. Characterization of poly(vinyl chloride) (PVC) recyclates
EN 15347:2007	Plastics. Recycled Plastics. Characterization of plastics waste
EN 15348:2014	Plastics. Recycled plastics. Characterization of poly(ethylene terephthalate) (PET) recyclates
CEN/ TR 15353:2007	Guidelines for the development of standards relating to recycled plastics
EN 13430:2004	Packaging. Requirements for packaging recoverable by material recycling
EN 13437:2003	Packaging and material recycling. Criteria for recycling methods. Description of recycling processes and flow chart
EN ISO 16103:2005	Packaging. Transport packages for dangerous goods. Recycled plastics material
ISO 15270:2008	Plastics - Guidelines for recovery and recycling of waste plastic
ISO/TR 23891:2020	Plastics. Recycling and recovery — necessity of standards
ISO 17088:2021	Plastics. Organic recycling — specifications for compostable plastics

Quadro 9.2 – Requisitos de qualidade previstos na norma EN ISO 15347

Propriedade	Método de ensaio
Tamanho do lote	Requerido (peso ou volume)
Cor	Obrigatório (avaliação visual)
Forma do reciclado	Necessário (por exemplo, flocos, filme ou garrafa)
História do reciclado	Obrigatório (EN 15343)
Polímero principal presente	Obrigatório (percentagem em peso, se conhecido)
Outros polímeros presentes	Obrigatório (percentagem em peso, se conhecido)
Tipo de embalagem do reciclado	Requerido
Resistência ao impacto Charpy ou Izod	Opcional (EN ISO 179-1 e EN 179-2 ou EN ISO 180)
Índice de fluidez	Opcional (EN ISO 1133)
Temperatura de amolecimento Vicat	Opcional (EN ISO 306, método A)
Aditivos, contaminantes, teor de água	Opcional
Conteúdo em cinzas	Opcional (EN ISO 3451-1)
Humidade	Opcional (EN 12099)
Tensão e alongamento de rotura em tração	Opcional (EN ISO 527, partes 1 a 3)
Teor de voláteis	Opcional (perda de peso a uma dada temperatura de processamento)

Ainda neste tópico, é importante destacar que o CEN (“European Committee for Standardization”) e o Comitê Técnico (CT) 350 do CENELEC (“European Committee for Electrotechnical Standardization”), responsáveis pela normalização relativa à sustentabilidade das obras de construção, criaram recentemente um novo subcomitê designado “Economia circular em construção”, cujo programa de trabalho inclui uma estratégia de digitalização consistente, com base científica e confiável, e que deverá introduzir alterações às normas já desenvolvidas pelo CT 350.

O novo subcomitê terá ainda a tarefa de combinar a orientação desenvolvida pelo Comitê técnico 323 da ISO (“International Organization for Standardization”) com aquela fornecida pelos Comitês Técnicos

do CEN (CT 351, que trata de substâncias perigosas, e os diversos comitês do CEN encarregados da normalização de produtos de construção), também tomando como referência a estratégia de economia circular da Comissão Europeia.

9.7.3 Destino dos materiais rejeitados

A quantidade e a qualidade de materiais rejeitados em instalações de separação e triagem de reciclados, equipadas com equipamentos de classificação automatizados altamente avançados, dependem, entre outros, dos seguintes fatores (Plastic Zero, 2013b):

- qualidade de entrada;
- critérios e especificação para os materiais de saída;
- conceção técnica da instalação de triagem;
- mercado para os produtos (materiais recicláveis e outras frações).

Existe pouca informação disponível sobre a quantidade e a qualidade dos materiais rejeitados, e a que existe deve ser vista num contexto local, pois cada país tem as suas próprias metodologias. Há países que apenas separam resíduos certificados, sendo o restante incinerados ou depositados em aterro, e outros em que a reciclagem real depende mais da situação e opções do mercado.

9.8 Reprocessamento

O reprocessamento consiste na produção de reciclados na forma de grânulos, pós moídos, pedaços, aglomerados³ e compostos⁴, a partir de uma entrada de resíduos de plástico. No entanto, o processo também pode ser estendido e envolver a extrusão de perfis ou, mais simplesmente, a peletização do plástico à saída. Os grânulos (“pellets”) são vendidos como um produto final, para uso como matéria-prima, em uma nova produção.

O reprocessamento do material plástico (triagem fina e produção de matéria-prima secundária) ocorre geralmente após a triagem inicial e a separação de resíduos mistos a partir de fluxos de plástico ou diretamente em resíduos plásticos industriais⁵.

Para produtos de plástico de alta qualidade, a entrada para a produção de matéria-prima secundária é frequentemente constituída por plástico de um único material (por exemplo, PET ou PP), com nenhuma

³ Produto resultante do processamento de plásticos ou filmes mistos. A aglomeração visa aumentar a densidade aparente dos resíduos plásticos, unindo pedaços por aquecimento, a uma temperatura ligeiramente inferior ao seu do ponto de fusão. A qualidade é definida em função do teor de cloro, água e cinzas, bem como da densidade aparente e tamanho do grão.

⁴ Material de alta qualidade feito sob medida, a partir de granulados, sendo as propriedades do material de base quimicamente modificadas com diferentes aditivos e modificadores.

⁵ Os resíduos plásticos industriais são maioritariamente constituídos pelas sobras da produção de produtos plásticos em fábrica, quer durante a operação de arranque do processamento, quer do material rejeitado por incumprimento de requisitos de qualidade, ou de lotes armazenados no exterior para além do tempo razoavelmente aceitável.

ou pouca quantidade de contaminantes e materiais plásticos indesejáveis. Para produtos plásticos de qualidade inferior, a tolerância com relação a impurezas é maior.

É importante notar que, embora divididos, usando a abordagem sistemática adotada no presente documento, os processos de classificação e de separação também podem ocorrer durante o reprocessamento. Podem ser aplicados os seguintes tipos de processos numa instalação de reprocessamento típica (Plastic Zero, 2013b):

- abertura de fardos;
- separação e classificação fina adicional (mediante utilização de equipamentos referidos na secção 9.6);
- lavagem (secção 9.6);
- microfiltração de extração com água (para remover cola, por exemplo);
- redução de tamanho do plástico, por corte, usando um triturador (para obtenção de pedaços de menor dimensão, por exemplo com cerca de 12 mm de comprimento);
- reator a vácuo para purificar contaminantes orgânicos;
- extrusão (para produção de fios de plástico);
- triagem após ou durante o processo de extrusão (de forma a remover qualquer impureza sólida);
- peletização (corte dos fios extrudidos ainda quentes, para formar “pellets”, seguido de arrefecimento em água).

9.9 Fabrico de produtos finais

Os produtos plásticos podem ser fabricados usando como material de entrada o polímero virgem, feito de petróleo bruto, ou matérias-primas secundárias recuperadas de resíduos plásticos. A entrada é normalmente na forma de “pellets”, grânulos (de dimensão variável, incluindo pós) ou perfis, dependendo do tipo de produto produzido (Plastic Zero, 2013b).

O uso de matérias-primas secundárias substitui frequentemente a produção usando materiais plásticos virgens. No entanto, em alguns casos (frequentemente produtos de plástico de baixa qualidade), outros materiais (por exemplo madeira) são substituídos por plásticos. Esta questão é importante ao avaliar os benefícios ambientais da reciclagem de plástico.

A fabricação do produto final envolve geralmente um processo de dar forma aos produtos intermédios de plástico por meio de extrusão, moldagem ou sopro.

Os resíduos domésticos de plástico geram normalmente matérias-primas secundárias de diferentes qualidades, desde “pellets” de PP, HDPE, PET e PS para produtos plásticos de alta qualidade, obtidos após classificação positiva por tecnologia NIR, até resíduos plásticos misturados, que podem ser usados para fins energéticos ou para a produção de produtos de baixa qualidade.

Cada tipo de produto final requer diferentes qualidades de plástico (polímero e impurezas), em termos de pureza e de estabilidade de composição. Por exemplo, o PET pode ser usado para a produção de têxteis, bem como para a produção de garrafas, filmes, etc. As garrafas são frequentemente produzidas

em plástico reciclado de alta qualidade, devendo atender aos requisitos para embalagens de alimentos. A produção de jaquetas de lã e similares pode tolerar mais impurezas e, portanto, pode ser produzida a partir de PET proveniente de fluxos mistos de resíduos plásticos. A tendência típica atual é que os reciclados de alta qualidade substituam o plástico virgem, enquanto os reciclados de baixa qualidade substituam produtos de plástico de baixa durabilidade, assim como outros materiais em aplicações em que isso seja possível, como, por exemplo, para substituir madeira em perfis de paliçadas, mobiliário urbano, paletes, estrados pedonais em praias, etc., e para a formulação de compósitos (secção 6.3).

9.10 Impacto dos diferentes processos de reciclagem

Os especialistas em Economia Circular e Eficiência de Recursos (WRAP) realizaram uma análise de ciclo de vida de vários processos-chave para a eliminação de resíduos plásticos mistos, avaliando o potencial de várias categorias de impacto, nomeadamente o aquecimento global (GWP), a criação fotoquímica de ozono (POCP), a eutrofização (EP), a acidificação (AP), a toxicidade humana (HTP), a depleção da camada de ozono (OLDP) e a depleção abiótica (ADP) (Shonfield, 2008).

Este estudo mostrou que, em termos de potencial líquido no aquecimento global, o aterro é a opção com desempenho ambiental menos favorável, seguido da incineração. Todos os processos de reciclagem mostraram um benefício ambiental, que se deve principalmente à substituição de processos que, por esta via, são evitados (por exemplo, a necessidade de produzir plástico primário). Os resultados na maioria das categorias de impacto são dominados pelas emissões evitadas de processos substituídos, mostrando a contribuição para o potencial de aquecimento global geral de cada etapa do processo. Isso significa que, mesmo algumas diferenças bastante grandes nos impactos do processo, são frequentemente obscurecidas pelos benefícios ainda maiores que resultam de evitar a utilização de recursos primários (Shonfield, 2008).

Em termos de geração de resíduos sólidos, o estudo mostra que o aterro tem os maiores impactos e que os cenários de incineração têm os menores impactos, pois o plástico não deixa muitos resíduos quando queimado. Todos os outros cenários de reciclagem resultam em quantidades amplamente semelhantes de resíduos sólidos, apesar da diversidade de tecnologias envolvidas.

Os resultados mostram que existem cenários possíveis em que a incineração se torna preferível à reciclagem, quando a incineração substitui a necessidade de utilização de carvão para produção de energia e quando a reciclagem não produz plástico reciclado de alta qualidade. No entanto, se puder ser garantido que o plástico reciclado é de alta qualidade, os cenários de reciclagem têm sempre desempenho ambiental superior à incineração para o potencial de aquecimento global (Shonfield, 2008).

9.11 Tecnologias de reciclagem industrial de plásticos

9.11.1 Reciclagem química

9.11.1.1 Generalidades

A reciclagem mecânica de plásticos pode ser dispendiosa e difícil devido a restrições resultantes de contaminação dos resíduos, ou por separação inadequada antes da reciclagem.

Para esses casos, a reciclagem química é preferível e deve ser vista como um complemento da reciclagem mecânica.

A reciclagem química de polímeros consiste na decomposição química ou térmica de materiais de uma única classificação, em compostos e monómeros de baixa massa molecular (despolimerização e quebra de ligações da cadeia de polímeros).

Outros procedimentos aplicados durante a reciclagem química que se mostraram promissores na recuperação de produtos químicos básicos e combustíveis a partir de resíduos plásticos, são a solvólise, a hidrólise, a alcoólise e a glicólise. Os monómeros de polímeros produzidos por meio de reações de condensação, como poliuretanos, poliésteres e policarbonatos, são obtidos por esses métodos.

Extraíndo a componente valiosa dos hidrocarbonetos, monómeros e outros produtos químicos de baixa massa molecular, e usando esta nova matéria-prima para produzir plásticos novos e outras matérias-primas, com as mesmas propriedades dos materiais virgens, obtêm-se produtos que podem ser usados nas mesmas aplicações que os originais não reciclados. Este processo é um contributo importante para uma solução de reciclagem de longo prazo.

A indústria química pode assim desempenhar um papel de liderança no aumento da quantidade de plástico reciclado, ampliando a tecnologia de reciclagem química. Complementar a reciclagem mecânica com a reciclagem química será essencial para resolver o problema dos resíduos plásticos da UE e alcançar a meta da “Aliança Circular de Plásticos”, que visa ter, até 2025, 10 milhões de toneladas de plástico reciclado incorporado em novos produtos.

9.11.1.2 Exemplos recentes de aplicação de reciclagem química

A empresa canadiana “GreenMantra Technologies” possui tecnologias para reciclar quimicamente LDPE, HDPE e PP pós-consumo e pós-industrial, para os converter em ceras e aditivos para uso em novos plásticos e em diversos produtos de construção, designadamente em asfalto e em telhas (CW, 2019). Recentemente, a GreenMantra iniciou o fornecimento uma série de aditivos para a produção de compósitos de madeira-plástico (WPC) com polietileno ou polipropileno, com acréscimo de resistência e rigidez (CW, 2019).

A plataforma do “Reator Hidrotérmico Catalítico” (Cat-HTR™) da Licella usa água supercrítica para converter, de forma económica, resíduos plásticos em óleo para produzir combustíveis, produtos

químicos e novos plásticos, de outra forma destinados a aterros sanitários, contribuindo assim para o desenvolvimento de uma economia circular para todos os plásticos (SpecialChem, 2021b).

A empresa “Mura Technology Limited” detém o licenciamento da tecnologia da Licella e mantém a potencialidade de desenvolver a sua própria capacidade operacional de reciclagem, com a primeira unidade Cat-HTR™ atualmente em desenvolvimento em Teesside, no Nordeste da Inglaterra. Após a conclusão desta 1ª unidade, esta terá capacidade para processar 80.000 toneladas de resíduos plásticos por ano, mas prevê-se que possa vir a ter uma capacidade de reciclagem de 1 milhão de toneladas de resíduos plásticos até 2025. Para implementação global desta tecnologia inovadora, a “Mura Technology Limited” fez uma parceria com a empresa “Kellogg, Brown & Root Engineering” (KBR), cuja posição na vanguarda de tecnologias inovadoras e revolucionárias oferece à Mura oportunidades de desenvolvimento de classe mundial para a plataforma Cat-HTR™ no setor petroquímico global (SpecialChem, 2021b).

9.11.2 Reciclagem mecânica

9.11.2.1 *Generalidades*

A definição de tecnologias de reciclagem mecânica, abrange o pré-tratamento e a classificação para estabelecer a qualidade do plástico reciclável e as técnicas de fabricação de produtos plásticos. Todo o processo é composto por três etapas principais (Plastic Zero, 2013a):

- 1 - Pré-tratamento, envolvendo separação, classificação, limpeza e a redução da dimensão de resíduos de plásticos;
- 2 - Criação de produtos intermédios, envolvendo moagem, extrusão e peletização;
- 3 - Fabricação de novos produtos, por exemplo extrusão, moldagem ou sopro.

Os subprocessos podem ser ignorados ou repetidos, dependendo da qualidade do material de entrada e da qualidade solicitada do material de saída.

Existem basicamente dois tipos de reciclagem mecânica. Num caso, o material reciclado pode ser usado para o mesmo fim para o qual foi originalmente desenhado (processo designado como reciclagem direta ou reciclagem de circuito fechado). Noutra caso, o material reciclado só pode ser usado em outros tipos de produtos, menos exigentes (o que é frequentemente designado de “downcycling”, ou seja reciclagem de ciclo inferior ou descendente).

Os bioplásticos, como o PLA e PHA, não podem ser reciclados mecanicamente, mas apenas através de tecnologias de reciclagem química.

9.11.2.2 *Reciclagem direta (circuito fechado)*

A reciclagem de circuito fechado obtém-se quando os polímeros podem ser novamente usados para o mesmo tipo de produtos e aplicações para que haviam sido concebidos antes da reciclagem. Exemplos de circuitos fechados são as grades de garrafas, as garrafas de refrigerantes de PET, as garrafas de leite de HDPE e os tubos de PVC (Plastic Zero, 2013a).

Uma das principais razões para que o plástico não seja mantido num circuito fechado são os requisitos rigorosos em termos de qualidade do material para certas aplicações, como, por exemplo, o que acontece com as embalagens em contato com alimentos. A embalagem para alimentos pode ser usada novamente como embalagem para alimentos, mas o processo de reciclagem requer a separação da embalagem para alimentos alvo do fluxo de plástico residual misto, seguido de um processo de descontaminação. Este é um processo de reciclagem caro e, portanto, embalagens plásticas misturadas, recicláveis, são frequentemente usadas noutros tipos de produtos. Outras aplicações com requisitos rigorosos são os produtos elétricos e eletrônicos, brinquedos infantis, equipamentos médicos (Plastic Zero, 2013a) e perfis de janela em PVC.

O estabelecimento de circuitos de material fechados requer geralmente um sistema de recolha separado para evitar a mistura dos produtos alvo com outros.

9.11.2.3 _Reciclagem em ciclo descendente

Um dos motivos mais frequentes pelo qual os plásticos residuais costumam ser reciclados em ciclo descendente resulta de situações em que a cor do material de saída reciclado fica mais escura, devido a impurezas no material de entrada. O produto final também pode ficar com manchas na superfície devido a essas impurezas. É difícil obter uma cor de branco puro, ou outras cores, se o material de entrada consistir de uma mistura de materiais de cores diferentes. Portanto, o material de saída é usado em produtos de cor cinzento ou preto (Plastic Zero, 2013a). Exemplos disso são:

- filmes e sacos opacos;
- materiais de transporte, de construção e mobiliário de exterior (paletes, tubos, grades, cercas, pranchas, bancos, floreiras), pois a cor tem pouca ou nenhuma importância para muitas dessas aplicações;
- artigos de utilidade e mobiliário interior, pois a imperfeição na cor é aceitável ou até faz parte da aparência desejada para muitas dessas aplicações.

A maioria das aplicações de materiais reciclados em ciclo descendente destinam-se a substitutos diretos de produtos em plástico virgem, enquanto outras substituem outros materiais, como por exemplo acontece quando um banco de plástico substitui um banco de madeira, ou quando fibras sintéticas substituem fibras naturais, como lã ou penugem.

Mesmo que essas aplicações sejam consideradas como “downcycling”, os produtos podem ter na mesma uma durabilidade elevada. Além disso, o material adquire um período de vida útil suplementar e permite adiar o seu descarte final. Em muitos casos, o material pode até ser reciclado várias vezes.

Existem algumas tecnologias inovadoras de reciclagem mecânica que merecem ser referidas, pois incluem técnicas pioneiras e inovadoras para a resolução de problemas muito específicos, nomeadamente a separação de vários tipos de polímeros ou o desenvolvimento de produtos a partir de misturas desses polímeros, conforme descrito a seguir.

9.11.2.4 Pulverização por cisalhamento de estado sólido

Em 1990, o Departamento de Engenharia Química da “Northwestern University” desenvolveu um novo processo secundário de reciclagem de plásticos denominado “Solid State Shear Pulverization technology” (S3P), que elimina a necessidade de classificação por tipo, ou por cor.

Esta tecnologia é um processo contínuo, de uma única etapa, que recorre a uma extrusora de duplo parafuso corrotativa modificada, que inclui, no seu segmento inicial, um pulverizador por cisalhamento de estado sólido, para manter o polímero no estado sólido durante o processamento. Permite a reciclagem de resíduos plásticos não selecionados, convertendo plástico triturado ou resíduos de borracha em partículas de dimensão controlada, variando de grosso (10 e 20 mesh) a fino (80 mesh) ou ultrafino (200 mesh), e permite ainda fabricar misturas de polímeros e nanocompósitos poliméricos (Figura 9.3).

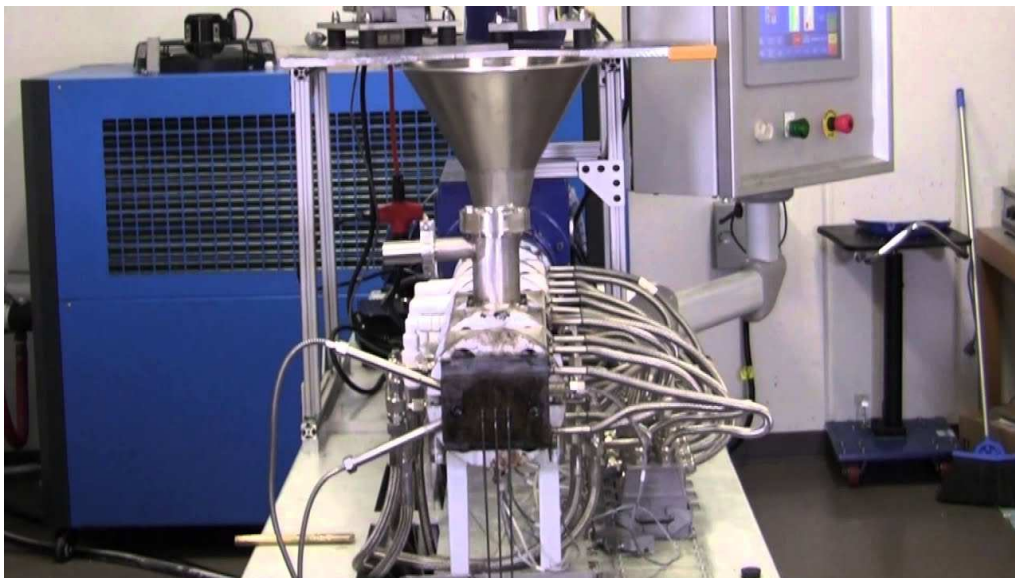


Figura 9.3 – Imagem do equipamento usado no processo S3P (Profwaka, 2013)

Como resultado, o produto de pulverização é utilizável em aplicações que variam desde a moldagem por injeção direta, sem peletização prévia, à moldagem rotacional, para uso em revestimentos protetores e decorativos, bem como para a mistura com resinas virgens e composição com aditivos. As peças moldadas por injeção feitas do produto em pó proveniente do processo S3P têm propriedades mecânicas e físicas comparáveis ou melhores do que as propriedades resultantes do processamento convencional direto de plásticos reciclados simples ou misturados. Além disso, as peças feitas do produto em pó do processo S3P podem ser de cores uniformes ou multicoloridas. O elevado grau de mistura alcançado por meio do processo S3P é frequentemente associado à cisão da cadeia de carbono nos polímeros constituintes da mistura, resultando na geração de radicais livres durante o processamento S3P e conseqüente modificação do índice de fluidez dos polímeros pelo processo S3P.

A investigação e o desenvolvimento da tecnologia S3P evoluiu significativamente desde 1990 para um método de processamento de polímero muito mais amplo, que permite a mistura eficiente de polímeros com viscosidades muito diferentes e a dispersão de aditivos no estado sólido, incluindo pigmentos e produção contínua de pó com formas exclusivas e superfície de maior área. O S3P pode converter resíduos multicoloridos e não classificados e resinas virgens em um pó uniforme e de cor clara, com tamanho de partícula controlado, adequado para conversão direta por fusão por todas as técnicas de processamento de plástico existentes. Além disso, este processo permite a compatibilização *in-situ* de polímeros diferentes através da aplicação de energia mecânica para causar reações químicas.

Ao contrário de processos anteriores, através dos quais os polímeros são fundidos antes da pulverização, o processo S3P não envolve fusão. Por outro lado, o S3P mantém os polímeros no estado sólido e evita a aplicação de calor que ocorre durante outros processos, o que pode ser prejudicial para as propriedades físicas dos materiais pulverizados (Khait et al., 2001).

O S3P mistura misturas de polímeros de maneira eficiente com diferentes viscosidades de componentes, resultando na eliminação da inversão de fase. O processo S3P produz diretamente misturas com matriz e morfologia de fase dispersa semelhantes às obtidas após a inversão de fase que decorre, por fusão, durante o longo processo de mistura. Este fenômeno é de importância prática porque a mistura convencional por fusão, para produzir uma morfologia de mistura estável, requer um elevado tempo de processamento. Além disso, a tecnologia S3P também é vantajosa para a produção de compósitos de revestimento em pó, termoplásticos ou termoendurecíveis, num processo de uma única etapa, contrariamente a processos convencionais de operação em várias etapas, envolvendo extrusão por fusão, seguida de moagem do lote produzido. As principais características deste novo processo são resumidas seguidamente (Khait et al., 2001):

- produção contínua de pó a partir de matérias-primas de plástico ou borracha;
- mistura de polímeros imiscíveis;
- mistura eficiente de polímeros com viscosidades não comparáveis;
- reciclagem ecológica de resíduos de plásticos misturados multicoloridos;
- dispersão de aditivos sensíveis ao calor no estado sólido;
- misturas de plástico/borracha, previamente definidas.

9.11.2.5 Processo de moldagem por Impressão de pós

Os resíduos gerados em obras e locais de construção costumam ser difíceis e dispendiosos de reciclar devido à variedade de materiais usados. No entanto, alguns materiais, além de serem leves, podem apresentar excelentes propriedades mecânicas, o que os torna ideais para diversas aplicações na Indústria da Construção.

O Processo de moldagem de pó por Impressão (PIM) é um processo de reciclagem mecânica capaz de processar a maioria dos materiais residuais disponíveis e, a partir destes, fabricar produtos utilizáveis que permitem a este setor minimizar o seu impacto ambiental. O processo PIM pode utilizar resíduos plásticos mistos não classificados com um alto nível de contaminantes, sem usar processos de limpeza e de segregação de polímero (ERT, 2015). O resíduo a granel é triturado e transformado

em pó e granulados (Figura 9.4) e (ERT, 2015), e pode ser posteriormente convertido em estruturas tipo sanduíche, leves e reutilizáveis.

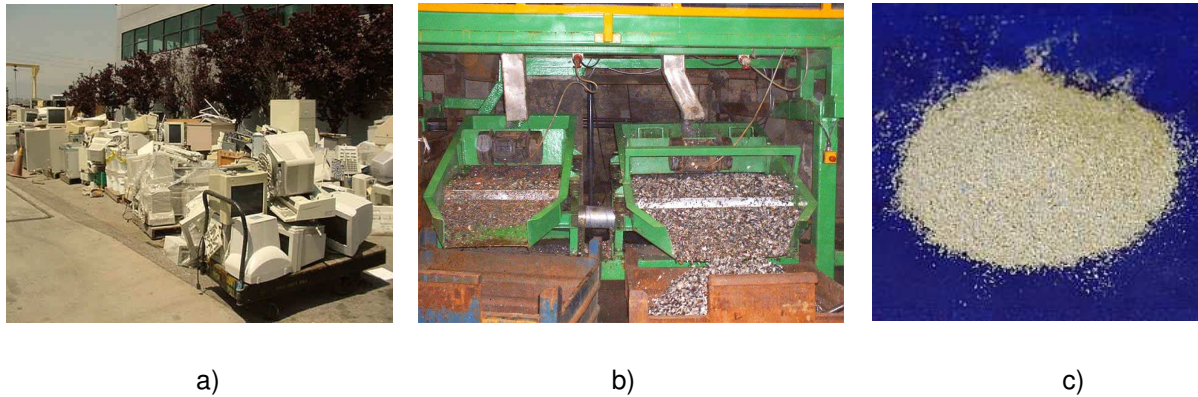


Figura 9.4 – Processo de reciclagem PIM: a) material a que dá entrada na primeira fase do processo; b) material triturado proveniente da segunda fase; c) Pó/grânulos da terceira fase

O material produzido é fundido, expandido e usado como enchimento entre duas películas (Figura 9.5). O processo envolve a formação de duas camadas de revestimento por sinterização de pó de plástico na superfície do molde, a criação do núcleo e a formação de espuma do núcleo para produzir uma estrutura tipo sanduíche integrada com revestimentos superficiais sólidos. Utilizando moldes abertos é possível formar compósitos com películas diferentes em cada superfície, com materiais diferentes, e com propriedades e cores também diferentes (ERT, 2015).

Dependendo da formulação, os materiais derivados do processo PIM apresentam um desempenho semelhantes ao das placas convencionais de espuma, de fibra, usadas em pavimentos e para isolamento térmico e acústico.

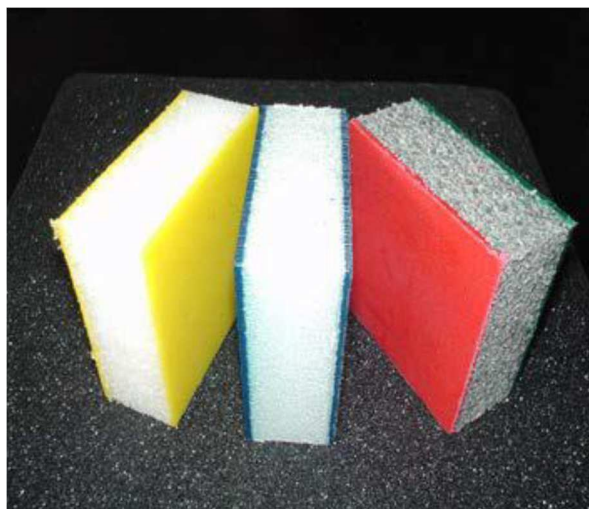


Figura 9.5 – Compósitos fabricados pelo processo PIM, apresentando revestimentos superficiais de diversas cores

A conceção do processo PIM, que usa resíduos plásticos mistos micronizados, envolve a aplicação de um filme de polímero virgem no interior de uma ferramenta de moldagem a quente. O material do núcleo, constituído por reciclado misto em pó e agente de expansão, é então pulverizado sobre a metade inferior do molde. Uma tampa, também revestida com polímero virgem, é então baixada sobre a metade inferior do molde e as metades do molde são fixadas em conjunto. O molde é então colocado num forno de cura a quente, onde o material do núcleo se funde sob pressão, parcialmente gerada pelo agente de expansão, após o que o molde é resfriado e o produto é removido. Este processo não requer a fusão completa de todas as partículas constitutivas, uma vez que as folhas de polímero virgem superior e inferior mantêm o núcleo compósito e formam a estrutura de carga principal do componente fabricado. Dependendo da aplicação final, o núcleo do compósito pode conter uma ampla gama de resíduos de polímeros misturados, incluindo ainda uma percentagem de cargas e de fibras inorgânicas.

O compósito polimérico misto, constituído por uma mistura de resíduos, pode ser utilizado como material de construção, em estruturas temporárias, barreiras de proteção a inundações, pisos e estruturas marítimas.

O processo PIM deve permitir a fabricação de produtos para a indústria da construção, contendo até 80% de plástico reciclado misturado como material principal, sem perda de funcionalidade e sem prejuízo de aparência estética.

Através da seleção do material, e ajustando as condições do processo, é possível manipular a densidade e as propriedades do material compósito.

Tanto a película superficial quanto o núcleo do produto podem ser feitos de plástico reciclado, virgem ou misto.

Cada linha de reciclagem de plástico do processo PIM pode ser projetada e construída sob especificação para atender a requisitos específicos do produto.

Os produtos feitos com o processo PIM são recicláveis e podem ser reutilizados como matéria-prima para a fabricação de novos produtos.

Em síntese, o processo PIM oferece uma oportunidade sustentável de usar grandes volumes de fluxos de resíduos plásticos mistos que não podem ser separados física ou economicamente. O PIM produz economicamente produtos finais de valor acrescentado a partir de resíduos plásticos de baixo valor que, de outra forma, seriam incinerados ou enviados para aterro. O processo tem capacidade para produzir produtos moldados, em larga escala, que são normalmente mais leves, fáceis de manusear, muito robustos e que exigem pouca ou nenhuma manutenção.

9.11.3 Desenvolvimentos recentes em reciclagem mecânica

Como atrás se referiu, os métodos de reciclagem permitem converter fluxos de resíduos plásticos (provenientes de aplicações diversas, incluindo embalagens) em matérias primas e em produtos com aplicações diversas, incluindo materiais e produtos de construção, pelo que se torna pertinente referir

os desenvolvimentos mais recentes nas tecnologias de reciclagem para identificação e separação de plásticos em fluxos mistos.

9.11.3.1 Separação e recuperação de plásticos com recurso a solventes

Já se referiu atrás a técnica desenvolvida pelo “Fraunhofer-Institute for Chemical Technology”, baseada em espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS), que já é correntemente usada para identificação de diferentes plásticos e cores, durante a reciclagem mecânica de plásticos (secção 9.6.5.1).

O Instituto “Fraunhofer Institute for Process Engineering and Packaging” patenteou ainda o processo “CreaSolv®”, o qual permite que vários polímeros selecionados, presentes num fluxo misto, sejam seletivamente dissolvidos e assim separados de um fluxo misto de resíduos de plástico, e que contaminantes e materiais perigosos sejam efetivamente removidos da solução usando métodos de purificação especiais. Uma característica especial desse processo é a opção de separação de certos aditivos do polímero reciclado, nomeadamente os retardantes de chama bromados e os plastificantes.

O processo CreaSolv® (Fraunhofer, 2015) é adequado para recuperação de vários termoplásticos, tais como ABS, PS, EPS, PAc, PC, PLA, PVC, PET, PE, PP e misturas desses polímeros, em fluxos de resíduos complexos pós-consumo (resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (WEEE), equipamentos de baixa voltagem (ELV), resíduos de construção e misturas de plásticos (resíduos de embalagens).

Outro processo semelhante desenvolvido pela “Fraunhofer” é o FiltraSolv, adequado para recuperar plástico lacado ou com revestimento eletrodepositado (por exemplo, plásticos galvanizados). Em contraste com o processo CreaSolv®, o plástico residual é tratado com uma pequena quantidade de solvente e, devido à baixa viscosidade da mistura líquida, esta é então filtrada de forma eficaz, extraindo o polímero, e aproveitando a maior parte do solvente contendo os revestimentos metálicos (Fraunhofer, 2015). Devido ao reduzido uso de solventes, o processo FiltraSolv pode ser implementado usando máquinas convencionais de processamento de plástico, tais como uma extrusora com filtração de líquidos e desgaseificação a vácuo. Tal sistema permitiria o inchamento do polímero, a filtração de metais de galvanoplastia e a recuperação do solvente numa única linha. Em comparação com os processos de reciclagem de plástico à base de solventes, os custos operacionais e de investimento para este processo são consideravelmente baixos.

9.11.3.2 Identificação e separação por espectroscopia Raman

A medição baseada na espectroscopia Raman fundamenta-se na interação da luz laser com um fluxo de material plástico numa unidade de pré-condicionamento (PCU) da extrusora de reciclagem,

A medição da composição do polímero e das cargas incorporadas no material de entrada da extrusora em tempo real, permite corrigir qualquer desvio de uma faixa de tolerância previamente definida. Nesse caso, os operadores da máquina recebem automaticamente uma mensagem e podem, assim, tomar contramedidas num estágio inicial do processo, ou remover imediatamente o material rejeitado do processo (PRW, 2019b). Este método é adequado para todos os termoplásticos e tipos de cargas, exceto para material de entrada muito escuro.

9.11.4 Otimização de tecnologias de reciclagem e de separação

A empresa Erema desenvolveu um pacote (QualityOn PoliScan) que permite a supervisão e controlo contínuo da qualidade durante um processo de reciclagem. Diversos parâmetros, tais como o índice de fluidez em volume (MVR), a viscosidade intrínseca, as coordenadas de cor e a composição do polímero (por espectroscopia Raman) do material de entrada, podem ser medidos diretamente na máquina de processamento. Em combinação com o Sistema de Execução de Fabricação re360, que regista dados de produção e de máquina para todo o parque de máquinas de fabrico, é possível apoiar a otimização do processo de reciclagem (PRW, 2019b).

A empresa Sikora desenvolveu um sistema de ensaio laboratorial ótico, designado por “Purity Concept V”, para plásticos, recorrendo à deteção de cor. O sistema é constituído por uma mesa de luz automatizada na qual os grânulos de plástico, colocados numa bandeja de amostragem móvel, são transportados ao longo da área de inspeção. Em segundos, o material é inspecionado por uma câmara de colorimetria, e um projetor assinala opticamente todos os grânulos contaminados dispostos na bandeja de amostragem. Ao avaliar imagens e contaminações, tais como manchas pretas na superfície de material transparente, translúcido e colorido, com dimensão acima de 50 µm, os grânulos de plástico são detetados, visualizados e avaliados estatisticamente de forma automática, permitindo também a triagem pelo uso de um equipamento designado “Purity Scanner Advanced”. A atribuição clara da contaminação e a inspeção subsequente são possíveis a qualquer momento. Outra característica do sistema de teste ótico de laboratório é a deteção automática de desvios de cor nos grânulos (PRW, 2019b).

A Sikora também desenvolveu o sistema de testes laboratoriais “Purity Concept X” com tecnologia de raios-X para deteção de contaminação metálica. O dispositivo é dedicado à inspeção de inclusões metálicas na superfície e no interior de grânulos negros e coloridos, que seriam invisíveis com sistemas óticos.

10 | Dados económicos e estatísticos de reciclagem

10.1 Quantidades de plástico reciclado

A maior percentagem de reciclados na Europa é gerado pelo mercado das embalagens. A Figura 10.1 representa a quantidade de embalagens geradas na Europa (Eu28 + NO/CH) por País e *per capita* (Eurostat).

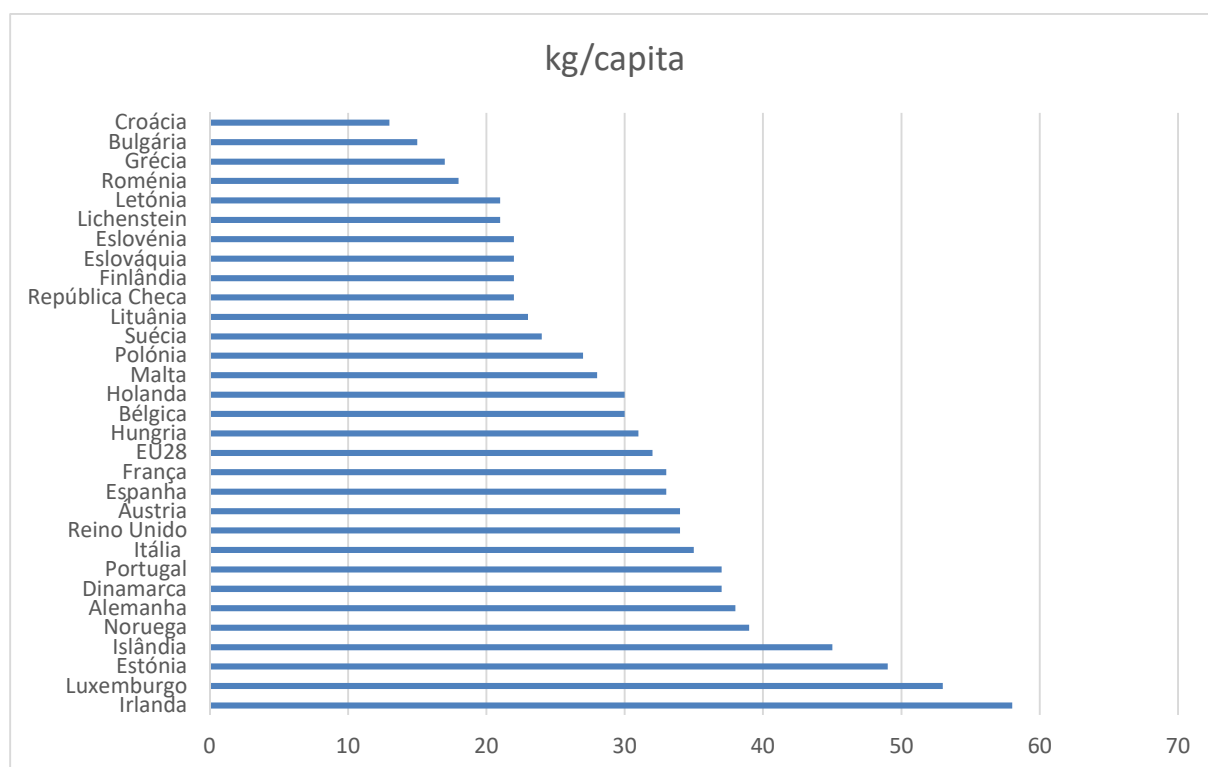


Figura 10.1 – Quantidade de embalagens geradas na Europa (Eu28 + NO/CH) por País e *per capita* (Eurostat)

Os gráficos da Figura 10.2 e da Figura 10.3 ilustram a evolução do tipo de tratamento efetuado ao lixo pós-consumo entre 2006 e 2018, na Europa, em termos percentuais e em massa, respetivamente, demonstrando que 25% deste lixo ainda era enviado para aterro em 2018.

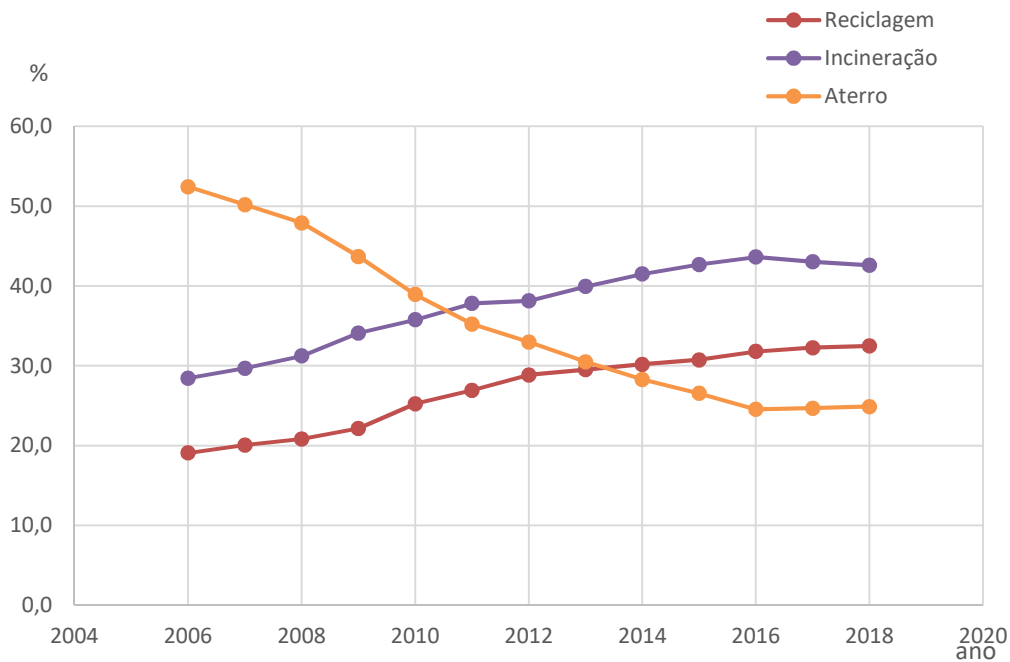


Figura 10.2 – Evolução do tipo de tratamento realizado ao plástico pós-consumo, em percentagem, entre 2006 e 2018, na Europa (Eu28 + NO/CH) (Eurostat)

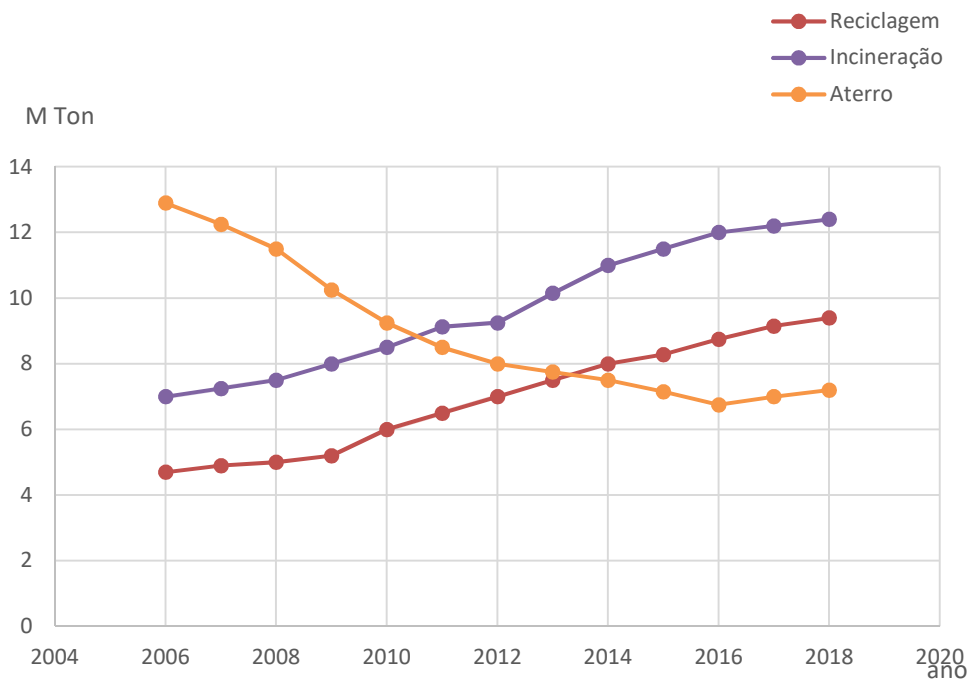


Figura 10.3 – Evolução do tratamento de resíduos plásticos na Europa (EU₂₈ + NO/CH), em milhões de toneladas, entre 2006 e 2018, na Europa (Eu28 + NO/CH) (Eurostat)

De acordo com o EUROSTAT, a taxa de reciclagem de embalagens na Europa tem evoluído ao longo dos anos, conforme ilustrado no gráfico da Figura 10.4.

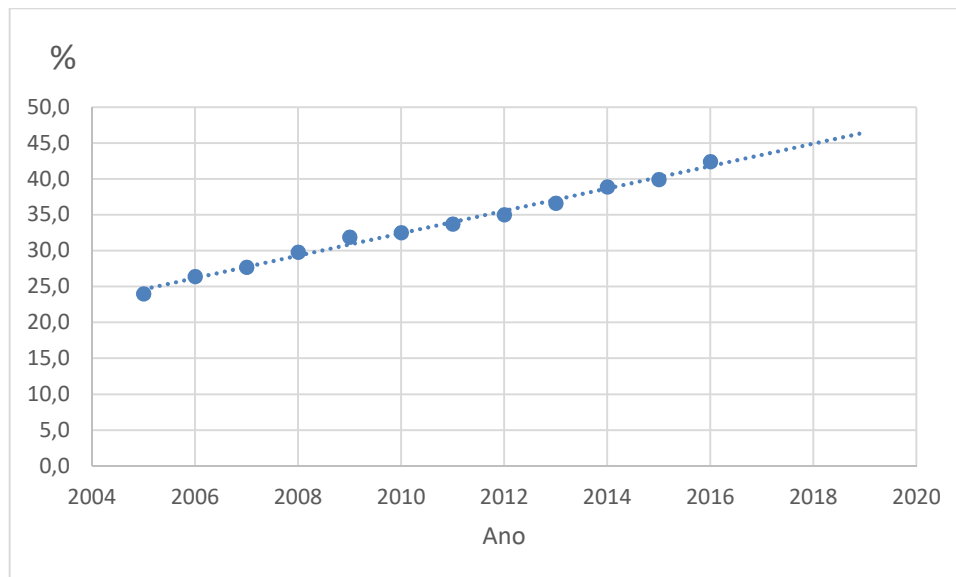


Figura 10.4 – Evolução do tratamento de resíduos na Europa (EU₂₈ + NO/CH), em milhões de toneladas, de 2006 a 2018

A Figura 10.5 ilustra o tratamento de resíduos na Europa (EU₂₈ + NO/CH) em 2018 (PlasticsEurope, 2020).

Os Países que têm legislação que restringe o envio de plástico pós-consumo para aterro, estão assinalados na Figura 10.5 (zona limitada à esquerda): Suíça, Áustria, Holanda, Luxemburgo, Suécia, Finlândia, Bélgica, Dinamarca e Noruega.

Atualmente, apenas 11 países europeus reciclam ou recuperam mais de 90% dos resíduos de plástico, havendo 12 países que enviam mais de 40% dos plásticos para aterro. Portugal ainda envia cerca de 34% de plástico pós-consumo para aterro, o que apesar de tudo representa uma redução desde 2006, altura em que enviava mais de 75% do plástico para aterro.

Em 2018, cerca de 3,3 milhões de toneladas de resíduos de plástico foram depositados em aterros na Europa (PlasticsEurope, 2020), desperdiçando-se assim uma grande quantidade de recursos e aumentando o risco associado ao lixo. Porém, tem havido uma grande redução na quantidade de plásticos enviados para aterro (Figura 10.2 e Figura 10.3).

Quando o plástico é despejado em aterros sanitários, o processo de decomposição pode levar 10 a 30 anos a completar-se. A indústria de plásticos europeia está a trabalhar com uma série de “*stakeholders*” com o objetivo de conseguir “Zero Plastics to Landfill” na Europa. A reciclagem tornou-se, portanto, uma solução razoável para o problema resultante do envio de plástico para os aterros.

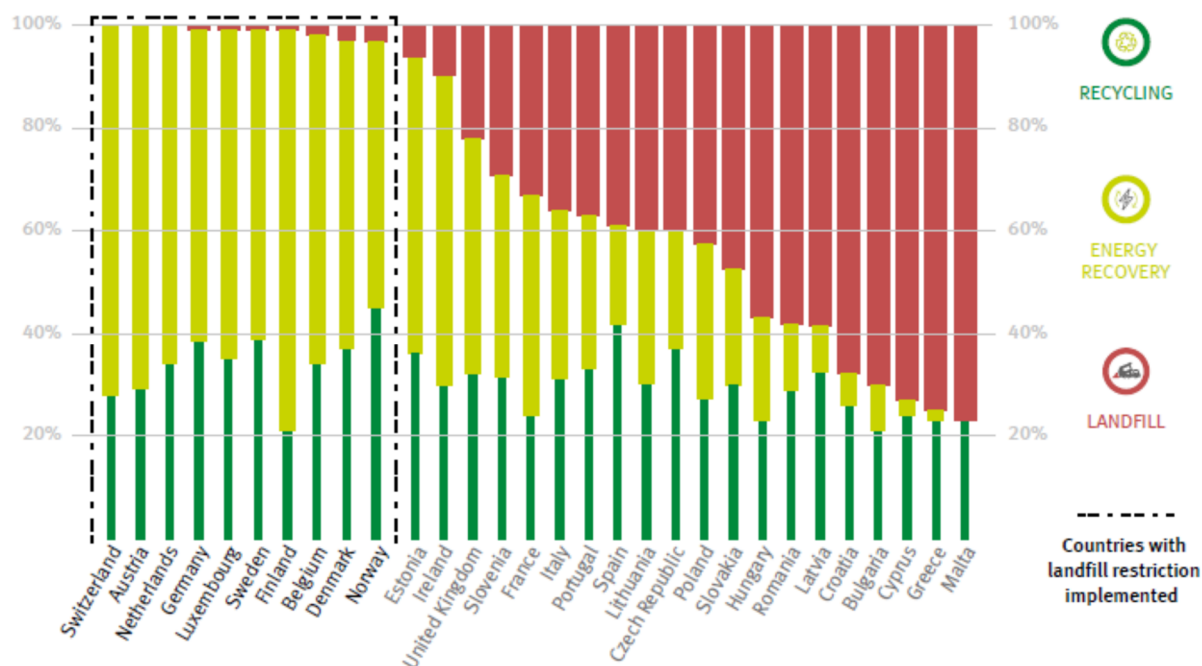


Figura 10.5 – Taxas de reciclagem, recuperação de energia e aterro, de plástico pós-consumo na Europa (EU₂₈ + NO/CH), em 2018, por País (PlasticsEurope, 2020)

No Quadro 10.1 apresenta-se a distribuição de produtos contendo materiais reciclados por setores de atividade, confirmando assim que são os produtos de construção que utilizam mais materiais reciclados.

Os Países da Europa que têm um bom controlo estatístico do tratamento de resíduos são a Alemanha, Reino Unido, Itália, França, Espanha, Polónia, Holanda e Bélgica. Em Portugal, as estatísticas são pouco fiáveis, devido a eventuais alterações intermédias de código e a descargas não controladas.

Segundo informação da APA, em Portugal, durante o ano de 2019, foram encaminhadas cerca de 58 toneladas de resíduos classificados com o código LER (Lista Europeia de Resíduos) “170203 – Plástico para operações de reciclagem”, que está incluído no capítulo 17 da LER “Resíduos de construção e de demolição” (incluindo solos escavados de locais contaminados).

Embora existam outros códigos LER que podem corresponder a resíduos de plástico com origem no setor da construção, a APA optou por não apresentar dados referentes a outros códigos que não o 170203, uma vez que não é possível determinar inequivocamente, ou, pelo menos, com uma margem de erro aceitável, que estes resíduos resultaram da atividade de construção. Estes dados referem-se a resíduos gerados e tratados em Portugal, tendo-se considerado somente os quantitativos encaminhados para operações de reciclagem. Os resíduos classificados com o LER 170203, e que sejam encaminhados para uma operação de tratamento intermédia que determine a subsequente alteração do código LER, poderão eventualmente ser enviados para operações finais de reciclagem, não sendo, contudo, possível apurar esses quantitativos dada a mudança no código LER.

Quadro 10.1 – Distribuição de reciclados por setor de atividade, na Europa (EU₂₈ + NO/CH) , em 2019 (PlasticsEurope, 2020)

Setor de atividade	%
Construção	46
Embalagens	24
Agricultura	13
Automóvel	3
Elétrico e eletrónica	2
Casa, lazer e desporto	1
Outros (Engenharia mecânica, mobiliário, medicina, etc.)	11

De qualquer das formas, aquele número não traduz certamente a realidade nacional e, infelizmente, continuam a ocorrer descargas de resíduos plásticos e de outros tipos, provenientes da construção, em zonas em que isso não é permitido (pinhais, bermas de estrada, vias urbanas de reduzida circulação e até junto a ecopontos), os quais não são contabilizados estatisticamente.

Em contrapartida, também é de salientar que a quantidade de materiais e produtos plásticos integrados em resíduos de construção e demolição, em Portugal, é residual (< 2%), sendo a grande maioria constituída por betão, tijolos, telhas e materiais cerâmicos, entre outros (Deloitte, 2017).

Em 2018, dos 5 milhões de toneladas recicladas na Europa, cerca de 80% foi reutilizado para a produção de novos produtos, sendo o restante exportado para fora da Europa.

Por fim, convém referir que o mercado de reciclagem de plástico “entrou em colapso” durante a crise da Covid-19, pois o uso geral de materiais reciclados caiu em mais de 40% devido à combinação de fatores adversos (preços baixos de resina virgem e queda na procura).

A crise atual representa um risco, não apenas ao nível da desaceleração da expansão planeada dos mercados de reciclados, como também no facto de poderem ser postos em causa os objetivos já alcançados até agora.

10.2 Custos da reciclagem

É difícil definir e generalizar os custos associados à reciclagem, já que dependem de diversos fatores (Plastic Zero, 2013a).

Os custos associados à recolha, triagem e transporte de resíduos de plástico podem ser consideravelmente altos, mas são muito dependentes das condições locais, como distâncias de transporte, custos de mão de obra, capacidade das unidades de tratamento e disponibilidade de centros de carga.

Se o custo do processo necessário de separação e classificação, ficar muito elevado, o plástico residual será provavelmente exportado para países com custos de tratamento mais baixos ou, em alternativa, o resíduo resultará num reciclado de baixa qualidade (Plastic Zero, 2012).

Os custos de transporte são decisivos para o custo de plásticos reciclados e estes flutuam consideravelmente, muitas vezes no próprio dia, em função da disponibilidade de transportes com destino predefinido (Plastic Zero, 2013a).

10.3 Preços dos plásticos reciclados

Basicamente, é a procura do mercado mundial de plásticos reciclados que define o preço e a qualidade dos resíduos plásticos. A procura é influenciada pelo preço do material virgem, bem como pela qualidade do polímero reciclado.

A recolha e separação anteriores definirão os limites para o cumprimento dos requisitos de qualidade dos compradores.

O indicador de preços do Eurostat para resíduos de plástico mostra a mesma tendência que para o plástico virgem e o petróleo bruto.

Cerca de 75% da procura de reciclados de plástico na Europa é coberta por cinco polímeros: PP, PE (HD-PE, LD-PE), PET, PS e PVC. Porém, alguns tipos de polímero são mais valiosos do que outros. Os preços do PET são geralmente mais altos do que os preços do HDPE, seguidos do LDPE e polímeros mistos. O PET e o HDPE provenientes de embalagens em contacto com alimentos (e para esse efeito aprovados) são os polímeros mais valiosos. Estes apresentavam em 2012 preços em torno de 900-1.100 GBP (1.100-1.350 euros) por tonelada, para polímeros peletizados (WRAP, 2012). Os preços de polímeros como PP e PS são consideravelmente mais baixos, por exemplo 0-200 GBP (0-250 euros, em 2012) por tonelada de materiais enfardados (WRAP, 2012).

Consequentemente, a composição de um fluxo de resíduos plásticos mistos é de grande importância para o valor geral dos reciclados obtidos após a separação. Os polímeros técnicos, como o ABS, o tereftalato de polibutileno (PBT) e o polióxido de metileno (ou poliacetal, POM), muito usado em materiais de construção, também são recicláveis, mas, embora sejam bastante valiosos, exigem requisitos especiais para serem separados, pelo que têm um preço muito mais alto do que os polímeros mais comuns (Plastic Zero, 2012).

O grau de transparência e a cor dos polímeros também influencia o seu preço. Se a utilização final exigir resinas transparentes, a resina reciclada deve ser produzida a partir de plástico transparente. As resinas recicladas transparentes são difíceis de obter a partir de um fluxo de cor mista. Assim, a reciclagem de plástico transparente é frequentemente realizada em circuitos fechados.

Portanto, os polímeros transparentes (como o LDPE) possuem um preço mais elevado do que os polímeros coloridos ou translúcidos.

O grau de reprocessamento também afeta o preço do reciclado. Por exemplo, os granulados têm um preço mais elevado do que os reciclados em fardos.

Finalmente, a pureza do reciclado, que se refere ao conteúdo de outros polímeros e de materiais não plásticos e impurezas que podem ser aceites, também determina o preço.

Portanto, a economia de qualquer processo de reciclagem depende do rendimento do material útil que pode ser obtido a partir do fluxo de material de entrada; por exemplo, da proporção dos tipos de polímero de valor mais alto (como PET, HDPE, LDPE) que um lote contém. As contaminações com polímero não direcionado (por exemplo, filme num fluxo de plástico rígido) ou papel, podem diminuir o valor de um depósito de plástico misto de 5% para 35%. Os preços finais superiores em reciclados de embalagens, só são alcançados para fardos mistos, se o PET e HDPE não tiverem sido extraídos do fluxo de plástico misturado para venda separada (WRAP, 2012).

Os custos de processamento são determinados pela qualidade do material, pelo tipo de polímero, facilidade de reprocessamento e tecnologias utilizadas. Além disso, as análises de controlo da qualidade aumentam os custos de reprocessamento, possivelmente diminuindo a competitividade dos polímeros reciclados. Os preços dos plásticos reciclados ou secundários dependem, em grande parte, da procura por plásticos reciclados no mercado internacional (China/Ásia), que também depende do nível de atividade económica do país importador, dos preços globais de plásticos não reciclados, e da regulamentação da EU e de cada País (Plastic Zero, 2012).

10.4 Competitividade do setor de gestão de resíduos

O investimento em instalações de reciclagem (instalações, terreno e tecnologia) é elevado, e o custo operacional consiste principalmente em custos de mão de obra e de energia. Assim, a produtividade desempenha um papel importante na decisão de onde estabelecer uma instalação de reciclagem e/ou reprocessamento, e de se investir em tecnologia mais ou menos intensiva, ou em mão de obra (Plastic Zero, 2013a).

11 | Constrangimentos à aplicação de plásticos reciclados

11.1 Generalidades

O uso de plásticos reciclados em produtos de construção (isolamento, camadas internas de revestimentos, portas, janelas, tubos e como enchimentos de diversos materiais de construção) pode melhorar a eficiência energética dos edifícios e reduzir as emissões de CO₂, tendo-se mostrado eficaz numa ampla gama de indicadores de sustentabilidade.

Porém, ainda existem diversos obstáculos que dificultam uma utilização mais ampla de plásticos reciclados no setor da construção.

Um dos maiores obstáculos para o uso de plástico reciclado em produtos de alta qualidade é a falta de estabilidade, resultante da heterogeneidade de características. Para um produtor de plástico, é muito importante ter sempre uma matéria-prima com as mesmas características, uma vez que a produção, nomeadamente a configuração das variáveis do processamento, é muito sensível a pequenos desvios, como seja, por exemplo, a temperatura de fusão da matéria-prima. Desvios no ponto de fusão da matéria-prima podem afetar a funcionalidade, resistência ou durabilidade do produto, o que não é aceitável para algumas aplicações, como, por exemplo, por questões de segurança, equipamento médico ou peças de automóveis. O uso de plástico secundário nesses produtos é, portanto, muito limitado. Para produtos menos sensíveis, uma forma muito comum de limitar esse problema é "diluir" o plástico secundário em plástico virgem, onde a composição é estável e totalmente documentada (Plastic Zero, 2013b).

A presença de substâncias perigosas em fluxos de plástico misturado limita também as aplicações de plástico reciclado em produtos como equipamentos médicos, brinquedos, embalagens para alimentos e equipamentos para bebés (por exemplo, biberões).

Impurezas, como resíduos orgânicos, bactérias, etc., constituem principalmente um problema de higiene durante a recolha, armazenamento e classificação e separação dos resíduos de plástico, mas raramente afetam a qualidade do produto final (plástico secundário).

O consumo de plástico para produção de embalagens para alimentos é enorme, e o uso de plástico reciclado para esse fim é atraente. No entanto, deve ser cumprida uma série de requisitos da legislação europeia de segurança alimentar, o que pode impedir o uso de embalagens para fins alimentares na produção (Plastic Zero, 2013b). Esta é uma barreira para o uso de plástico reciclado de fluxos de plásticos mistos, uma vez que não há nenhuma tecnologia disponível hoje que possa separar embalagens para alimentos de embalagens para fins não alimentares. Apenas a classificação positiva de, por exemplo, produtos facilmente reconhecíveis, como embalagens e garrafas (HDPE, PET ou similares), podem ser separados de um fluxo de plástico misto por separação ótica (NIR). O uso de plástico reciclado ou embalagem para alimentos é, portanto, atualmente limitado a produtos individuais (por exemplo, garrafas reconhecidas pelo NIR) ou materiais recolhidos separadamente.

Um futuro desenvolvimento de técnicas de reconhecimento baseadas em sensores pode reduzir esse problema e, assim, aumentar a proporção de plástico secundário envolvido na produção de embalagens para alimentos. As tecnologias “Dual Energy X-Ray Transmission” (DEXRT) e “Laser Induced Brakdown Spectroscopy” (LIBS) visam a separação de, por exemplo, contaminantes de metais pesados. Porém, estas tecnologias ainda não se encontram suficientemente desenvolvidas para serem aplicadas em operações de custos reduzidos (Plastic Zero, 2013b).

A cor da matéria-prima secundária pode também conduzir à exclusão de aplicação dos reciclados em algumas aplicações. O plástico reciclado costuma ter cores (cinzento, verde, etc.), o que o torna adequado para a produção de materiais fortemente coloridos, mas não para produtos transparentes. A produção de produtos totalmente transparentes requer apenas um fluxo muito limpo de plástico transparente.

Para produtos plásticos de qualidade inferior, pode ser aceite um maior grau de impurezas e composição variada, sem comprometer a função do produto.

11.2 Problemas ambientais associados à reciclagem

A reciclagem de plásticos é, em geral, considerada uma vantagem ambiental em relação às alternativas, que normalmente serão a incineração ou aterro. No entanto, como o plástico é um bom combustível (fóssil), o sistema de reciclagem deve ser suficientemente eficaz para garantir a vantagem ambiental da reciclagem em relação ao seu aproveitamento para produção de energia.

Existem alguns aspetos que devem ser tidos em consideração para avaliar o desempenho ambiental geral do sistema de reciclagem de plástico (Plastic Zero, 2013b):

- a fração do plástico recolhido rejeitado no processo de classificação, por exemplo, plástico preto, embalagem não certificada, polímeros não desejados, etc.;
- a capacidade de substituição de material virgem (plástico virgem, madeira ou outros materiais);
- o consumo de energia da instalação de triagem;
- as distâncias de transporte (especialmente se o plástico for exportado para a Ásia);
- o tratamento alternativo de resíduos (incineração ou aterro, e o desempenho dessas tecnologias de tratamento).

Para se realizar uma avaliação ambiental objetiva é necessário especificar um sistema real e serem definidos cenários específicos para comparação. Para o efeito, devem considerar-se todos os dados relevantes para estimar a economia obtida pela reciclagem de plástico. O CO₂ é normalmente escolhido como um exemplo de parâmetro de impacte ambiental, mas existe uma gama de outros parâmetros (acidificação, formação de fumo poluente, impactes tóxicos, etc.) que também podem ser relevantes e, portanto, devem ser tomados em consideração (Plastic Zero, 2013b).

Portanto deve-se considerar o balanço entre a economia devido à produção economizada de, por exemplo, energia ou novos materiais, e as emissões de CO₂ e fumo poluente (que para além de poderem variar consideravelmente com a tecnologia de reciclagem específica e da aplicação escolhida,

dependem ainda das diferentes opções de transporte, as quais também podem variar consideravelmente em função da escolha específica do veículo ou navio).

A economia real de um caso específico deve ser avaliada em cenários de sistema de resíduos (recolha, tratamento e eliminação, incluindo efeitos a montante e a jusante), comparando a reciclagem com a opção alternativa de tratamento de resíduos.

A relação economia/emissão total de um processo de incineração de plástico depende da situação específica da unidade de incineração no que diz respeito à utilização de energia. Como o plástico é baseado em material fóssil, a incineração do plástico resultará numa certa emissão de CO₂ fóssil, que é contado como uma emissão líquida. Somente se a energia produzida for utilizada efetivamente para eletricidade e/ou aquecimento, substituindo fontes de energia fóssil, é que se pode obter uma economia ambiental numa magnitude que torne a contabilização geral de CO₂, para a incineração de plástico, uma redução líquida de CO₂ (Plastic Zero, 2013b). A contabilização do CO₂ para a incineração de plástico depende, portanto, (1) da eficiência da instalação de incineração e (2) das fontes de energia substituídas (eletricidade e aquecimento urbano).

11.3 Principais dificuldades na reciclagem de plásticos

Existem alguns constrangimentos à reciclagem de plásticos, particularmente os custos financeiros relacionados, como sejam os custos de transporte (os plásticos são volumosos e caros para transportar e armazenar) e os custos de separação (diferentes variedades de plástico, e os plásticos mistos contêm diferentes corantes e aditivos que, por questões de qualidade, podem exigir separação). Situações de pandemia, como a ocorrida em 2020 com o vírus Covid-19, agravam os custos da reciclagem e tornam ainda mais difícil manter a concorrência com os materiais virgens, que sofrem normalmente uma redução de preços significativa, resultante da diminuição da atividade de produção e, conseqüentemente, da procura.

Assim, em certas circunstâncias, pode ser mais barato e fácil usar plástico virgem em vez de plástico reciclado, ainda mais porque alguns tipos de plásticos só podem ser reciclados uma vez, ao contrário do vidro, papel e embalagens metálicas que se tornam produtos semelhantes após a reciclagem e podem ser usados e reciclados continuamente.

Outro problema sério que pode ocorrer com os resíduos plásticos diz respeito aos aditivos neles contidos (vd. por exemplo a Secção 12.1.2), nomeadamente corantes, estabilizantes e plastificantes que podem incluir componentes tóxicos como metais pesados de formulações antigas (com chumbo e cádmio).

Além disso, convém referir que os plásticos termoendurecíveis (vd. Secção 3.3), bem como os compósitos que usam matrizes deste tipo de resinas, não são facilmente reciclados.

Por fim, também é bastante complexo identificar e separar materiais híbridos em compostos e misturas de plástico.

12 | Reciclagem dos principais plásticos usados na construção

12.1 Reciclagem de PVC

12.1.1 Generalidades

Devido à sua versatilidade, o PVC continua a ser um dos polímeros mais utilizados do mundo, na medida em que proporciona adequabilidade a aplicações nos mais diversos ambientes industriais, técnicos e domésticos. Devido ao seu baixo peso, durabilidade e estabilidade, o PVC pode oferecer vantagens energéticas, económicas e de eficiência tecnológica em diversas aplicações da construção (PRW, 2019c).

O PVC é predominantemente usado para mobiliário e produtos de longa duração, principalmente materiais de construção, como caixilhos de janelas, tubos, revestimentos de pisos, tetos falsos e em cabos elétricos (Figura 12.1).



a)



b)



c)



d)



e)

Figura 12.1 – Produtos de construção típicos em PVC; a) revestimento vinílico de pavimento; b) tubagem; c) perfis de janela; d) portas; e) tetos falsos

Embora a vida média dos produtos de longa duração, em PVC, seja variável, atualmente é aceite um valor em torno dos 34 anos (Lotfi, 2011).

No entanto, alguns produtos plásticos usados na construção têm uma vida útil mais longa. É aceite que os tubos e condutas de PVC usados em infraestruturas de água e esgoto, têm geralmente uma vida útil superior a 100 anos, pelo que muitos desses tubos ainda não estão disponíveis para reciclagem. Atualmente, a substituição de tubos provenientes destas infraestruturas é mais provável ser devida a roturas e falhas inaceitáveis (que podem resultar de problemas operacionais, de instalação ou de fabricação), ou da uma necessidade de alterar a capacidade dos circuitos de tubagem devido a desenvolvimentos previstos (Whittle & Pesudovs, 2007).

Uma fonte potencial de tubos para reciclagem é a resultante de sobras da indústria de construção. No entanto, a capacidade destes tubos poderem ser cortados e aproveitados, ou reprocessados internamente para fabrico, reduz muito a quantidade de produto disponível para reciclagem.

Alguns (outros) produtos de PVC de longa duração que foram produzidos e vendidos a partir de 1960 começaram já a entrar no fluxo de resíduos, desde há alguns anos.

Em face do aumento da produção de PVC e do grande volume de produtos de PVC de longa duração, que se tornarão residuais no futuro, torna-se evidente que a reciclagem de PVC é uma característica fundamental para garantir a proteção do meio ambiente, e que é uma grande contribuição para uma economia circular.

Na verdade, o PVC pode ser reciclado até sete vezes sem qualquer perda de desempenho, e pode ser reutilizado em muitos produtos novos e de longa duração, desde produtos de construção, como janelas, pavimentos e componentes elétricos. A boa qualidade do PVC reciclado e as soluções inovadoras para resolver os principais problemas do PVC (ver secção 12.1.2) é um fator importante que impulsiona o sucesso da reciclagem e aumenta a procura por parte dos fabricantes.

Os produtos de PVC descartados são recolhidos seletivamente em muitos países. Normalmente o PVC é separado diretamente no estaleiro de obras e enviado para recicladores para granulação, micronização e mistura. Estes reciclados podem ser usados na camada intermédia de tubos de drenagem, concebidos em multicamada, ou em cabos elétricos.

Um estudo demonstrou os benefícios ambientais (por exemplo, menos emissão de CO₂) do uso de PVC reciclado em caixilhos para janelas (Stichnothe & Azapagic, 2013). Os perfis de janela podem ser recuperados e reextrudidos para fazer novas janelas, portas e vários produtos de construção. De facto, o potencial de reutilização de produtos existentes para uma segunda vida em serviço está a ser cada vez mais explorado (PRW, 2019c).

O PVC também é usado para a constituição da matriz de compósitos de madeira-plástico, principalmente nos EUA. No entanto, em Portugal existe um fabricante de WPC com matriz de PVC.

Um trabalho desenvolvido por Fumire and Tan, mostrou que é possível reciclar PVC rígido em tubos com parede estruturada, com camada intermédia espumada inúmeras vezes, aumentando a vida útil

do material de PVC em mais de 300 anos, e que o uso de PVC reciclado a um nível de apenas 25% em tubos de parede estruturada consumiria mais PVC rígido reciclado do que o que estava naquela data disponível no mercado (Fumire & Tan, 2012).

12.1.2 Constrangimentos associados à reciclagem de PVC

Um problema que persiste na reciclagem de PVC é o alto teor de cloro do PVC bruto (56% do peso do polímero) e as elevadas concentrações de aditivos, sendo este o polímero que tem a maior proporção de aditivos de todos os plásticos, a qual pode representar até 60% do peso de um produto de PVC.

Além disso, as formulações antigas de PVC continham estabilizantes perigosos, à base de metais pesados, que eram adicionados ao polímero para possibilitar o processamento do polímero a uma temperatura acima de 170 °C e também conferir propriedades específicas ao material.

Embora as formulações do PVC tenham começado a ser alteradas neste século e os metais pesados e estabilizantes perigosos tenham sido completamente banidos (por exemplo, o cádmio e o chumbo), como a maioria dos produtos de PVC têm uma vida útil longa, as formulações antigas estarão naturalmente presentes no fluxo de resíduos por décadas.

Este problema levou a um conflito entre os objetivos da economia circular da UE e a gestão de substâncias restritas sob a diretiva EC 1907/2006 (REACH, 2006) e administrada pela Agência Europeia de Produtos Químicos (ECHA). A ECHA propôs um limite de 0,1% de teor de chumbo para artigos que não contenham PVC reciclado e, para algumas aplicações de construção, haveria uma derrogação de 15 anos com um limite superior de teor de chumbo para artigos que usam PVC reciclado. Os responsáveis pelo programa “VinylPlus”, criado pela EU, enviaram comentários e informações à ECHA, incluindo os resultados de estudos independentes sobre os níveis de estabilizantes de chumbo em PVC rígido, considerados seguros (PRW, 2018).

Um projeto de investigação, encomendado em 2015, pelo programa “VinylPlus” à “Forschungs-GmbH für Analytik und Bewertung von Stoffübergänge” (FABES), demonstrou que a migração de aditivos existentes no PVC rígido reciclado, proveniente de perfis de janelas e de tubos, era muito baixa e que a água usada para lavar o PVC reciclado, respeita os requisitos muito rigorosos das normas ambientais. Este estudo, considerou todas as possíveis opções de gestão de resíduos de PVC rígido, e demonstrou ainda que a reutilização desse fluxo de resíduos é preferível às rotas alternativas de eliminação (PRW, 2018). Além disso, é provável que a concentração de aditivos com restrição legal continue a diminuir no fluxo de material à medida que novas formulações de PVC entram no fluxo de reciclagem.

Além disso, o PVC transformado a partir de reciclados é mais resistente do que o plástico virgem devido à transformação química sofrida pelos vários estabilizantes que ele contém, tendo-se demonstrado que o PVC pode ser reciclado até 10 vezes sem degradação e perda de qualidade, o que lhe confere uma vida útil na indústria da construção de 350 anos (PRW, 2020).

Porém, o problema dos aditivos com restrição regulamentar, existentes em formulações antigas, continuou a constituir uma barreira à economia circular e, por conseguinte, em 2018, a Comissão Europeia (CE) decidiu tomar medidas para desenvolver uma metodologia de tomada de decisão

específica para apoiar as decisões sobre a reciclabilidade dos resíduos que contêm substâncias perigosas. Essa metodologia, que deveria ser concluída até meados de 2019, levaria em consideração o custo-benefício geral da reciclagem de um material em comparação com seu descarte, incluindo a incineração com recuperação de energia.

No entanto, esse trabalho não chegou a ser concluído no período previsto e, em fevereiro de 2020, a maioria dos membros do Parlamento Europeu votaram contra uma derrogação – proposta pela Comissão Europeia – que teria permitido que os produtos de PVC fossem colocados no mercado contendo níveis controlados de "aditivos sujeitos a restrição regulamentar", principalmente estabilizantes à base de chumbo (PPE, 2020).

Esta votação foi contrária à recomendação do conselho da Agência Europeia de Produtos Químicos (ECHA), que mostrou que permitir esse uso restrito durante cinco anos era a melhor opção de gestão de resíduos para produtos de PVC de longa duração, como tubos provenientes de infraestruturas e perfis de janela substituídos em edifícios. Os responsáveis do programa "VinyPlus" também lamentaram o resultado da votação e acrescentaram que, na ausência de opções alternativas, isso significa que a maioria do PVC reciclado na UE – quase 740.000 toneladas em 2018, já não considerando 2019 e 2020 – será desviado para aterro ou incineração.

A dificuldade imposta por esta regulamentação é agravada por outros aditivos legalmente restringidos – os plastificantes à base de ftalatos – também usados com PVC plastificado. Muitos ftalatos foram restringidos pela ECHA, incluindo o bis(2-Etil-hexil)ftalato (DEHP), que tem sido amplamente utilizado como plastificante em revestimentos de piso vinílicos. Em 2016, a Comissão Europeia apoiou uma recomendação da ECHA para conceder uma autorização de quatro anos para a utilização de DEHP, em PVC reciclado por três empresas de reciclagem de PVC. A ação foi contestada pela ONG ambiental ClientEarth, que levou a Comissão ao Tribunal de Justiça da União Europeia, processo que ainda está pendente.

Adicionalmente às restrições associadas aos ftalatos, a Comissão Europeia decidiu avançar com planos para classificar o dióxido de titânio (TiO_2) como um cancerígeno da categoria 2, devido aos riscos potenciais de inalação, o que também afeta a maioria dos produtos de PVC de cor branca (CW, 2019).

Os regulamentos REACH e CLP ("Classification Labelling Packaging") indicam que o TiO_2 não é tóxico, mas apenas perigoso devido à sua natureza particulada (típica de nanomateriais), devendo ser, portanto, tratado tendo em consideração os limites de exposição ocupacional. Aplicar a classificação de cancerígeno da categoria 2 significa que os produtos contendo TiO_2 , como plásticos e tintas, serão rotulados como perigosos, mesmo quando não houver risco de inalação de TiO_2 . Na circunstância, a reciclagem e a gestão de resíduos são áreas críticas e de preocupação, pois qualquer produto que contenha mais de 1% de TiO_2 tornar-se-á num resíduo perigoso e não poderá ser reciclado.

12.1.3 Medidas de mitigação

A incorporação de aditivos de origem biológica no PVC reciclado contribui para a obtenção de produtos mais ecológicos (“verdes”). O polihidroxialcanoato amorfo (α -PHA) pode ser usado como auxiliar de processamento e como aditivo de melhoria de desempenho em formulações contendo PVC reciclado. O α -PHA, de elevada massa molecular, apresenta um bom potencial na produção de produtos rígidos extrudidos, utilizados na construção. É altamente miscível com PVC virgem e reciclado, atuando como um compatibilizador eficaz para incorporar com sucesso o PVC reciclado numa matriz de PVC virgem, ou para substituição total do PVC virgem por PVC reciclado (PPE, 2016).

Além disso, os produtos PHA podem permanecer na formulação indefinidamente porque ancoram os componentes da formulação, incluindo plastificantes e outros aditivos, à matriz de PVC.

Já existem no mercado aditivos à base de α -PHA, e prevê-se que a curto prazo possa existir pelo menos uma fábrica de bioplásticos de PHA com capacidade de produzir 10.000 toneladas/ano (CW, 2019).

12.1.4 Métodos de reciclagem

A reciclagem mecânica de PVC, separado na origem, constitui uma técnica prática, relativamente simples e comum. Os produtos pós-uso adequados são aqueles que são fáceis de identificar e de separar do fluxo de resíduos, ou que podem ser mantidos relativamente limpos, acabando como produto reciclado de alta qualidade para utilização na gama existente para aplicações de PVC. Constituem exemplos disso a tubagem (geralmente reciclados também para tubos), perfis de janela (reciclados para novos perfis ou tubos), pavimentos, revestimentos e membranas de impermeabilização de coberturas. Os materiais usados em aplicações flexíveis (não rígidas) são às vezes reciclados por meio do processo “Vinyloop” ou reprocessados em produtos como esteiras, tapetes e cones de tráfego e sinalização.

Também já se faz reciclagem de produtos compósitos contendo PVC. Porém, não é possível obter destes PVC puro, pelo que o reciclado de compósito de PVC só é adequado para aplicações em que se possa tolerar uma composição mista. Quando não existem fluxos de plásticos homogêneos disponíveis, pode recorrer-se a esquemas de reciclagem adequados para plásticos mistos, incluindo PVC. Os resíduos de plásticos mistos, contendo até 15% de PVC, não apresentam problemas técnicos, embora a qualidade do reciclado seja adequada para um número mais limitado de aplicações.

Na verdade, há uma série de composições ou produtos constituídos por múltiplos materiais que, quando são enviados para reciclagem, não podem ser economicamente classificados em fluxos de polímero único. Esses materiais estão intimamente ligados uns aos outros por motivos de desempenho e a sua separação ainda não é economicamente viável.

Para esses casos, pode usar-se, para reciclagem do PVC, o método de reciclagem química cujas tecnologias em vigor são menos sensíveis a produtos residuais não classificados ou contaminados, e que permitem extrair matérias-primas e aumentar a capacidade futura de reciclagem para maiores quantidades de resíduos mistos.

12.1.5 Dados estatísticos de reciclagem de PVC

O ponto de partida para a reciclagem de PVC deu-se com o primeiro Compromisso Voluntário da indústria do PVC, designado Vinil 2010, o qual permitiu atingir o patamar de 260.000 toneladas de PVC reciclado em 2010 (PRW, 2018). Depois, este programa foi substituído pelo VinylPlus, que constituiu o segundo programa criado pela indústria europeia do PVC, visando aumentar a reciclagem de perfis de janela, tubos e acessórios, cabos, filmes rígidos e flexíveis e toda uma série de revestimentos vinílicos.

O foco do programa “VinylPlus” não é apenas cumprir metas da economia circular, mas também abordar outras formas de sustentabilidade, nomeadamente os tópicos da energia e mudanças climáticas, fornecimento e produção de material sustentável e o uso responsável de aditivos. Essas questões-chave foram integradas no esquema de certificação de sustentabilidade para produtos de PVC na construção civil (selo “VinylPlus”), considerado o setor com o mais alto desempenho de sustentabilidade e contribuição para a economia circular. Até à data, já dez empresas receberam o selo “VinylPlus”, para mais de 100 produtos de PVC fabricados em 18 unidades localizadas na Europa (PRW, 2020).

Assim, no programa “VinylPlus”, as metas de reciclagem são reforçadas por esquemas de rastreabilidade e certificação, de modo a garantir a segurança e a qualidade dos materiais reciclados e dos processos.

A meta inicial deste esquema voluntário era reciclar 800.000 toneladas de PVC até 2015. Em 2018, o programa “VinylPlus” assumiu um novo compromisso de reciclar 900.000 toneladas até 2025 e, depois, 1 milhão de toneladas por ano até 2030 (PRW, 2018).

Durante 2015, a indústria aumentou as taxas de recolha de PVC em cerca de 7%, atingindo cerca de 515 mil toneladas. Só o setor de perfis de janela viu as taxas de recolha aumentar em cerca de 15%, para quase 233.000 toneladas em 2015. O setor das janelas e dos perfis continuaram a representar a maior parte do volume (cerca de 45%). As restantes aplicações principais foram os cabos elétricos, os filmes rígidos, os tubos e acessórios, e os revestimentos flexíveis de PVC (para impermeabilização de coberturas e outras membranas de impermeabilização, com aplicações diversas).

Porém, nem todos os projetos tiveram êxito. Por exemplo, um projeto promovido pela “The European Plastic Pipes and Fittings Association” (TEPPFA) para reciclar tubos e acessórios, sofreu uma quebra de 10% nas recolhas, caindo abaixo de 50.000 toneladas em 2015, devido às incertezas relacionadas com o quadro regulamentar da UE sobre o uso de PVC reciclado. Isso fez com que a indústria de tubos adiasse investimentos em novos produtos, designadamente tubos multicamada incorporando reciclado (PPE, 2016).

As aplicações de fios e cabos elétricos representam hoje o maior setor de aplicação de PVC flexível na Europa, absorvendo cerca de 7% das resinas de PVC fabricadas e respondendo por 46% do mercado de cabos na Europa. Os cabos de PVC representam hoje uma das principais fontes de PVC reciclado, com mais de 127.000 toneladas de cabos reciclados em 2016, de um total de 568.696 toneladas de PVC reciclado (PVC4cables, 2017).

Os Perfis de PVC-U residuais (Figura 12.2), representaram 62% do total de PVC reciclado no Reino Unido em 2016, correspondendo o restante a tubagem, filmes de PVC rígidos e flexíveis e cablagem (SpecialChem, 2017b).



Figura 12.2 – Ilustração de um local com quantidades significativas de perfis de janela de PVC prontos para reciclagem (PRW, 2018)

De acordo com o esquema “VinyLPlus”, cerca de 300.000 toneladas de perfis de janela de PVC foram reciclados na Europa em 2017 (PRW, 2018).

O programa “VinyLPlus” atingiu um nível de quase 740.000 toneladas de PVC reciclado em 2018 (Figura 12.3). Em 2019, foram recicladas mais de 771.000 toneladas de PVC (PRW, 2020), ultrapassando a meta final prevista, um ano antes, tal como havia sido projetado pelo programa “VinyLPlus” que em 2018 estabeleceu uma nova meta para reciclar 800.000 toneladas/ano de PVC até o final de 2020 (PPE, 2020). Essa meta deve ser igualmente ultrapassada, visto que em 2019 já se atingiu 96% desse valor.

Portanto, a indústria de PVC está bem encaminhada para cumprir as metas de reciclagem estabelecidas no programa “VinyLPlus” para 2025 (900.000 toneladas), em linha com as iniciativas políticas da UE para incentivar a recuperação, reciclagem e reutilização de plásticos.

O programa “VinyLPlus” criou um subprograma, em 2014, designado “RecoMed”, para reciclar material hospitalar em PVC, o que permitiu reciclar 9.000 kg de máscaras e tubos flexíveis em hospitais do Reino Unido, durante o ano de 2019, perfazendo já um total de 24 toneladas desde 2014 (PRW, 2020). Este subprograma tem sido alargado a outros Países, nomeadamente Austrália, Canadá, África do Sul, Guatemala e Colômbia.

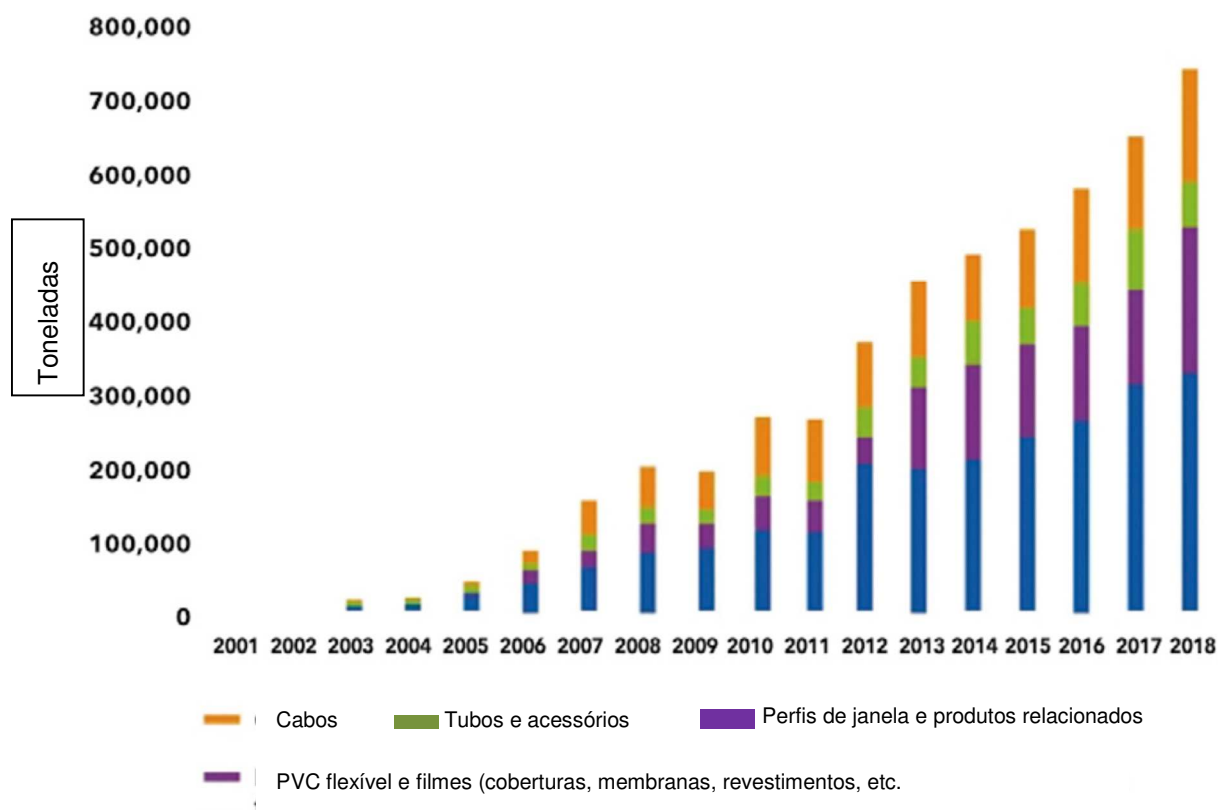


Figura 12.3 – Quantidade e tipos de PVC reciclado no âmbito dos programas “Vinyl 2010” e “VinylPlus” (PRW, 2019c)

12.1.6 Selo de sustentabilidade

O programa “VinylPlus”, em colaboração com o Building Research Establishment (BRE) e a empresa “The Natural Step” (TNS), desenvolveu um novo selo de sustentabilidade com o objetivo de criar uma estrutura de sustentabilidade de longo prazo para toda a cadeia de valor do PVC em toda a Europa e no mundo. Com base em critérios de sustentabilidade, incluindo as fontes de origem e os aditivos, o selo de Produto “VinylPlus” está aberto a todos os edifícios e produtos de construção em PVC.

O selo de produto “VinylPlus” foi projetado para tornar mais fácil, para os clientes e os mercados, escolher os produtos de PVC mais sustentáveis e de maior desempenho. O programa cobre o setor de construção (edifícios e produtos de construção) e as auditorias de concessão são realizadas por empresas especializadas, assentes em critérios rigorosos, incluindo o fornecimento de resina de PVC e de aditivos, a gestão circular de reciclagem controlada, políticas de energia sustentável, requisitos de gestão organizacional e da cadeia de abastecimento (PRW, 2019c).

12.2 Reciclagem de poliuretano

12.2.1 Generalidades

Devido às suas aplicações variadas e sucesso comercial, é produzida anualmente uma quantidade crescente de resíduos de PU. Esses resíduos compreendem produtos em fim de vida e pós-consumo, bem como resíduos da fabricação de poliuretanos. Este último é o resultado de imperfeições dos métodos de produção e processamento e pode constituir até 10% dos PU produzidos. No entanto, os resíduos de produtos de PU em fim de vida e pós-consumo são um problema muito maior do que os resíduos da fabricação, porque geralmente estão contaminados ou deformados e, portanto, são menos propensos a serem reutilizados (Kemonia e Piotrowska, 2020).

Infelizmente, a deposição em aterro ainda é a forma mais comum de processar resíduos de PU. A fração de PU descartado desta forma chega a atingir quase 50% dos resíduos (pós-consumo ou pós-produção combinados). Porém, o aterro deveria ser considerado um local de armazenamento temporário para resíduos aguardando valorização e processamento posterior, ao invés da solução final (Kemonia e Piotrowska, 2020).

12.2.2 Constrangimentos associados à reciclagem de PU

Os produtos tóxicos da combustão e pirólise de produtos de PU são, além do ácido cianídrico (HCN) e monóxido de carbono (CO), os óxidos de azoto, benzonitrilo e outros nitrilos, e diisocianato de tolueno (TDI) de espumas aromáticas. Além disso, os retardantes de chama presentes em produtos de PU podem produzir gases ácidos, dioxinas/furanos e ésteres de fosfato bicíclicos altamente tóxicos, ou ferrocianeto de zinco tóxico (usado como supressor de fumos em PU e outros polímeros) (Zevenhoven, 2004).

12.2.3 Medidas de mitigação

A emissão de fumos de PU pode ser reduzida aumentando a reticulação do material, usando estruturas de cianurato ou introduzindo supressores de fumo na estrutura do polímero, por exemplo, álcoois, como o álcool furfurílico (Zevenhoven, 2004).

12.2.4 Métodos de reciclagem

As espumas de poliuretano rígido (PUR) são produzidas e consumidas em grande quantidade na indústria de construção, para a constituição de placas de isolamento térmico. Esta espuma, quando aplicada na construção, pode ter uma vida útil típica de 30 a 80 anos.

Os resíduos de PU podem ser reciclados mecanicamente por um dos 3 métodos a seguir indicados (Nikje *et al.*, 2011):

- Moagem e pulverização: processo para reutilizar resíduos de PU moído para enchimento de espumas de PU ou elastómeros. Envolve duas etapas: (i) trituração do material de PU em um pó fino; e, (ii) mistura do pó com o componente de polioliol para fazer um novo material de PU.

- Reprocessamento com adesivos: o PU é moldado a partir de pedaços de espuma de PU flexível fragmentada, unidos por um ligante. A sua alta densidade relativa e a excelente resiliência tornam-no adequado para aplicações em pavimentos e outras visando amortecimento de vibração. O fluxo sequencial do processo consiste na recolha, triagem, trituração, revestimento da superfície com aglutinante, moldagem por compressão, ativação do aglutinante adesivo, cura do aglutinante adesivo e produção de peças recuperadas.
- Reprocessamento sem adesivos: este método de reprocessamento sem adesivos, envolve a moldagem, por compressão ou por injeção de partículas de PU, a 180 °C de temperatura e a uma pressão de 350 bar para fazer com que as partículas fluam juntas, sem qualquer aglutinante.

Para além da reciclagem mecânica, a recuperação de energia de resíduos de espuma de PUR proveniente de resíduos de construção e demolição, também é uma opção interessante e constitui o único método de descarte adequado para resíduos de PU sem mercado ou aplicações (Zevenhoven, 2004; Nikje *et al.*, 2011).

Na reciclagem termoquímica (incineração) de produtos de PU, tenta-se usar o fluxo de resíduos como fonte de energia, de combustível, ou para obter alguns monómeros com valor económico. Este processo resulta numa redução de volume de cerca de 99%, o que tem grande impacto na redução de área de aterro desse material, ao mesmo tempo que destrói compostos de clorofluorocarbono (CFC) e outros agentes de expansão de espuma prejudiciais ao meio ambiente.

A reciclagem termoquímica compreende os seguintes métodos (Nikje *et al.*, 2011):

- Pirólise: recorre a um ambiente aquecido e livre de oxigénio para a pirólise de plásticos em gases, com libertação de monóxido de carbono CO, metano (CH₄), cianeto de hidrogénio (HCN), amoníaco (NH₃) e monóxido de azoto (NO), além de pequenas quantidades de etileno (C₂H₄) e acetileno (C₂H₂), bem como misturas de monómeros (na forma de um óleo monofásico viscoso de cor vermelha com uma viscosidade que aumenta ao longo do tempo);
- Gaseificação: consiste num processo exotérmico que produz calor, cinzas e gás. Neste processo, a corrente residual é aquecida e então combinada com ar rico em oxigénio molecular (O₂), formando um gás de síntese (CO + H₂), que pode ser utilizado em processos de refinaria para a produção de diferentes produtos químicos, por exemplo, amoníaco e álcoois. O hidrogénio molecular (H₂) e o CO produzidos também podem ser usados na produção de poliéteres e isocianatos, respetivamente;
- Hidrogenação: processo que consiste num compromisso entre os métodos de pirólise e gaseificação. A hidrogenação contém uma etapa adicional em relação à pirólise para produzir gases e óleos ainda mais puros por meio de uma combinação sinérgica de temperatura, pressão e hidrogénio.

Outro método interessante usado para reciclar poliuretanos é a reciclagem química. O principal objetivo da reciclagem química é a recuperação de monómeros, resultantes da quebra de ligações do uretano sob condições de reação controladas.

A reciclagem química compreende os seguintes métodos (Nikje *et al.*, 2011):

- Hidrólise: o vapor sobreaquecido a 200 °C converte a espuma de PU, em cerca de 15 minutos, num líquido com duas fases, recorrendo a um meio sem oxigénio e sob pressão. A hidrólise é a reação do PU com a água, produzindo polióis e produtos à base de aminas. Os polióis reciclados podem ser usados como monómeros na formação de PU e os intermediários de amina podem ser reutilizados para produzir outros componentes de PU, por exemplo, isocianatos. Os resíduos de PU podem ser conveniente e economicamente convertidos em poliéteres e poliaminas contendo hidrogénio ativo, por contato do PU com água, na presença de uma base forte e um agente de ativação;
- Aminólise: é a reação de resíduos de PU com aminas, como a dibutilamina, a etanolamina, a lactama ou adutos de lactama⁶, sob pressão a temperaturas elevadas, utilizando potássio e hidróxido de sódio como principais catalisadores;
- Glicólise: é o método de reciclagem química mais amplamente utilizado para resíduos de PU. O principal objetivo deste processo é a recuperação dos monómeros valorizados, nomeadamente, os polióis de resíduos de PU, para a produção de novo material. Basicamente, a glicólise implica o aquecimento dos resíduos de PU (triturados) até 180–220 °C, em glicóis de alto ponto de ebulição, na presença de um catalisador. Os glicóis atuam como agentes promotores da quebra de ligações e da libertação dos polióis e aminas, ligando-se aos grupos funcionais de uretano.

Por fim, são de considerar ainda métodos de degradação biológica, por intermédio de fungos, bactérias e enzimas (Kemoni e Piotrowska, 2020).

12.2.5 Dados estatísticos de reciclagem de PU

Através de uma pesquisa à literatura da especialidade, não foi possível encontrar dados estatísticos sobre reciclagem de PU, quer proveniente de produtos de construção (produtos para isolamento térmico e adesivos/selantes), quer de produtos contendo PU provenientes das indústrias do mobiliário (sofás), têxtil (vestuário e sapatos) e automóvel (almofadas de assentos e painéis de instrumentos).

12.3 Reciclagem de polipropileno e polietileno

12.3.1 Generalidades

O PP e o PE são polímeros da família das poliolefinas e são muito utilizados no setor da construção.

O PE é utilizado principalmente em tubagens, cabos e condutas, bem como constituinte principal da matriz de compósitos de madeira-plástico (WPC).

⁶ : A designação “lactama” resulta da combinação das palavras “lactona” + “amida” e é uma amida cíclica.

Já o PP é mais usado em tubos, de menor diâmetro, para distribuição de água quente no interior de edifícios e para redes de “*sprinklers*”, em aplicações de baixo risco.

Tal como foi referido para o PVC, também é expectável que os tubos e condutas de HDPE, usados em infraestruturas de distribuição de água, gás e saneamento, de grandes diâmetros, tenham uma vida útil superior a 100 anos e, portanto, a disponibilidade de tubos de PE reciclado ainda é muito limitada.

12.3.2 Métodos de reciclagem

Os reciclados de PE e PP são geralmente processados por recicladores em grânulos (designados normalmente por *pellets*), que são adequados como cargas de enchimento de produtos de construção diversos, e para produtos não destinados ao contato com alimentos ou com água para consumo humano.

O método de reciclagem de PP e PE é baseado em procedimentos de fusão-estabilização. Os grânulos de PP e PE reciclados podem ser usados para mobiliário urbano, satisfazendo todos os requisitos de desempenho mecânico e de durabilidade (resistência às intempéries), após a aplicação de aditivos estabilizantes adequados.

Num estudo realizado no LNEC, foi possível confirmar a aplicabilidade de PE reciclado em tubos para saneamento, com desempenho satisfatório.

12.4 Reciclagem de misturas de plásticos

12.4.1 Dificuldades

Em contraste com o caso de produtos monocomponentes, a separação, purificação e reciclagem de plásticos termoendurecíveis e de misturas de vários plásticos, plásticos revestidos e laminados e produtos têxteis poliméricos, continua a ser difícil e constitui um grande desafio.

Os reciclados pós-consumo (RPC) são constituídos por uma mistura de vários tipos de resina e de cores com reologias variadas (fluxo de alta variabilidade). Além disso, os níveis de aditivos que existem nos polímeros são desconhecidos, sendo geralmente bastante complexo identificar materiais híbridos em resíduos pós-consumo. Outro problema dos RPC é a possibilidade de existência de maus odores e contaminantes orgânicos.

Os odores desagradáveis são normalmente originados por amins e/ou componentes voláteis de enxofre formados por reações químicas pós-processamento.

Os contaminantes em RPC incluem polímeros classificados incorretamente, bem como adesivos e outras espécies de polímeros de baixa massa molecular. Os contaminantes e material degradado também causam mau odor nos RPC.

As misturas de polímeros são difíceis de homogeneizar, pois alguns polímeros não apresentam nenhuma interação ou reação química específica entre eles, como, por exemplo, PET, PE e PVC.

Assim, as misturas podem apresentar baixa miscibilidade entre os polímeros e, devido à alta tensão interfacial, a morfologia da mistura reciclada pode não ser estável.

12.4.2 Medidas de mitigação

Uma abordagem possível para mitigar as dificuldades da reciclagem de misturas de plásticos é desenvolver os métodos de separação e limpeza, bem como conceber os produtos para facilitar o processo de reciclagem, em particular no caso de produtos híbridos e no que se refere à incorporação de aditivos.

12.4.3 Métodos de reciclagem

Os melhores métodos de reciclagem de misturas de plásticos são os previamente descritos nas secções 9.11.2.4 (Pulverização por Cisalhamento no Estado Sólido) e 9.11.2.5 (Processo de moldagem por Impressão de pós).

Porém, apesar da sociedade estar a tentar, através de alterações regulamentares, limitar a incineração, a exportação e a deposição em aterro, infelizmente, estes ainda são métodos muito usados para o descarte destes materiais (Thielemans *et al.*, 2014).

12.5 Reciclagem de compósitos

12.5.1 Generalidades

Como os materiais compósitos e plásticos, reforçados com fibras, têm elevada durabilidade, o descarte no final da vida útil não tem sido um grande problema até hoje.

A maior quantidade de resíduos de materiais compósitos tem resultado do próprio processo de produção destes materiais, o qual é contínuo, e as porções da matéria-prima e do produto final remanescentes, peças e secções de FRP, tornam-se inutilizáveis (Yazdanbakhsh & Bank, 2014).

No entanto, há que considerar que muitos produtos compósitos estão, atualmente, a aproximar-se do fim de sua vida útil ou funcional, resultando numa taxa crescente de acumulação de resíduos.

12.5.2 Constrangimentos associados à reciclagem de compósitos

Os resíduos híbridos pós-industriais e de construção, bem como os dos compósitos são de mais fácil identificação do que os fluxos mistos de plásticos pós-consumo, pelo que o problema da reciclagem daqueles materiais não reside neste aspeto.

Os principais problemas para a reciclagem de plásticos e compósitos reforçados com fibras são os seguintes:

- a maioria dos compósitos usa matrizes de resina termoendurecível, que não são facilmente recicladas porque são reticuladas e não podem ser reprocessadas, ao contrário dos termoplásticos que podem ser repetidamente fundidos. A complexidade da reciclagem é

aumentada porque estes materiais também contêm uma fração considerável de fibra de vidro e de cargas, como carbonato de cálcio e areia;

- os compósitos são comumente combinados com outros materiais (fixações de metal, estruturas alveolares, compósitos híbridos, etc.);
- o valor dos constituintes dos compósitos (e, portanto, de qualquer resíduo ou material de demolição recuperado) é baixo;
- os materiais compósitos têm elevada resistência e rigidez, o que é uma desvantagem durante o reprocessamento, pois obriga ao recurso de máquinas pesadas para trituração e retificação;
- os produtos compósitos de polímero também são geralmente volumosos e leves, tendo seções ou perfis com formas geométricas complexas, o que torna o transporte de resíduos não triturados economicamente inviável;
- os produtos de fibra de carbono podem ser difíceis de decompor ou reciclar. Só é possível triturá-los ou quebrá-los com elevadas temperaturas ou usando produtos químicos específicos para recuperar a fibra de carbono neles incorporada. Além disso, o processo também pode danificar a fibra de carbono e destruir os materiais de resina da matriz nos compósitos.

Assim, reciclar e reutilizar resíduos de FRC e de FRP é mais difícil e caro do que para outros materiais amplamente usados na construção (particularmente metais, madeira e betão).

A reduzida reciclabilidade dos materiais compósitos é vista como uma barreira fundamental para o desenvolvimento ou mesmo a continuidade do uso desses materiais em alguns mercados.

12.5.3 Medidas de mitigação

Uma abordagem possível para o reconhecimento e separação de vários componentes constituídos por materiais diferentes é contribuir para facilitar a identificação e o “design” de produtos híbridos durante o processo de reciclagem. O Projeto Híbrido, lançado em 2016 pela “European PVC Window Profile and Related Building Products Association” (EPPA), visa classificar a reciclabilidade dos perfis híbridos de PVC.

12.5.4 Métodos de reciclagem

Devido às dificuldades na reciclagem de compósitos, a incineração com recuperação de energia, ou em combinação com a produção de cimento, tem constituído a principal opção para eliminar resíduos de materiais compósitos.

Porém, as questões ambientais e as limitações legislativas associadas à deposição em aterro e à incineração de resíduos de PRF, tornou essencial desenvolver rotas de reciclagem de FRP eficientes e económicas, com cadeias de abastecimento associadas, como constituindo uma alternativa cada vez mais viável para a gestão destes resíduos (Yazdanbakhsh & Bank, 2014).

Embora tenham sido realizados diversos projetos de investigação para desenvolver processos de reciclagem e encontrar formas de usar efetivamente o material reciclado em aplicações novas ou existentes, a maioria têm visado a reciclagem de compósitos de fibra de carbono, devido ao diferencial

de custo (fibras de carbono virgem têm um valor cerca de 10 vezes superior ao valor das fibras de vidro).

Assim, foram desenvolvidos vários processos de reciclagem para FRC e PRF, a qual pode ser categorizada em dois grupos principais: a recuperação das fibras da matriz polimérica e a reciclagem mecânica.

A recuperação das fibras da matriz polimérica recorre a um processo térmico ou químico agressivo para quebrar as cadeias poliméricas da matriz termoendurecível, de modo a que as fibras possam ser libertadas e separadas. Estes processos de recuperação são caros e só têm justificação económica apenas para extrair fibras caras, tais como fibras de carbono, porque as fibras de carbono têm uma elevada estabilidade química e geralmente as suas propriedades mecânicas superiores não são afetadas significativamente durante a recuperação. Os principais processos de recuperação são os seguintes:

- pirólise: muitos dos projetos de reciclagem de plásticos e compósitos reforçados com fibras de carbono (PRFC ou CRFC) concentraram-se num processo de pirólise parcial, onde a matriz de resina é queimada com concentração limitada de oxigénio, até uma temperatura de 450-700 °C, permitindo a recuperação de fibras e a produção de combustível. Nesta faixa de temperatura, a matriz polimérica é volatilizada em moléculas de menor massa molecular, enquanto as fibras são minimamente afetadas e recuperadas (Yazdanbakhsh & Bank, 2014). As fibras de carbono, processadas desta forma, retêm 90% ou mais de suas propriedades mecânicas originais. Várias variantes de processos de pirólise, usando compósitos de fibra de vidro e de carbono, foram testadas em vários países. Os processos de pirólise por micro-ondas foram desenvolvidos no Reino Unido (Nottingham University), EUA e Alemanha, com o objetivo de reduzir o consumo energético do processo de reciclagem (Job, 2010);
- leito fluidizado (oxidação): processo muito tolerante a materiais mistos e contaminados, desenvolvido na Nottingham University, que envolve a alimentação de resíduos constituídos por peças compósitas de PRFC e PRFV, reduzidas a uma dimensão de cerca de 25 mm, num leito de areia. A areia é fluidificada com uma corrente de ar quente à temperatura de 450-550 °C. O polímero decompõe-se e vaporiza, libertando as fibras e as cargas que são transportadas na corrente de gás. As fibras e as cargas são então separadas, e os produtos de resina são totalmente oxidados numa câmara de combustão, onde a energia térmica pode ser recuperada (Job, 2010). As fibras de vidro perdem cerca de 50% de sua resistência à tração, mas retêm a sua rigidez se processadas a 450 °C, o que é suficiente para remover a resina de poliéster. Em temperaturas mais altas, as fibras perdem ainda mais resistência. As fibras de carbono apresentam uma perda de resistência de cerca de 20% quando processadas a 550 °C (adequado para resina epóxido), mantendo a rigidez original;
- reciclagem química (solvólise): processo de reciclagem que permite a recuperação dos produtos químicos da resina. Os resíduos de FRP são submetidos à ação de um material reativo (ácido) sob baixa temperatura (normalmente menos de 350 °C), resultando na decomposição e separação do material da matriz polimérica (Yazdanbakhsh & Bank, 2014). A

Nottingham Trent University investigou este processo, usando propanol supercrítico para dissolver a resina dos compósitos epóxico e promover a separação de fibras de carbono. Também foram usados água e metanol em estado supercrítico para reciclar compósitos de fibra de vidro (Job, 2010). Os métodos químicos podem, no entanto, causar impactos ambientais negativos se fizerem uso de materiais perigosos.

Todos os métodos de reciclagem mecânica de compósitos envolvem a quebra do material e a redução sucessiva da dimensão das partículas dos materiais reciclados por meio da trituração, moagem ou outro processo mecânico semelhante; os pedaços resultantes podem ser segregados, usando peneiras e ciclones, em produtos em pó (ricos em resina) e produtos fibrosos (ricos em fibras) (Yazdanbakhsh & Bank, 2014).

A moagem mecânica é a abordagem mais amplamente usada para reciclar materiais compósitos fibrosos com poliméricos termoendurecíveis. Após a redução a dimensão adequada, o material é moído e classificado em diferentes frações. Esta abordagem é economicamente desafiadora, pois é difícil produzir reciclado finamente moído a um custo comparável ao das cargas de enchimento usadas atualmente, como as de carbonato de cálcio (Job, 2010).

Já os produtos de fibra de carbono são mais difíceis de reciclar mecanicamente, pois a fibra de carbono pode ser danificada no processo.

12.5.5 Aplicações de compósitos reciclados

Os compósitos reciclados têm sido amplamente usados em materiais cimentícios (betão e argamassas), para substituição de agregados (cargas).

As propriedades mecânicas dos materiais cimentícios contendo PRF e CRF reciclado, principalmente a sua resistência à compressão, depende de vários fatores (Yazdanbakhsh & Bank, 2014), designadamente do tipo de material cimentício (betão ou argamassa), da proporção de água/cimento e da mistura e das proporções do material cimentício e dos constituintes, do tipo de resíduo de CRF (reforçado com fibras de vidro ou de carbono), dos diferentes teores de fibra e tipos de resina e, finalmente, da dimensão das partículas do PRF reciclado e do agregado que foi substituído (fino vs grosso).

Tem sido reportado que a substituição parcial de agregados em betão e argamassas por FRP reciclado mecanicamente, não afeta significativamente a durabilidade dos materiais cimentícios, mas que reduz significativamente as suas propriedades mecânicas (Yazdanbakhsh & Bank, 2014).

Em contrapartida, foi reportado (Job, 2010) que a adição de pó residual de 5% de plástico reforçado com fibras de vidro (PRFV) ao betão, com superplastificante (2% de teor de cimento), aumentou a resistência à compressão em cerca de 14% em comparação com provetes de controle normais. Também é reportado noutro estudo que a substituição parcial de agregados de areia por resíduos de PRFV tem um efeito incremental nas resistências à flexão e à compressão das amostras testadas, independentemente do tipo e conteúdo de resíduos de PRFV (Ribeiro *et al.*, 2011; Castro *et al.*, 2013).

Os resíduos de FRP também têm sido usados na produção de compósitos de madeira-plástico (WPC), bases de chuveiro, placas de aglomerado, asfalto e borracha (Job, 2010).

Os compósitos contendo madeira podem novamente ser reciclados. mas podem conter odores desagradáveis, associados a compostos naturais, como lignina e celulose.

Os plásticos reforçados com fibra de vidro moído reciclados podem ser usados em compósitos de borracha, com teores do reciclado até 50%, para aumentar a dureza e o módulo de elasticidade da borracha e melhorar a capacidade de amortecimento e as propriedades acústicas (Job, 2010).

12.6 Casos ilustrativos de sucesso

12.6.1 Reciclados de PVC

O projeto Rewind recolheu, na Alemanha, 100.000 toneladas de janelas de PVC durante o ano de 2015. Este projeto foi criado para promover a reciclagem de portas e janelas de PVC usadas, e deu origem ao aparecimento de alguns projetos de grande escala na Alemanha. Um desses maiores projetos foi implementado em Askren Manor, a oeste de Schweinfurt, onde um antigo assentamento do exército dos EUA, abandonado, foi demolido para que o local fosse reconstruído, sendo agora renomeado como "Bellevue". Nesse terreno de 28 hectares, existiam 34 blocos residenciais de três andares (aproximadamente 700 unidades residenciais), 13 vivendas geminadas e várias instalações comuns, tendo permitido reciclar cerca de 2.500 janelas de PVC. Essas janelas foram recicladas e o PVC reciclado está a ser usado novamente na fabricação de janelas (PRW, 2018).

A Deceuninck reciclou 12.000 toneladas de resíduos de PVC rígido, pós-industrial e pós-consumo, em 2017, parte dos quais foi reaproveitada para produtos novos de valor acrescentado, como perfis de janelas e elementos para reforço de corte térmico (PRW, 2018). Em 2019, a Deceuninck abriu uma nova linha de reciclagem em Diksmuide, Bélgica, a qual prevê a reciclagem até 45.000 toneladas/ano de PVC (PRW, 2020). Os materiais de entrada são provenientes de resíduos pós-industriais (resíduos dos clientes, bem como resíduos do seu próprio processo de fabrico) e de janelas de PVC de primeira geração que estão a ser substituídas gradualmente, após 30-40 anos de vida útil. A empresa espera que a nova instalação desvie mais de 2 milhões de janelas por ano de aterros ou incineração. É utilizada tecnologia de reciclagem que permite reciclar perfis de PVC de todas as cores e composições; inclusive os que contêm reforço de fibra de vidro. Os perfis antigos são descontaminados, classificados por cor e granulados, para serem usados na extrusão de novos perfis de PVC.

A empresa alemã Veka, outra grande fabricante de perfis de PVC, fez um investimento elevado na reciclagem de PVC no Reino Unido em 2018, gastando mais de 8 milhões de libras para converter uma antiga fábrica de reciclagem de metais, localizada em Wellingborough, em unidade de reciclagem de janelas de PVC, usando desperdícios pós-industriais e de pós-consumo. Com a junção desta nova fábrica no Reino Unido, às duas que já operam na Alemanha e na França, a Veka terá uma capacidade conjunta de reciclagem de mais de 100.000 toneladas por ano, de resíduos de janelas de PVC (PRW, 2018; PRW, 2019c). A Veka tem como objetivo produzir polímero de alta qualidade para uso numa

variedade de produtos de construção sustentáveis, tais como novos perfis de janela e aros de portas. A unidade de reciclagem da Veka em UK (Veka Recycling) reciclou mais de 10 milhões de instalações de PVC-U desde 2007. A empresa dispõe de um processo de reciclagem de circuito fechado e refere que os seus produtos reciclados podem manter um desempenho adequado por mais 30-40 anos. Os perfis de janela feitos de PVC-U podem ser reutilizados por mais de 300 anos antes de se tornarem inadequados para reciclagem (PRW, 2020), podendo assim ser reciclados pelo menos 10 vezes. O processo de reciclagem de resíduos de PVC-U da Veka, para produção de *pellets* de PVC-U, ou seja, reciclados usados para a fabricação de novos perfis de portas e janelas, é realizado em quatro etapas:

- os perfis de janelas e portas são recolhidos e encaminhados para o centro de reciclagem;
- os resíduos de PVC-U são então triturados mecanicamente;
- todos os materiais metálicos e magnéticos são removidos; as várias peças dos produtos são separadas em cores diferentes e reduzidas em tamanho;
- a etapa final do processo de reciclagem é a compressão, seguida da filtração e do processo de peletização.

O fabricante de janelas britânico Eurocell também assumiu compromissos ligados à reciclagem de PVC e criou a marca Eurocell Recycle. Nos últimos seis anos, a Eurocell investiu 5 milhões de libras para expandir a sua fábrica em Ilkeston, Derbyshire, visando a reciclagem de PVC, a qual contribui potencialmente para as 61.500 toneladas de PVC, em fim de vida, que a Eurocell desviou do aterro nos últimos 10 anos (PRW, 2018). Em 2018, a Eurocell contribuiu significativamente para que 3,6 milhões de estruturas não fossem para aterro (PRW, 2019). A Eurocell Recycle oferece um processo completo de circuito fechado para recolha e processamento de perfis de PVC-U usados no Reino Unido, destinadas a ser reextruídas e transformadas em novas janelas, portas e produtos de construção. A Eurocell também continuou a aumentar a reciclagem, usando 13.400 toneladas de composto de PVC reciclado na fabricação de perfis rígidos coextruídos durante 2019, o que representou 23% do consumo total do material reciclado em 2018 (PPE, 2020).

A empresa Salamander recebeu o Prémio de Sustentabilidade 2020 da “Deutschland Test” e “Focus Money”, em particular, pelo desenvolvimento do sistema de janelas ecológicas Greta, produzidas dentro dos mais elevados padrões de sustentabilidade (PRW, 2020). Todo o PVC utilizado é proveniente de janelas velhas e resíduos da produção. Como os métodos de produção modernos não permitem obter superfícies totalmente lisas usando PVC reciclado, a empresa usou texturas de superfície especiais, com poros abertos, para criar um perfil com aparência semelhante à do betão, permitindo manter os padrões típicos de isolamento acústico e térmico das janelas de PVC, mas criando diferentes estilos arquitetónicos e diferentes tipos de janelas. Os perfis Greta fazem parte do sistema modular flexível *GreenEvolution* e podem ser ajustados individualmente para cada projeto. O *design* de linhas finas permite a construção de grandes superfícies envidraçadas para obter o máximo de luz e melhorar a qualidade do espaço, o que é vital em edifícios antigos renovados e em edifícios novos modernos.

Duas empresas italianas (Noise SRL e VBN) desenvolveram uma barreira acústica constituída por PVC reciclado, com o objetivo de melhorar ou substituir as barreiras acústicas existentes em alumínio, betão

poroso, madeira e aço inoxidável, bem como uma outra variedade de barreiras naturais. Estas barreiras acústicas são certificadas segundo os mais elevados requisitos de resistência mecânica e desempenho acústico exigidos para esta aplicação, e são caracterizadas por um *design* atraente que se adapta bem ao ambiente. Cumprem as classes de absorção sonora e isolamento acústico A5 e B3, de acordo com a normalização em vigor. No interior, a barreira tem uma camada de fibra de poliéster para absorção de som. Cada painel, que tem até 4 m de comprimento, é feito com 85% de PVC reciclado. A estrutura externa (15%) é constituída por resina de PVC virgem. Os painéis são fabricados por extrusão tubular, num processo contínuo, que cria um produto homogéneo, tanto em termos do material constituinte, como da sua resistência mecânica. Podem ser totalmente recicláveis, com praticamente qualquer cor, e combinado com as barreiras existentes. Não precisam de pintura ou envernizamento e são concebidas para durar até 25 anos (PPE, 2016).

A empresa alemã Vinylit Fassaden desenvolveu um material, em PVC reciclado de perfis de janela, denominado “VinyPlus”, para a fachada de edifícios. Com este material, a fachada não necessita de manutenção.

A empresa britânica MK Electric usa pedaços de reciclados de PVC extrudido no seu processo de produção, obtendo produtos constituídos por 100% de plástico reciclado, destinados a cabos, rodapés e calhas. Os resíduos de PVC-U, incluindo sobras de produção e remanescentes do corte, são recolhidos por recicladores de PVC, em fábricas do Reino Unido e Irlanda. Em seguida, esse material é processado para remover todos os contaminantes e moído para constituir uma mistura de pó de alta qualidade, destinada a reutilização.

A empresa Linpac recicla 98% dos resíduos de PVC na fábrica de Pontivy (SpecialChem, 2017a). Os vapores e fumos libertados, como subprodutos do processo de fabrico, são capturados e condensados, para fabrico posterior de plastificantes, que são usados como aditivos para melhorar as propriedades de plasticidade dos materiais utilizados em produtos, como mangueiras de jardim. Os restantes 2% de resíduos de PVC são vendidos pela LINPAC a clientes para uso na fabricação de produtos rígidos e flexíveis, nomeadamente tubos, cabos, solas de sapatos e tapetes de automóveis. A Linpac reciclou 227 toneladas de resíduos de PVC em 2016, incluindo 42 toneladas de plastificantes que foram reaproveitados externamente. Nos últimos 10 anos, a Linpac reciclou mais de 3.000 toneladas de resíduos de PVC na sua unidade de Pontivy, quantidade que foi totalmente vendida para reutilização.

A empresa Tectum criou coberturas usando tubos de PVC reciclado (Figura 12.4 e Figura 12.5). Os tubos são cortados a meia secção e colocados em direções opostas para desviar a água para uma calha e daí para um recipiente de armazenamento de água, ambos feitos a partir de tubos de PVC reciclado. Os tubos são pré-montados em painéis para tornar a instalação mais rápida e económica (Kristen Tapping, 2021).



Figura 12.4 – Sistema pré-fabricado de recolha de água da chuva, na forma de coberturas isolantes, construídas a partir de tubos de PVC reciclado (Kristen Tapping, 2021)



Figura 12.5 – Desenho auto-cad de um conjunto de vivendas geminadas com o telhado constituído pelo sistema pré-fabricado de recolha de água da chuva da Tectum (Kristen Tapping, 2021)

Foi lançado um projeto piloto, financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional, designado “PVC Upcycling”, com o objetivo de recuperar o componente de PVC dos cabos elétricos e reciclá-lo em produtos com baixo nível de impacto ambiental, sob a forma de pó e grânulos de PVC, em produtos novos para construção (PRW, 2020).

A Inovyn introduziu uma linha de PVC de base biológica, designada *Biovyn*, usando uma cadeia de suprimentos totalmente certificada pela “Roundtable on Sustainable Biomaterials” (RSB). O material é

totalmente reciclável. Fabricado em Rheinberg, Alemanha, o *Biovyn* é feito com bioetileno, uma matéria-prima renovável derivada da biomassa que não tem efeitos na cadeia alimentar. O *Biovyn* é certificado pela RSB como substituindo 100% de matéria-prima fóssil no seu sistema de produção, permitindo uma economia de gases de efeito estufa de mais de 90%, em comparação com o PVC produzido convencionalmente (PRW, 2019c). Os resultados alcançados com este produto permitiram demonstrar que é possível substituir o uso de matérias-primas fósseis virgens sem comprometer a qualidade do produto final, em termos de durabilidade, flexibilidade e reciclabilidade; o que faz do PVC um dos plásticos sustentáveis mais usados no mundo.

A empresa Vynova, fabricante europeu de PVC, lançou o que é considerado a primeira linha mundial de resinas de PVC de características circulares, às quais atribuiu a marca “VynoEcoSolutions”. Estas resinas são certificadas sob a chancela da estrutura “International Sustainability & Carbon Certification” (ISCC), de acordo com uma abordagem de balanço de massa. As resinas são feitas nas instalações da empresa Vynova em Beek, na Holanda, e Mazingarbe, na França, usando matéria-prima de etileno “Trucircle” fornecida pelo fabricante de matérias primas SABIC, a partir da sua unidade em Geleen, na Holanda (CW, 2020). O etileno é produzido a partir de óleo resultante da pirólise química de resíduos de plástico reciclados, reduzindo as emissões de CO₂ em 50%. De acordo com a Vynova, as resinas circulares permitem obter produtos com a mesma qualidade e características de desempenho que os materiais convencionais de PVC. Os fabricantes de produtos finais podem, sem dificuldade, processar estas resinas em equipamentos convencionais, usados para fabricar produtos para aplicações rígidas e flexíveis.

12.6.2 Reciclados de PU

Desde 1996 que a Alemanha possui uma grande capacidade de reciclagem de resíduos de PU, para fabrico de tubos de aquecimento em pavimentos radiantes de edifícios (Weigand, 1996).

Em 2011, foi inventado um pavimento elástico permeável, que utiliza resíduos de PU reciclados, obtidos a partir de solas de sapatos, brinquedos, eletrodomésticos e veículos (Kang, 2006).

A adição de pós de PU micronizados, obtidos a partir de resíduos de PU flexível, a resinas de ureia-formaldeído e a resinas de fenol-formaldeído, melhora notavelmente o desempenho dos painéis preparados com essas resinas, nomeadamente contraplacado e aglomerado (Mansouri e Pizzi, 2007).

12.6.3 Reciclados de Poliolefinas (PP e PE)

O fabricante de matérias primas Borealis, adquiriu as recicladoras “MTM Plastics”, na Alemanha, e Ecoplast, na Áustria. A Borealis tem uma capacidade de produção anual de poliolefinas recicladas da ordem de 80.000 a 100.000 toneladas. A Borealis está a desenvolver uma tecnologia designada “Borcycle” para a produção de compostos a partir de poliolefinas recicladas, que é projetada para ser escalonável e modular, capaz de produzir reciclado de alta qualidade. O Borcycle é usado pela Borealis internamente para responder à procura crescente por materiais de polipropileno e polietileno de alta qualidade, com incorporação de reciclado (PRW, 2019a).

A empresa canadiana Greenmantra Technologies possui tecnologia para reciclar quimicamente LDPE, HDPE e PP pós-consumo e pós-industrial, e conversão em lubrificantes e aditivos para utilização no fabrico de plásticos e em outros materiais de construção, como asfalto e coberturas (CW, 2019). Recentemente, a Greenmantra começou a fornecer uma série de aditivos para a produção de compósitos de madeira-plástico à base de PE e PP composto de madeira-plástico, os quais conferem um aumento da resistência e da rigidez ao WPC.

Por fim, de destacar que já há alguns anos, Lu e Korman realizaram um estudo que mostra o potencial de aplicabilidade do PEAD reciclado reforçado com fibra de cânhamo para produtos aplicáveis na construção (Lu & Korman, 2013).

12.6.3.1 Baldes de tinta

Muitos dos baldes de tinta são feitos de polipropileno virgem, de boa qualidade. Os baldes de tinta contendo sobras de tinta à base de água não são considerados resíduos perigosos. Os baldes de tinta (vazios ou com sobras) são normalmente incinerados com "outros combustíveis", e não são incluídos numa fração reciclável, devido à incerteza quanto ao facto de estarem ou não efetivamente vazios, o que significa que as grandes quantidades de plástico que poderiam, em teoria, ser recicladas são incineradas (Plastic Zero, 2014).

No âmbito do projeto Plastic Zero, em 2014, foi realizada uma avaliação ambiental (avaliação do Ciclo de Vida, LCA), para determinar os impactes ambientais, na cidade de Copenhaga, originados pela introdução de uma recolha separada para a reciclagem de baldes de tinta (cenário 1), em oposição à incineração (cenário 2).

De acordo com a LCA realizada, a reciclagem de baldes de tinta na cidade de Copenhaga levaria a uma emissão reduzida de gases do aquecimento global de aproximadamente 150 kg CO₂-eq., por tonelada de baldes de tinta, o que equivaleria a uma economia total de 45 toneladas de CO₂ por ano, se todos os baldes de tinta na cidade de Copenhaga fossem reciclados (Plastic Zero, 2014).

O potencial de acidificação foi avaliado como sendo semelhante para os dois cenários, pois as emissões de gases ácidos (medidas em kg SO₂-eq.) não são substancialmente diferentes. Para a eutrofização pode haver um aumento da emissão por reciclagem, pois a substituição de energia é menor. Com base nesta avaliação do ciclo de vida, não se pôde concluir que qualquer um dos dois cenários tivesse um impacto menor nas categorias de toxicidade, uma vez que os resultados foram bastante semelhantes para os dois cenários.

Se a tinta pudesse ser reutilizada para outros fins que não a incineração, os encargos ambientais diminuiriam, pois a incineração da tinta leva a emissões líquidas (mais emissões diretas do que o benefício da substituição de energia) devido ao baixo poder calorífico. Se a tinta pudesse substituir outros produtos, melhoraria ainda mais o perfil ambiental do cenário. No entanto, a tinta seria de cores e qualidades mistas e, portanto, com aplicações limitadas.

Caso a cidade de Copenhaga tivesse uma maior utilização de energias renováveis, isso iria melhorar ainda mais a solução de reciclagem em comparação com a incineração, devido à redução da produção de energia proveniente da incineração, o que tornaria a incineração cada vez menos favorável.

Se apenas os baldes de tinta vazios fossem incluídos no sistema de reciclagem, o manuseamento seria mais fácil, pois deixaria de haver necessidade de limpeza manual. No entanto, a quantidade de plástico reciclado seria muito menor (em comparação com um sistema que inclui baldes com resíduos de tinta), e os benefícios ambientais correspondentemente também o seriam.

12.6.4 Reciclados de PS

A empresa canadiana “Greenmantra Technologies” começou, em 2019, um projeto conjunto com o fabricante Ineos de produtos estirénicos para converter quimicamente PS reciclado pós-consumo em monómeros, para alimentar o processo de polimerização da “Ineos Styrolution” (CW, 2019).

12.6.5 Reciclagem de misturas de plásticos

A Fraunhofer está a desenvolver uma matriz para compósitos de madeira-plástico (WPC) a partir de misturas à base de PP e/ou PE reciclados (PA, PMMA, ABS e PC), com serradura de madeira ou outras fibras de lignocelulose para melhorar as propriedades mecânicas.

A empresa “Plastinum Polymer Technologies” detém os direitos de patente de um processo mecânico para misturar plásticos imiscíveis, denominado Blendymer, que permite que os resíduos plásticos sejam totalmente reciclados em vez de depositados em aterro ou incinerados. É capaz de ligar polímeros que anteriormente eram considerados não compatíveis. A tecnologia “Blendymer”™ da Plastinum resolve os dois principais problemas dos plásticos reciclados (quantidade insuficiente e qualidade insatisfatória). Fornece material de alta qualidade, consistente e em quantidade ilimitada (graças à disponibilidade ilimitada de resíduos de plásticos misturados), e consegue fazê-lo a um preço estável e altamente competitivo. Em 2009, a Plastinum abriu uma linha de produção com capacidade de 10.000 toneladas/ano usando o seu processo de reciclagem Blendymer para a produção de termoplásticos “Infinymer” e “Ultrimer”, a partir de resíduos domésticos plásticos mistos pós-consumo.

A empresa de tecnologia de reciclagem de plástico, Recycling Technologies, em colaboração com o Centre for Sustainable Chemical Technologies (CSCT) da University of Bath, está a desenvolver um método de reciclagem química de misturas de plásticos, para criar moléculas que possam ser usadas para fabricar novos plásticos ou outros produtos de valor acrescentado. Visando aumentar a eficiência do processo, testaram a viabilidade de incorporar tecnologias analíticas (“Oscillating Baffle Reactor”) na máquina de pirólise da Recycling Technologies para melhorar a qualidade da matéria-prima, permitindo que esta possa ser usada na fabricação de novo plástico sem necessidade de pré-tratamento. De forma a aumentar a eficiência do processo de reciclagem química, desenvolveram uma parceria com a empresa “Optimal Industrial Automation”, de forma a melhorar a automação do processo de reciclagem (SpecialChem, 2021a).

Trata-se de um exemplo de sinergia, em que o conhecimento fundamental do CSCT em ciência de polímeros, catálise e avaliação do ciclo de vida e de engenharia das reações, se combinou com o

conhecimento industrial em tecnologias de reciclagem da NiTech e da Optimal para demonstrar a viabilidade de reciclagem química sustentável de resíduos plásticos mistos à escala industrial.

12.6.6 Reciclados de compósitos

Duas empresas do Reino Unido (Hambleside Danelaw e Filon), fabricantes de produtos para coberturas, desenvolveram processos de retificação mecânica para compósitos de fibra de vidro, usados em quantidades limitadas nos seus próprios produtos para coberturas (Job, 2010). A Filon apostou na melhoria da eficiência energética do processo de moagem, reduzindo assim os custos, e a Hambleside Danelaw apostou na retenção do comprimento das fibras, com vista a maximizar o valor do reciclado.

A empresa Recycled Carbon Fiber, anteriormente designada por Milled Carbon, tem uma instalação de pirólise em West Midlands com capacidade para processar 2.000 toneladas/ano de resíduos de fibra de carbono, e comercializa fibra de carbono reciclada em formas moídas e granuladas (Job, 2010).

A Universidade de Leeds desenvolveu um processo de pirólise para reciclagem de PRFV com um método onde os produtos da pirólise do fluido podem ser usados como combustível (Job, 2010).

Uma empresa dinamarquesa, ReFiber ApS, usa pirólise em resíduos de PRFV. As fibras de vidro resultantes são unidas com PP em placas de isolamento térmico (Job, 2010).

A empresa Firebird Advanced Materials Inc. (Raleigh, N.C., EUA) desenvolveu um método de reciclagem contínua por micro-ondas, usado para reciclar PRFC e PRFV (Job, 2010).

Investigadores da Washington State University desenvolveram um novo método para reciclar os plásticos contendo fibra de carbono (Wsu, 2019). O Prof. Jinwen Zhang, da Escola de Engenharia Mecânica e de Materiais, e a sua equipa, desenvolveram um novo método de reciclagem química que usa ácidos fracos, como catalisadores, em etanol líquido, a uma temperatura relativamente baixa para quebrar as cadeias de polímeros termoendurecíveis. Para quebrar os materiais curados, os investigadores aumentaram a temperatura do material de modo a que o líquido contendo o catalisador penetre no compósito e quebre a sua estrutura complexa. Zhang usou etanol para obrigar as resinas a expandirem e o cloreto de zinco para quebrar as ligações críticas de carbono-azoto. Assim, este método é capaz de preservar tanto as fibras de carbono como o material resinoso, de uma forma que possa ser facilmente reutilizada.

Investigadores da University of Maryland College Park, da Rice University e da University of California Merced, descobriram uma alternativa viável ao plástico, na forma de um compósito feito de uma mistura de grafite e celulose extraída da polpa de madeira (Zhou, 2019). O novo compósito usa ligações de hidrogênio entre flocos de grafite e celulose nanofibrilada (NFC) para criar um material extremamente forte. Em ensaios balísticos, de tração, de resistência à fratura e ao impacto, e de dureza superficial, o material apresentou resultados notáveis que rivalizam com o aço, ligas de alumínio, compostos de polietileno e até com fibras de carbono (Zhou, 2019). Os investigadores obtiveram valores de resistência à tração até 1 GPa, de tenacidade até 30 MJ/m³ e uma resistência específica de 794 MPa/g.cm⁻³, graças à baixa densidade do grafite e da celulose. Este material não é apenas mais forte

do que muitos aços, mas também seis vezes mais leve do que o aço, tendo uma resistência específica maior do que qualquer metal ou liga existente (incluindo ligas de titânio). A abordagem livre de solvente à temperatura ambiente é facilmente escalável e tem uma pegada ambiental muito menor do que os processos de fabrico de outros materiais estruturais de plástico ou metal. Além disso, o composto é completamente degradável em água a temperaturas mais altas. O composto pode ser revestido para resistir aos efeitos da água e da humidade durante a utilização. A equipa de investigação está confiante de que as propriedades mecânicas do composto de grafite-celulose podem ser aumentadas ainda mais, reduzindo também custos, para torná-lo um substituto ideal para os materiais não biodegradáveis existentes (Zhou, 2019).

Um estudo de investigação permitiu também obter reciclagem, bem-sucedida, de um compósito com matriz de alumínio, por via de um processo de eletrólise em cloreto de 1-butil3-metilimidazólio (Kamavaram, *et al.*, 2005),

12.7 Projetos e estudos relevantes

A Comissão Europeia, os Países da Comunidade Europeia e as Associações de Fabricantes Europeus têm vindo a implementar uma economia circular e a encorajar a reciclagem de plásticos e compósitos, financiando projetos de investigação nestas áreas.

Um projeto iniciado em 2010 por produtores europeus de PVC, denominado “Recovynil”, visa antecipar a recolha e a reciclagem do PVC usado.

Em 2015, o programa “VinylPlus” passou a apoiar também o consórcio de reciclagem Resysta, que produz um material semelhante à madeira, à base de casca de arroz e PVC, numa matriz polimérica homogénea. O programa permitiu reciclar 183 toneladas de PVC no primeiro ano, e passou a ser incluído nas futuras estatísticas do “VinylPlus” (PPE, 2016).

No contexto de um projeto alemão (LIFE 00 ENV/D/000348), foi construída uma instalação piloto para a produção de compósito de madeira-plástico (WPC), usando até 100% de PP reciclado.

Um outro projeto “LIFE”, coordenado pela Dinamarca (LIFE 04 ENV/DK/000070), visa a conversão completa de granulados em pó, proveniente de pneus usados, em produtos de borracha de alta qualidade, mediante a aplicação de técnicas de fase densa. O material reciclado é aplicável em pavimentos e em asfalto. O consórcio criou uma patente a fim de proteger essa tecnologia (Ignatyev; *et al.*, 2014).

A associação espanhola de plásticos AIMPLAS iniciou em 2019 o projeto “Enzplast” com o objetivo de desenvolver processos mais sustentáveis para a fabricação, reciclagem e compostagem de plásticos, o qual perspectiva desenvolver novos métodos de síntese química para obter plásticos de uma forma mais segura e ecológica, utilizando enzimas em vez de catalisadores metálicos. A AIMPLAS também está a estudar o uso de enzimas na reciclagem, incorporando-as na fase de lavagem para remover odores, bem como na separação de materiais multicamada. Por fim, também se insere no âmbito do projeto, a avaliação da eficácia de diferentes enzimas no processo de biodegradação de diversos bioplásticos.

O projeto da União Europeia “Remadyl,” financiado pelo programa Horizonte 2020, iniciado em junho de 2019, visa a recuperação de PVC e a redução do encaminhamento deste material para incineração e aterro, contribuindo para o Pacote de Economia Circular da UE e para as metas de eficiência de recursos para a Europa.

O projeto “Remadyl” visa ainda remover substâncias perigosas do PVC antigo, ou seja, do PVC aditivado com substâncias perigosas, sujeitas a restrições regulamentares, designadamente plastificantes à base de ftalato de baixa massa molecular (principalmente DEHP) e estabilizantes à base de metais pesados (principalmente chumbo). Este “PVC antigo” constitui a maior parte dos atuais resíduos pós-consumo de PVC rígido (por exemplo, caixilhos de janelas e tubos) e de PVC flexível (por exemplo, revestimentos de piso ou cabos) de PVC. A presença de aditivos perigosos constitui uma barreira à reciclagem do PVC, pois não existem atualmente soluções economicamente viáveis para a sua remoção. O projeto “Remadyl” visa desenvolver um processo inovador contínuo de uma única etapa, com base na tecnologia de extrusão extrativa em combinação com novos solventes e filtração por fusão, que tem o potencial de rejuvenescer o “PVC antigo” e transformá-lo em PVC de alta pureza, em conformidade com o REACH (Reach, 2006), destinado ao mercado de produtos de PVC rígido e flexível, a custos competitivos (Remadyl, 2019).

O projeto “Circular Flooring”, financiado pela UE, iniciado em junho de 2019, visa recuperar PVC usado em revestimentos de piso de PVC flexível, em fim de vida, que contenham “plastificantes banidos”, que não podem mais ser usados devido a questões de proteção do consumidor, e transformá-lo em produtos com qualidade equivalente a PVC virgem. A reciclagem de última geração desse tipo de revestimentos de piso ainda não é possível, pelo que esses produtos são frequentemente incinerados, destruindo-se irreversivelmente recursos valiosos. Este projeto atenderá ao desafio de estabelecer a circularidade de revestimentos de piso em PVC flexível com um processo inovador de reciclagem de plástico.

O processo consiste em reciclar esses revestimentos, mediante dissolução num solvente selecionado, de forma a remover as substâncias críticas, plastificantes de utilização restrita (ftalatos), para obter um material de PVC virgem de alta qualidade. Os ftalatos removidos serão transformados quimicamente em plastificantes não perigosos. Tanto o PVC reciclado, quanto o plastificante transformado, voltam a ser incorporados no ciclo de produção de novos revestimentos, respeitando princípios da economia circular (Circular flooring, 2019).

Investigadores do Instituto de Ciência Molecular (ICMOL) da Universidade de Valência estão a desenvolver aditivos sequestradores de radicais para remover estabilizantes térmicos à base de chumbo, de PVC com formulações antigas. Os investigadores já desenvolveram um processo de síntese à escala laboratorial para obter um material precursor, para apoiar o eliminador de chumbo, com base nos designados hidróxidos de camada dupla (LDHs). Este material precursor compreende camadas de catiões metálicos divalentes e trivalentes (por exemplo Mg^{2+} , Zn^{2+} ou Al^{3+}), com um espaço intercadas que pode ser ocupado por aniões de tamanhos diferentes (PPE, 2020). Recentemente, estes investigadores otimizaram uma síntese, em escala semipiloto, necessária para obter o material

precursor de LDH em maior escala, estando agora já aptos a produzir lotes de ZnAl-LDH usando equipamentos em escala industrial.

Usando os complexos sequestrantes de LDH, em combinação com métodos específicos de filtração, a associação espanhola de plásticos AIMPLAS está a testar várias formulações de PVC rígido, incluindo um tipo de PVC virgem aditivado com chumbo e amostras de PVC em fim de vida micronizadas, ambos fornecidos pela empresa alemã Deceuninck (PPE, 2020). O objetivo é testar várias malhas e configurações de filtro, bem como diferentes parâmetros de extrusão, para determinar a metodologia de remoção mais adequada. A seleção do filtro leva em consideração a dimensão das partículas inorgânicas nas formulações de PVC, tal como carbonato de cálcio e dióxido de titânio, frequentemente usados em produtos brancos de PVC rígido, constituintes de perfis de janela de cor branca (que é mais durável e conseqüentemente mais usada). No primeiro ensaio de filtração, usando uma extrusora de um parafuso, foi possível filtrar cargas minerais de grande dimensão do PVC, incluindo HDL pré-misturado (sem o complexo sequestrante). No entanto, ocorreu uma rápida saturação do filtro. Posteriormente, os resultados dos ensaios de otimização permitiram evidenciar que os materiais de enchimento, constituídos por grânulos de grande dimensão, podem ser filtrados, sem quebra do filtro, permitindo aumentar o rendimento do processo de extração. Foram ainda realizados outros ensaios com uma extrusora de duplo parafuso em contrarotação, usando um dispositivo especial para evitar a saturação do filtro, aumentando ainda mais a escala e o rendimento do processo (PPE, 2020).

13 | Conclusões

A reciclagem é um recurso fundamental para minimizar desperdícios e reduzir a poluição ambiental, e constitui uma abordagem estratégica para a gestão de resíduos de produtos plásticos de construção no fim da vida útil.

A reciclagem ajuda a conservar os recursos naturais e é progressivamente mais importante, quer numa perspetiva económica como ambiental. Os resultados mais recentes demonstram um aumento substancial na taxa de recuperação e de reciclagem de materiais plásticos de construção.

Por meio da reciclagem dos resíduos plásticos é possível produzir novos materiais, concluindo-se que esse processo pode reduzir a poluição ambiental e contribuir para a geração de emprego e por disponibilizar mais recursos humanos.

Complementarmente à reciclagem, o desenvolvimento de bioprodutos a partir de biomateriais e de fibras naturais, passou a ser relevante para um número significativo de indústrias e para uma série de aplicações, cada vez em maior quantidade na construção. Embora as aplicações de biocompósitos, com o objetivo de reduzir a energia incorporada em materiais de construção, já sejam numerosas, seja em aplicações com menores requisitos de desempenho ou em combinação com outros materiais de maior resistência, esses materiais ainda não são amplamente utilizados devido à sua suscetibilidade à degradação induzida pela ação da humidade, e por ainda não apresentarem um comportamento ao fogo tão bom quanto os materiais de construção convencionais, requerendo portanto desenvolvimentos futuros.

O que foi referido ao longo deste relatório e a informação existente na bibliografia da especialidade, permitem extrair as seguintes conclusões:

- O mercado de reciclagem de plásticos na Europa e no Mundo é relativamente robusto e o interesse na reciclagem de plásticos é cada vez maior, e será tanto maior quanto menor for o preço do plástico reciclado e quanto mais benefícios adicionais existirem;
- As quantidades de PVC reciclado (que é o plástico mais utilizado na construção), continuam a crescer ano após ano, o que demonstra que, quer os recicladores de PVC, quer os fabricantes de produtos acabados que usam PVC reciclado, especialmente no setor de tubos e perfis, estão a ter progressos e a apresentar bons resultados, pois já reciclaram 4,2 milhões de toneladas de PVC desde o ano 2000, tendo essa capacidade de reciclagem aumentado continuamente ao longo dos anos. De facto, todos os anos a indústria europeia de PVC aproxima-se de atingir a meta futura estabelecida para reciclagem de PVC, designadamente 800.000 toneladas em 2020, 900.000 toneladas em 2025 e 1 milhão de toneladas por ano entre 2025 e 2030 (PRW, 2018);
- O interesse pelos plásticos reciclados também é consequência da regulamentação e das políticas de gestão de resíduos. Parte do mercado de plástico reciclado tem sido estimulado por atos legislativos que fixam objetivos (Diretivas), como responsabilidades do produtor, metas

de reciclagem e impostos associados à incineração. As práticas e as regulamentações nacionais determinam, portanto, a quantidade e a qualidade obtida num determinado país. No entanto, até agora, as metas de reciclagem foram especificadas apenas para a quantidade a ser reciclada, e não para a qualidade do material reciclado;

- O preço do petróleo bruto, mas também a procura do plástico no mercado global (principalmente da China), são determinantes para formulação do preço do plástico reciclado;
- A pureza do reciclado também determina o preço e a aplicação do reciclado. A procura por parte do mercado é mais alta em relação aos produtos reciclados puros, como reprocessado industrial, que se inserem nas práticas correntes de fabrico de plástico e/ou funcionam como material diluidor na produção de plásticos virgens;
- A reciclagem de resíduos plásticos enfrenta desafios relacionados com os custos de recolha e de triagem, e com a qualidade dos resíduos recolhidos. A exportação para a Ásia tem sido, por muito tempo, a solução mais viável para as frações de resíduos plásticos menos valiosas. A falta de capacidade de tratamento dos resíduos plásticos mistos e os elevados custos associados ao reprocessamento, são algumas das causas da baixa procura nos mercados nacionais (Plastic Zero, 2013a);
- Embora o mercado possa beneficiar da existência de normalização e certificações comuns, a prática prevalecente tem-se baseado em acordos bilaterais menos formais, pois permitem especificações mais exatas baseada em documentação menos exaustiva (Plastic Zero, 2013a);
- A qualidade do plástico residual recebido nas instalações de triagem é um fator chave, especialmente para fluxos de resíduos de plásticos mistos. A separação eficiente dos resíduos plásticos na fonte é crucial, mas nem sempre é facilmente concretizada, pois requer experiência e conhecimento sobre as condições locais para motivar as pessoas a fazer a separação pretendida;
- A garantia de um fornecimento estável de plásticos reciclados, com características que tenham a menor variação possível, é fundamental para os fabricantes de produtos acabados, visando aplicações em determinados setores;
- As tecnologias de classificação e de reciclagem estão já bastante desenvolvidas para alguns tipos de resíduos de plástico, mas ainda há um grande potencial para o desenvolvimento de tecnologias de reciclagem e de aplicações de plásticos reciclados, numa grande variedade de produtos de plástico.

14 | Desafios

Deve-se manter a tendência no sentido de uma continuação de aumento da reciclagem. Porém, ainda existem alguns desafios significativos, tanto ao nível dos fatores tecnológicos como em relação a questões de comportamento económico ou social, relacionados com a recolha de materiais de construção em plástico reciclável e a substituição de produtos de construção de plástico virgem por reciclados.

A recuperação de materiais e produtos não deve ser apenas considerada no fim de vida, mas também ao nível de *design*. A escolha de materiais para o processo de produção (em termos de facilidade de classificação no final da sua vida útil) e o *design* do produto em termos de desmontagem final (por exemplo, evitar fixações de metal embutidas que são difíceis de separar antes da retificação) devem ser duas características chave a considerar no futuro, até porque o *design* de produtos recicláveis pode estimular o investimento nas infraestruturas de recolha, separação e reciclagem, mesmo em países onde essa infraestrutura ainda é inexistente.

O problema inevitável de reciclagem em ciclo descendente (“*downcycling*”) dos materiais continuará a exigir novas soluções tecnológicas e contínuos desenvolvimentos.

O desenvolvimento de técnicas de mistura para reciclagem mecânica de plásticos, na presença de compatibilizantes adequados, é uma característica fundamental para incrementar a reciclagem no futuro e o crescimento do mercado de materiais que possam compatibilizar fluxos de resinas mistas.

São necessárias soluções inovadoras para resíduos plásticos de processos de triagem, bem como para novos tipos de plásticos e materiais compósitos, atualmente não recicláveis. A reciclagem desses materiais constitui uma nova oportunidade de mercado para fabricantes de plásticos e para a indústria de reciclagem na Europa. A pesquisa e o desenvolvimento no negócio de compósitos reciclados podem ser motivados pelo estabelecimento de metas de reciclagem, tanto quantitativas como qualitativas, no setor de gestão de resíduos.

Integrar o *know-how* da reciclagem na cadeia de valor dos plásticos pode beneficiar ecológica e economicamente a indústria, o meio ambiente e a sociedade.

Outros aspetos importantes, e que constituem expectativa de desenvolvimento, são a medição da composição do polímero diretamente na máquina de reciclagem e a monitorização contínua da qualidade durante o processo de reciclagem.

Como é cada vez mais importante determinar a composição dos materiais reciclados, a natureza dos plásticos, a pureza do material, especialmente no que diz respeito à presença de metais pesados, e a sua massa molecular, bem como identificar se foram previamente reciclados, e em caso afirmativo, em que percentagem, também constituem novos desafios; são igualmente importantes os desenvolvimentos no campo da identificação e análise de plásticos reciclados por meio de técnicas já

existentes, designadamente ressonância magnética nuclear (NMR), cromatografia de permeação em gel (GPC), verificação inicial da produção (ICP) e fluorescência de raios-X (XRF).

Desenvolvimentos futuros na deteção de contaminação em fluxos de reciclagem, usando sistemas óticos e tecnologia de raios-X, também constituem um campo promissor.

A digitalização abre novas oportunidades para o planeamento, controle e organização dos processos de reciclagem industrial, através de um elevado grau de automação e acesso a sistemas de assistência e a ferramentas de informação, em plataformas desenvolvidas *online*. A rede digital é um passo importante no caminho para integrar o *know-how* de reciclagem na cadeia de valor dos plásticos.

O potencial de aplicação dos plásticos e compósitos de base biológica e biodegradável, na área da construção civil, requer o desenvolvimento de produtos de construção de alto desempenho, que exigem uma atuação em diversas direções. De entre estas destacam-se o tratamento e modificação da superfície das fibras e as tecnologias de conceção estrutural, pois são as que permitem atuar mais eficazmente sobre a ligação interfacial fibras-matriz, aspeto da maior importância para aumentar a durabilidade e desempenho destes materiais.

O fabrico de tubagem à base de bioplásticos é um desafio de grande relevo futuro, não só para redução de energia incorporada, como para, e principalmente, a redução da emissão de CO₂.

Outras inovações que permitiriam contribuir para melhorar o meio ambiente e criar plásticos mais ecológicos (“verdes”), seria conferir biodegradabilidade aos plásticos tradicionais, em produtos de baixa durabilidade, por exemplo adicionando substâncias que atraíam micróbios, fazendo com que o produto final se degrade mais rapidamente em aterros sanitários, ou remover os gases nocivos do ar (dióxido de carbono e monóxido de carbono), usando-os para fabricar produtos plásticos biodegradáveis.

15 | Recomendações

O relatório do Parlamento Europeu relativo ao debate sobre plásticos realizado pela EU em 2018, permitiu desenvolver uma estratégia Europeia para os plásticos na economia circular (Resolução 2035, 2019), (EC, 2019), reconhecendo que, embora o plástico desempenhe um papel útil na nossa economia e na nossa vida quotidiana, tem, ao mesmo tempo, efeitos adversos significativos. Assim, considera que o principal desafio consiste na gestão sustentável dos plásticos em toda a cadeia de valor e na consequente alteração da forma como produzimos e utilizamos os plásticos, de modo a preservar o valor da nossa economia, sem prejudicar o ambiente, o clima e a saúde pública.

Nesta estratégia, propõe-se promover o desenvolvimento de ações conjuntas e coordenadas, envolvendo todas as partes interessadas (“*stakeholders*”), em toda a cadeia de valor, incluindo os consumidores e os órgãos governamentais, para garantir o sucesso da reciclagem e incentivar a economia circular, visando alcançar um resultado vantajoso para a economia, o meio ambiente, o clima e a saúde.

Para além da EU, também várias associações de fabricantes e organizações ambientais têm recomendado a implementação de ações estratégicas que visem resolver os problemas ambientais resultantes da utilização de plásticos.

Serão necessárias novas iniciativas para desenvolver o mercado e aumentar a reciclagem e a reciclabilidade de resíduos plásticos, uma vez que parece improvável que a reciclagem de plástico aumente continuamente apenas motivada pela procura do mercado, dado que esta depende fundamentalmente do custo dos reciclados e da sua qualidade (que nem sempre é suficientemente boa para certas aplicações).

Indicam-se seguidamente, de forma resumida, as medidas estratégicas mais relevantes, classificadas a vários níveis:

a) Incentivos económicos:

- estimular o investimento contínuo em inovação para tecnologias de reciclagem;
- aumentar o investimento em infraestrutura de reciclagem;
- incentivar e apoiar a indústria de reciclagem de plásticos e fomentando a geração de empregos;
- promover a utilização de plásticos reciclados como substituto do plástico virgem;
- promover e premiar a inovação pioneira na utilização, produção e reaproveitamento de plásticos;
- aumentar os mercados sustentáveis para resíduos plásticos;
- criar condições de financiamento favoráveis para a construção de edifícios ecológicos;
- reduzir o IVA para produtos que contenham materiais reciclados.

b) Gestão:

- melhorar a interação entre empresas de reciclagem (recolha, separação e transformação);

- melhorar a gestão logística, como esquemas de recolha;
 - desenvolver e implementar estratégias para a aplicação sistemática de intervenções ecológicas em toda a cadeia de abastecimento da construção;
 - implementar programas que permitam rastrear a quantidade e tipos de materiais plásticos usados na construção, enviados para reciclagem, bem como a quantidade de plásticos reciclados usados em produtos novos aplicados em obras de construção.
- c) Regulamentação e legislação:
- implementar regulamentação consistente e complementar sobre reciclagem;
 - desencorajar a incineração e aterro;
 - incentivar os fabricantes a aumentar os volumes de reciclagem nos seus novos produtos;
 - complementar as metas quantitativas de reciclagem com metas qualitativas, a fim de alcançar uma qualidade do reciclado que possa substituir o plástico virgem e, assim, evitar a reciclagem em ciclo descendente de plásticos;
 - estabelecer metas diferenciadas para vários tipos/produtos de plástico, de forma a considerar a sua diversidade. Essas metas poderiam ajudar as autoridades locais na definição das frações de plástico residuais a recolher e nos respetivos métodos de tratamento;
 - alargar as obrigações nos programas de responsabilidade do produtor, com instrumentos que motivem os produtores a usar plástico reciclado nos seus produtos e/ou aumentar a reciclabilidade dos produtos;
 - diferenciar as taxas em programas de responsabilidade coletiva do produtor, de acordo com a reciclabilidade dos produtos, por exemplo, impondo taxas mais altas sobre materiais virgens ou produtos que contenham vários materiais, de forma a motivar os fabricantes a repensar o *design* do produto, utilizando, a título exemplificativo, materiais reciclados/recicláveis e facilitando a desmontagem do produto;
 - estabelecer objetivos para a fabricação de baixo carbono e a geração de empregos “verdes”;
 - melhorar os procedimentos de transporte e implementar regulamentos de remessa transfronteiriça;
 - envolver o setor da indústria do plástico em iniciativas de promoção do crescimento sustentável e iniciativas em torno da economia circular;
 - aumentar a implementação de análises de ciclo de vida para planeamento estratégico e estimativa de processos tecnológicos;
 - continuar a implementar regulamentos para reduzir o despejo de plásticos no mar;
 - limitar a fabricação e o consumo de produtos plásticos com vida útil curta;
 - aumentar as políticas de construção ecológica;
 - apoiar o desenvolvimento de indicadores baseados no ciclo de vida que podem ser necessários para facilitar a medição da eficiência de recursos e desempenho no setor de construção.

d) Normalização e certificação:

- desenvolver normas apropriadas para classificação de resíduos, visto que a fiabilidade do fornecimento é crítica para o desenvolvimento do produto;
- desenvolver técnicas de ensaio e de certificação para novos produtos.

e) Investigação e desenvolvimento tecnológico:

- fomentar a investigação e o desenvolvimento tecnológico na área de reciclagem de misturas de plásticos, de forma a encontrar soluções claras tanto científica quanto económicas;
- desenvolver tecnologias que ajudem a separar os resíduos plásticos provenientes de diferentes polímeros para reduzir a contaminação (atualmente, a maioria dos recicladores ainda separa os plásticos manualmente);
- desenvolver processos de reciclagem de compósitos e encontrar formas de usar efetivamente o material compósito reciclado em aplicações novas ou existentes;
- criar uma solução para a recolha e reaproveitamento eficiente de resíduos poliméricos dos oceanos;
- desenvolver aditivos estabilizadores que contenham antioxidantes e estabilizantes fotoquímicos, visando preservar o comprimento da cadeia dos polímeros reutilizados e, conseqüentemente, o nível original de desempenho;
- desenvolver mais produtos de construção de base biológica e biodegradável de elevado desempenho;
- compilar dados de ciclo de vida e dados de declarações ambientais de produto para plásticos de construção e materiais compósitos selecionados;
- desenvolver análises de ciclo de vida para avaliar e otimizar as condições de reciclagem para diferentes tipos de compósitos.

f) Produção industrial:

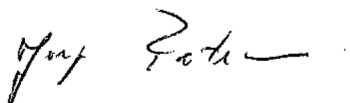
- implementar melhorias de *design* em produtos plásticos para facilitar a reciclagem (*design* para desmontagem);
- contribuir para facilitar a identificação e o *design* de produtos híbridos durante o processo de reciclagem;
- projetar polímeros totalmente biodegradáveis que possam substituir alguns polímeros não biodegradáveis atualmente em uso;
- projetar novos catalisadores, ativos e seletivos, para reações de oxidação em reciclagem termoquímica, a fim de evitar a formação de gases tóxicos nocivos;
- otimizar as tecnologias de produção através do desenvolvimento de sistemas práticos para processamento em larga escala de biocompósitos, tal como pultrusão e processos contínuos ou semicontínuos, para moldagem e laminação por compressão de painéis, placas, perfis planos e laminados (estruturas tipo sanduíche) com formas geométricas mais complexas, usados para revestimento de fachadas;

- supervisionar o uso de energia e as emissões durante o processamento de plásticos e compósitos, de forma a minimizar também o impacte ambiental e a energia incorporada nos produtos;
 - otimizar a industrialização, por meio de técnicas mais automatizadas e mediante introdução de nanotecnologias, para ter acesso ao mercado de aplicações estruturais de compósitos.
- g) Formação e divulgação:
- desencorajar o desperdício e abandono de plásticos por meio de campanhas de conscientização pública sobre o valor dos produtos plásticos;
 - ajustar regularmente a forma como os cidadãos e as empresas devem gerir os resíduos de plástico, mediante o fornecimento de informação de forma continuada;
 - manter e aumentar o apoio público à reciclagem, para atingir as metas de reciclagem estabelecidas;
 - promover ações de formação e treino, proporcionando aos trabalhadores conhecimentos de manuseamento em obra.

Lisboa, LNEC, junho de 2021

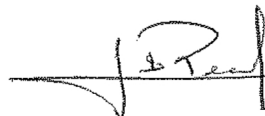
VISTOS

O Chefe do Núcleo de Acústica, Iluminação,
Componentes e Instalações



Jorge Viçoso Patrício

AUTORIA



Luís Pimentel Real

Investigador auxiliar

O Diretor do Departamento de Edifícios



Jorge M. Grandão Lopes

Referências bibliográficas

- ALAMPALLI; O'CONNOR; YANNOTTI, 2002 – **Fiber reinforced polymer composites for supestructure of a short-span rural bridge**. Composite Structures, Vol. 58-1, pp 21-27.
- BILLINGTON; *et al.*, 2014 – **Renewable Biobased Composites for Civil Engineering Applications**, in “Sustainable Composites. Fibers, Resins and Applications”, Chapter 11, Anil N. Netravali and Christopher M. Pastore (editors), 562 pages, DEStech Publications Inc., ISBN 978-1-60595-111-9.
- CASSAFORMA MURO, 2016 – **Disposable formworks for the simultaneous casting of foundation beams and the slab**. [Consulted in Marsh 2016]. Disponível em <http://www.daliform.com/pt/cofragem-muro/>.
- CASTRO; *et al.*, 2013 – **Sustainable waste recycling solution for the glass fibre reinforced polymer composite materials industry**. Construction and Building Materials, 45 pp. 87–94, 2013.
- CIRCULAR FLOORING, 2019 – **New products from waste PVC flooring and safe end-of-life treatment of plasticisers Ecofriendly recycling of PVC floor coverings**. Disponível em <https://cordis.europa.eu/project/id/821366>.
- CW, 2019 – **European Commission will classify TiO2 carcinogenic**. Compounding World, pp. 8, October 2019.
- CW, 2020 – **Vynova goes circular in PVC**. Compounding World, pp. 14, December 2020.
- DELOITTE, 2017 – **Resource Efficient Use of Mixed Wastes. Improving management of construction and demolition waste**. Final report for EU. EU Project Resource Efficient Use of Mixed Wastes. Specific Contract No 07.027727/2014/S12.697004IETUJENV.A2. 212 pp. outubro de 2017. Deloitte (FR), BRE (UK), ICEDD (BE), VTT (FI), RPS (UK), FCT Nova (PT).
- DL 102, 2020 – **DECRETO-LEI N.º 102-D/2020**, Diário da República n.º 239/2020, 1º Suplemento, Série I de 2020-12-10.
- DENKSTATT; *et al.*, 2010 – **The impact of plastics on life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions in Europe**. Product sustainability. Denkstatt Executive Summary Report, June 2010.
- EC, 2019 – **A European Strategy for Plastics in a Circular Economy**, EU, 23 pp., 2019. Disponível em <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/plastics-strategy-brochure.pdf>.
- EP, 2021 – **Report on the implementation of Regulation (EU) N° 305/2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products** (the Construction Products Regulation, 2020/2028 (INI)). fevereiro de 2021, Parlamento Europeu.
- ERT, 2015 – **The Powder Impression Moulding (PIM) Process Revolutionising the use of recycled plastics**, ERT Environmental Recycling Technologies plc. Disponível em <http://www.ertplc.com/pdfs/presentation/PIMProcessPresentation.pdf>, consultado em março de 2015.

- EUPC, 2014 – **The Plastics Industry: A strategic partner for economic recovery and sustainable growth in Europe**. Manifesto on the competitiveness of the plastics industry. European Plastics Converters Association (EuPC) and PlasticsEurope. 15 pp., disponível em <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/97-plastics-industry-strategic-partner-economic-recovery-and-sustainable-growth-europe>, consultado em outubro de 2019.
- EUROPEAN BIOPLASTICS, 2021 – **Bioplastics market data**, disponível em <https://www.european-bioplastics.org/market/>, consultado fevereiro de 2021.
- FARUK; SAIN, 2014 – **Biofiber Reinforcements in Composite Materials**, 1st Edition, Woodhead Publishing, 772 pp., ISBN 9781782421276.
- FRAUNHOFER, 2015 – **Recycling Plastics**, flyer from Fraunhofer Institute for Process Engineering and Packaging IVV, disponível em <http://publica.fraunhofer.de/starweb/pub09/ivv/servlet.starweb>, consultado em março de 2015.
- FUMIRE; TAN, 2015 – **How much recycled PVC in PVC pipes?** Paper presented to Plastic Pipes Conference Association (PPCA) conference. Barcelona. 2012.
- IGNATYEV; *et al.*, 2014 – **Recycling of Polymers: A Review**. ChemSusChem 2014, 7, 1579 – 1593 DOI: 10.1002/cssc.201300898.
- KHAIT; *et al.*, 2001 – **Solid-State Shear Pulverization**, CRC Press, 203 pp., 1st Edition, 2001. ISBN 9781566768030.
- KAMAVARAM; *et al.*, 2005 – **Recycling of aluminum metal matrix composite using ionic liquids: Effect of process variables on current efficiency and deposit characteristics**. Electrochimica Acta, 50, pp. 3286-3295, 2005.
- KANG, 2006 – **US Patent No. 7,125,199**, 2006.
- KEMONA; PIOTROWSKA, 2020 – **Polyurethane Recycling and Disposal: Methods and Prospects**. Polymers 2020, 12(8), 1752; Disponível em <https://doi.org/10.3390/polym12081752>.
- KOTEŠ; VIČAN, 2014 – **Using stay-in-place GFRP formwork and concrete slab as hybrid composite structure**, Paper presented to the 7th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2014), 20-22 August 2014. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/289179556_Using_stay-in-place_GFRP_formwork_and_concrete_slab_as_hybrid_composite_structure.
- KRISTEN TAPPING, 2021 – **Designing in a Circular Economy with PVC. Tectum: Tiled roof made of recycled PVC pipes**. Silver Winner of the PVC Redesign Competition 2019 sponsored by IOM3 & British Plastics Federation. February 2021, disponível em <https://kristentapping.com/tectum>, consultado em fevereiro de 2021.
- ISOPA, 2016 – **Recycling and Recovery of Polyurethanes. Foams from cars**. ISOPA – European Diisocyanate and Polyol Producers Association.
- JOB, 2010 – **Composite Recycling. Summary of recent research and development**. Knowledge Transfer Network, September 2010, disponível em <https://compositesuk.co.uk/system/files/documents/Composite%20Recycling.pdf>, consultado em outubro de 2019.

- LOTFI, 2011 – “**Plastic Recycling (online)**” disponível em <https://cllrpauljohnston.wordpress.com/information-pages/plastic-recycling/> consultado em outubro de 2019.
- LUYT, 2007 – **Editorial corner – a personal view. Are biodegradable polymers the solution to the world’s environmental problems?** eXPRESS Polymer Letters Vol.11, No.10 (2017) 764. Disponível em www.expresspolymlett.com, consultado em julho de 2007, <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2017.73>.
- LU; KORMAN, 2013 – Engineering Sustainable Construction Material: Hemp-Fiber-Reinforced Composite with Recycled High-Density Polyethylene Matrix. Journal of Architectural Engineering, 19(3), 204-208.
- MANSOURI; PIZZI, 2007 – **Recycled micronized polyurethane powders as active extenders of UF and PF wood panel adhesives.** Holz Roh-Werkstoff Volume 65, Issue 4, pp 293–299, 2007.
- MATWEB, 2016 – **MatWeb, Materials Property Data**, disponível em <http://www.matweb.com/search/PropertySearch.aspx>, consultado em janeiro de 2017.
- NAVODNIK, 2017 – **Gelclad natural materials and additives.** Deliverable D2.3 of the HORIZON 2020 project GELCLAD. EC Grant Agreement nº. 723425, NAVODNIK d.o.o. (NDK), Celje, Slovenia.
- NIKJE; *et al.*, 2011 – **Polyurethane Waste Reduction and Recycling: From Bench to Pilot Scales.** Designed Monomers and Polymers. 14:5, pp. 395-421, DOI: 10.1163/138577211X587618, disponível em <https://doi.org/10.1163/138577211X587618>, consultado em outubro de 2019.
- NOVA, 2021 – **For the first time: Growth rate for bio-based polymers with 8 % CAGR far above overall polymer market growth.** Press release, Nova-Institut GmbH., disponível em <http://nova-institute.eu/press/?id=237>, consultado em fevereiro de 2021.
- PLASTICSEUROPE, 2006 – **The Compelling Facts About Plastics. An analysis of European plastics production, demand and waste data for 2006.** *PlasticsEurope*, EuPC; EuPR & EPRO, 2008.
- PLASTICSEUROPE, 2009 – **The Compelling Facts About Plastics 2009. An analysis of European plastics production, demand and waste data for 2008.** *PlasticsEurope*, EuPC; EuPR & EPRO, 2009.
- PLASTICSEUROPE, 2010 – **Plastics – the Facts 2010. An analysis of European plastics production, demand and waste data for 2009.** *PlasticsEurope*, EuPC; EuPR & EPRO, 2010.
- PLASTICSEUROPE, 2011 – **Plastics – the Facts 2011. An analysis of European plastics production, demand and waste data for 2010.** *PlasticsEurope*, EuPC; EuPR & EPRO, 2011.
- PLASTICSEUROPE, 2012 – **Plastics – the Facts 2012. An analysis of European plastics production, demand and waste data for 2011.** *PlasticsEurope*, EuPC; EuPR & EPRO, 2012.
- PLASTICSEUROPE, 2013 – **Plastics – the Facts 2013. An analysis of European plastics production, demand and waste data.** *PlasticsEurope*, EuPC; EuPR & EPRO, 2013.
- PLASTICSEUROPE, 2014 – **Plastics – the Facts 2014. An analysis of European plastics production, demand and waste data.** *PlasticsEurope*, EuPC; EuPR & EPRO, 2014.
- PLASTICSEUROPE, 2015 – **Plastics – the Facts 2015. An analysis of European plastics production, demand and waste data.** *PlasticsEurope*, EuPC; EuPR & EPRO, 2015.

- PLASTICSEUROPE, 2016 – **Plastics – the Facts 2016. An analysis of European plastics production, demand and waste data.** *PlasticsEurope*, EuPC; EuPR & EPRO, 2016.
- PLASTICSEUROPE, 2017 – **Plastics – the Facts 2017. An analysis of European plastics production, demand and waste data.** *PlasticsEurope*, EuPC; EuPR & EPRO, 2017.
- PLASTICSEUROPE, 2018 – **Plastics – the Facts 2018. An analysis of European plastics production, demand and waste data.** *PlasticsEurope*, EuPC; EuPR & EPRO, disponível em https://www.plasticseurope.org/application/files/6315/4510/9658/Plastics_the_facts_2018_AF_web.pdf, consultado em outubro de 2019.
- PLASTICSEUROPE, 2019 – **Plastics - the Facts 2019. An analysis of European plastics production, demand and waste data.** Published on the occasion of the special show of K 2019 A project of the German plastics industry under the leadership of *PlasticsEurope Deutschland e. V.* and *Messe DÜsseldorf*. *PlasticsEurope*, EuPC; EuPR & EPRO. Disponível em https://www.plasticseurope.org/application/files/9715/7129/9584/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf, consultado em janeiro de 2021.
- PLASTICSEUROPE, 2020 – **Plastics - the Facts 2020. An analysis of European plastics production, demand and waste data.** *Plastics Europe & EPRO*, 2020.
- PLASTIC ZERO, 2012 – Plastic ZERO - Public Private Cooperations for Avoiding Plastic as a Waste. **Annex d32, action 4.1. Market conditions for plastic recycling.** Projeto UE LIFE10 ENV/DK/098, 2012.
- PLASTIC ZERO, 2013a – Plastic ZERO - Public Private Cooperations for Avoiding Plastic as a Waste. **Action 4.1: Market conditions for plastic recycling.** Projeto UE LIFE10 ENV/DK/098, 2013.
- PLASTIC ZERO, 2013b – Plastic ZERO - Public Private Cooperations for Avoiding Plastic as a Waste. **Action 4.2: Report on assessment of relevant recycling technologies.** Projeto UE LIFE10 ENV/DK/098, 2013.
- PLASTIC ZERO, 2014 – Plastic ZERO - Public Private Cooperations for Avoiding Plastic as a Waste. **Life Cycle Assessment of paint bucket recycling.** Projeto UE LIFE10 ENV/DK/098, 2014.
- PPE, 2016 – **Going around again: PVC recycling.** PIPE & PROFILE EXTRUSION, pp. 37-40, May 2016.
- PPE, 2020 – **Progress continues in PVC recycling.** PIPE & PROFILE EXTRUSION, pp. 27-30, June 2020.
- PROFWAKA, 2013 – Video tour of the Polymer Processing Laboratory at Bucknell University College of Engineering, highlighting the **Solid-State/ Melt Extrusion (SSME)**. 2013, Profwaka disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=e5UDGDrzxc>, consultado em dezembro de 2019.
- PRW, 2018 – **PVC industry stands by its recycling record.** PLASTICS RECYCLING WORLD, pp. 11-15, November/December 2018.
- PRW, 2019a – **Borealis works on optimising recycling process units.** PLASTICS RECYCLING WORLD, pp. 31-34, September/October 2019.
- PRW, 2019b – **Helping recyclers to keep on top of quality.** PLASTICS RECYCLING WORLD, pp. 45-48, November/December 2019.

- PRW, 2019c – **PVC recycling on track to meet 2020 target**. PLASTICS RECYCLING WORLD, pp. 37-43, November/December 2019.
- PRW, 2020 – **PVC recycling branches out to medical products**. PLASTICS RECYCLING WORLD, pp. 27-32, November/December 2020.
- PVC4CABLES, 2017 – **The European PVC cables sector plugs into innovation and sustainability**, PVC4Cables, Brussels, 2017. Disponível em <https://www.pvc4cables.org/en/media-en/news/item/92-prconf>.
- REAL, 2017 – **Biocomposites. A Sustainable Alternative to Construction**. 2nd Global Congress & Expo on Materials Science & Nanoscience, September 2017, Valencia, Spain.
- REACH, 2006 – **Regulamento (CE) n.º 1907/2006 do Parlamento Europeu e do Conselho de 18 de dezembro de 2006, relativo ao registo, avaliação, autorização e restrição de substâncias químicas (REACH)**, Bruxels: CE, 2006
- RESOLUÇÃO 2035, 2018 – **Resolução do Parlamento Europeu, de 13 de setembro de 2018, sobre uma estratégia europeia para os plásticos na economia circular**, Disponível em https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-8-2018-0352_PT.html.
- REMADYL, 2019 – **Removal of Legacy Substances from polyvinylchloride (PVC) via a continuous and sustainable extrusion process**. <https://cordis.europa.eu/project/id/821136>.
- REMY; *et al.*, 2011 – **Cement composite stay-in-place formwork: A concept for future building systems**. Paper presented to 18th International Conference on Composite Materials, 21-26 August 2011. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/289404181_Cement_composite_stay-in-place_formwork_A_concept_for_future_building_systems.
- RIBEIRO; *et al.*, 2011 – **Reusability assessment of thermoset polymeric composite wastes as reinforcement and filler replacement for polymer concrete materials**, paper presented to 18th International Conference on Composite Materials (ICCM), South Korea, Jeju Island, 21-26 August 2011.
- RITCHIE, 2018 – **Plastic Pollution**. Published online at OurWorldInData.org. disponível em <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>, consultado em janeiro de 2021.
- ROSATO, 2016 – **Oxo degradation; a simmering debate**. disponível em <https://polymer-additives.specialchem.com/tech-library/article/oxodegradation-debate>, consultado em abril de 2017.
- SHONFIELD, 2008 – **LCA of Management Options for Mixed Waste Plastics. Final Report**. WRAP Project code MDP017. ISBN: 1-84405-397-0. June 2008.
- SPECIALCHEM, 2017a – **LINPAC Recycles 98% of PVC Waste at Pontivy Site**, 2017, disponível em <https://polymer-additives.specialchem.com/news/industry-news/pvc-recycling-linpac000186353>, consultado em outubro de 2019.
- SPECIALCHEM, 2017b – **VinylPlus Initiative Collects 12% more PVC Waste in UK**, disponível em <https://polymer-additives.specialchem.com/news/industry-news/vinylplus-initiative-more-pvc-waste2016-000188561>, consultado em março de 2018.

- SPECIALCHEM, 2021a – **Industry News. New Method to Enable Mixtures of Plastics to be Recycled Together.** disponível em <https://polymer-additives.specialchem.com/news/industry-news/mixtures-of-plastics-to-be-recycled-together000223612>, consultado em janeiro de 2021.
- SPECIALCHEM, 2021b – **Industry News. New Partnership Supports Development of Chemical Recycling Solution for Plastics.** disponível em <https://polymer-additives.specialchem.com/news/industry-news/partnership-chemical-recycling-solution-for-plastics000223742>, consultado em janeiro de 2021.
- STICHNOTHE; AZAPAGIC, 2013 – **Life Cycle Assessment of Recycling PVC Window Frames.** Resources, Conservation and Recycling.;71:40-47. 2013.
- IGNATYEV; *et al.*, 2014 – **Recycling of polymers: a review.** CHEMSUSCHEM. DOI: 10.1002/CSSC.201300898.
- UNEP-SBCI, 2012 – **Greening the Building Supply Chain report. Action Framework.** United Nations Environment Programme - Sustainable Buildings and Climate Initiative. October 2012.
- WRAP, 2008 – **Domestic Mixed Plastics Packaging Waste Management Options.** Banbury, UK, Waste & Resources Action Programme (WRAP). 2008.
- WRAP, 2012 – **Collection and sorting of rigid household plastic waste.** Waste & Resources Action Programme (WRAP). Waste Z Resources, Banbury, UK. 2012.
- WEIGAND, 1996 – **Properties and applications of recycled polyurethanes** in: “Recycling and recovery of plastics” Branderup, J., Bittner, M., Menges, G., Micheali, W. (Editors). Hanser, München (Germany) 1996, section 7.10.
- WHITTLE; PESUDOVS, 2007 – **Collection and recycling of plastics pipes in the demolition and construction waste stream.** Plastics, Rubber and Composites 36:5, pp. 190-193, DOI: [10.1179/174328907X191260](https://doi.org/10.1179/174328907X191260).
- WSU, 2019 – **Global Fiberglass Solutions**, in collaboration with Washington State University, creates chemical recycling solution for carbon fiber composites, disponível em <https://cmec.wsu.edu/2019/05/07/global-fiberglass-solutions-in-collaboration-with-washington-state-university-creates-chemical-recycling-solution-for-carbon-fiber-composites/>, consultado em outubro de 2019.
- YATIM; *et al.*, 2003 – **Biocomposites for the construction materials and structures.** Faculty of Civil Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, pp. 29, disponível em https://www.academia.edu/1266940/biocomposites_for_the_construction_materials_and_structures, Consultado em fevereiro de 2016.
- YAZDANBAKSH; BANK, 2014 – **Critical Review of Research on Reuse of Mechanically Recycled FRP Production and End-of-Life Waste for Construction.** Polymers 2014, 6, pp. 1810-1826; ISSN 2073-4360; doi:10.3390/polym6061810.
- ZEVENHOVEN, 2004 – **Treatment and Disposal of Polyurethane Wastes: Options for Recovery and Recycling.** Report TKK-ENY19. Energy Engineering and Environmental Protection. Espoo, June 2004. ISBN 951-22-7161-3 (pdf version).

ZHOU; *et al.*, 2019 – **A printed, recyclable, ultrasstrong, and ultratough graphite structural material**. *Materials Today*, in Press, <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2019.03.016>.

