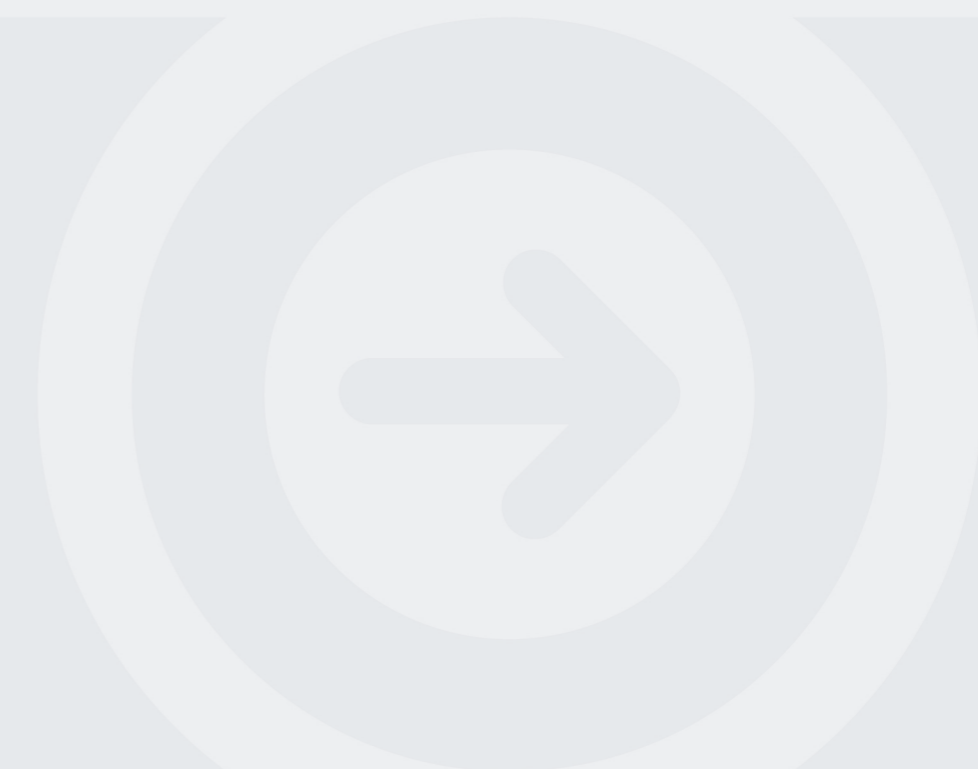


## Perfis Compósitos Pultrudidos Para Sistemas de Cofragens a Partir de Matriz Termoplástica Reciclada

MARCO AURÉLIO RESCHETTI

Julho de 2019



# **PERFIS COMPÓSITOS PULTRUDIDOS PARA SISTEMAS DE COFRAGENS A PARTIR DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA RECICLADA**

MARCO AURELIO RESCHETTI

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE CONSTRUÇÕES**

Orientador: Professor José Manuel Martins Soares de Sousa

Co-Orientador: Professor Púria Esfandiari

**JULHO DE 2019**



# ÍNDICE GERAL

|  |      |
|--|------|
| Índice Geral .....   | iii  |
| Resumo.....  | v    |
| Abstract .....   | vii  |
| Agradecimentos .....                                       | ix   |
| Índice de Texto .....                                      | xi   |
| Índice de Figuras.....                                     | xiii |
| Índice de Tabelas.....                                     | xvii |
| Abreviaturas .....   | xix  |
| CAPÍTULO 1    Introdução.....                              | 1    |
| CAPÍTULO 2    Sistema de Cofragens Para Betão Armado ..... | 7    |
| CAPÍTULO 3    Economia Circular .....                      | 19   |
| CAPÍTULO 4    Compósitos .....                             | 37   |
| CAPÍTULO 5    Procedimento Experimental .....              | 45   |
| CAPÍTULO 6    Considerações Finais.....                    | 61   |
| Referências Bibliográficas .....                           | 67   |
| Anexo.....   | 71   |



## RESUMO

A escassez de recursos naturais e os impactos ambientais causados pela indústria da construção civil têm motivado o desenvolvimento de novos materiais e práticas integradas às três vertentes da sustentabilidade: ambiental, social e econômica. A mudança da economia linear atual, com base no processo de *extrair-transformar-usar-rejeitar*, para um processo circular é inevitável, neste novo modelo são preservados os recursos que já estão em uso e mantido seu valor econômico mais elevado pelo maior tempo possível. A economia circular é a oportunidade da indústria da construção civil se reinventar, atingindo melhores níveis de eficiência e produtividade, além de reduzir significativamente a dependência de combustíveis fósseis, uso de recursos e geração de resíduos. Particularmente as estruturas de betão armado possuem elevado valor energético por utilizarem em larga escala o cimento e poderiam absorver resíduos de outras indústrias, seja na sua composição ou no seu sistema de montagem em obra (cimbres e cofragens), como é o caso do presente trabalho que propõe a utilização de painéis a partir de compósitos de matriz termoplástica reciclável para sistemas cofrantes. Para tal, produziu-se pré-impregnados por um processo inovador de deposição de polímero em pó (PET reciclado) e seguidamente transformou-se em perfis compósitos por pultrusão. Este processo de fabrico deu origem a perfis compósitos que permaneceram em contato com argamassa de cimento e óleo descofrante durante o período de cura, simulando as duas condições em que as cofragens normalmente são solicitadas. Em diferentes períodos de cura da argamassa, os provetes foram ensaiados a flexão, testando assim a influência do meio altamente alcalino nas propriedades mecânicas do compósito. Os resultados apresentaram elevados valores de módulo de elasticidade e excelente resistência para o uso em cofragens, além de se concluir que o meio alcalino não afetou o desempenho dos perfis compósitos.

**Palavras-chave:** Economia Circular; Cofragens, Painéis Compósitos, Pultrusão;



## ABSTRACT

The scarcity of natural resources and the environmental impacts caused by the construction industry have motivated the development of new materials and practices integrated to the three aspects of sustainability: environmental, social and economic. The change from the current linear economy, based on the process of *extract-transform-use-reject*, to a circular process is inevitable, in this new model are preserved resources that are already in use and maintained their highest economic value for as long as possible. Circular economics is the opportunity for the construction industry to reinvent itself, achieving better levels of efficiency and productivity, and significantly reducing dependence on fossil fuels, resource use and waste generation. In particular, reinforced concrete structures have a high energy value because they use cement in large scale and could absorb waste from other industries, either in their composition or in their on-site assembly system (formworks). Therefore, the present work proposes the use of panels from recyclable thermoplastic matrix composites for cofrant systems. For this, prepregs were produced by an innovative powder deposition process (recycled PET) and then made into composite profiles by pultrusion. This manufacturing process gave rise to composite profiles that remained in contact with cement mortar and desorbing oil during the curing period, simulating the two conditions in which the formers are normally required. At different cure times of the mortar, the test specimens were flexed, thus testing the influence of the highly alkaline medium on the mechanical properties of the composite. The results presented high values of modulus of elasticity and excellent resistance for use in formwork, in addition to the conclusion that the alkaline medium did not affect the performance of the composite profiles.

**Keywords:** Circular Economy; Formworks; Composite Panels; Pultrusion.



## **AGRADECIMENTOS**

Ao engenheiro José Manuel Martins Soares de Sousa, por acreditar na pesquisa desde o início, pela disponibilidade e acompanhamento essencial para o desenvolvimento deste trabalho. Ao co-orientador Engenheiro Púria Esfariandi pela dedicação junto ao laboratório de compósitos, transmitindo o seu valioso conhecimento dos processos de produção e das características dos materiais. Agradeço também a Engenheira Maria da Luz pela ajuda prática no laboratório de materiais de construção do ISEP.

Um agradecimento especial aos colegas Bruno Veríssimo, Eduardo Soares, Débora Sofia, Catarina Pereira, Pedro Geraldês e tantos outros amigos que seguiram comigo nesta caminhada. À toda a minha família que é a base para este desenvolvimento, à Natalia pelo apoio incondicional no trabalho e na vida.



## ÍNDICE DE TEXTO

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1.1   | Considerações Iniciais .....  | 1  |
| 1.2   | Objetivos .....   | 5  |
| 1.3   | Justificativa .....   | 5  |
| 1.4   | Estrutura do Trabalho .....   | 6  |
| 2.1   | Cofragens Recuperáveis Tradicionais .....                                 | 10 |
| 2.2   | Cofragens Recuperáveis Semi-Racionalizadas .....                          | 12 |
| 2.3   | Cofragens Recuperáveis Racionalizadas .....                               | 14 |
| 2.3.1 | Cofragens Racionalizadas Ligeiras – Sistemas de Painéis para Paredes..... | 15 |
| 2.3.2 | Cofragens Racionalizadas Ligeiras – Sistemas de Painéis para Lajes.....   | 17 |
| 2.3.3 | Cofragens Racionalizadas Ligeiras – Superfície Cofrante Vigada .....      | 18 |
| 3.1   | Definições e Conceitos.....   | 19 |
| 3.2   | Fundamentos da economia circular .....                                    | 22 |
| 3.2.1 | Biomimética.....  | 22 |
| 3.2.2 | Cradle to Cradle .....  | 26 |
| 3.2.3 | Ecologia Industrial .....   | 27 |
| 3.3   | Enquadramento Legal para Gestão de Resíduos na União Europeia .....       | 29 |
| 3.4   | Plano de Ação para a Economia Circular na Comunidade Europeia.....        | 31 |
| 3.4.1 | A Transição em Portugal.....  | 32 |
| 3.5   | A Nova Economia do Plástico .....   | 33 |
| 4.1   | Compósitos de Matriz Polimérica.....                                      | 38 |
| 4.1.1 | Matrizes Termoplásticas.....  | 40 |
| 4.1.2 | Fibras de Reforço .....   | 41 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.2   | Processamento de Materiais Compósitos .....                                   | 42 |
| 4.2.1 | Impregnação por Mistura Íntima de Pó Termoplástico com Fibras de Reforço..... | 42 |
| 4.2.2 | Pultrusão.....  | 43 |
| 5.1   | Matérias Primas .....   | 45 |
| 5.1.1 | Fibra de Reforço.....   | 45 |
| 5.1.2 | Matriz Termoplástica.....   | 46 |
| 5.2   | Produção de Pré-Impregnados .....   | 47 |
| 5.3   | Transformação de Pré-Impregnados por Pultrusão .....                          | 50 |
| 5.4   | Contacto com Meio Alcalino .....  | 52 |
| 5.5   | Contacto com Óleo Descofrante.....  | 55 |
| 5.6   | Ensaio de Flexão.....   | 56 |
| 5.6.1 | Tensão de Rotura.....   | 58 |
| 5.6.2 | Deformação .....  | 58 |
| 5.6.3 | Módulo de Elasticidade à Flexão .....   | 59 |
| 6.1   | Conclusões .....  | 61 |
| 6.2   | Desenvolvimentos Futuros .....  | 65 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1 - Objetivos Para o Desenvolvimento Sustentável [3] .....                               | 2  |
| Figura 1.2 - Mudança de Paradigma no Processo Produtivo [2] .....                                 | 2  |
| Figura 1.3 - Principais Tipos de Plásticos e os Respectivos Usos [13] .....                       | 4  |
| Figura 1.4 – Perfis Compósitos Pultrudidos Utilizados na Construção Civil [32] .....              | 4  |
| Figura 2.1 - Cofragem Tradicional e a Utilização de Madeira [8] .....                             | 10 |
| Figura 2.2 – Escoras e Solhos (tábuas) vulgarmente utilizadas em cofragens tradicionais [8] ..... | 11 |
| Figura 2.3 - Carpinteiros a trabalhar nos moldes tradicionais em madeira [9].....                 | 12 |
| Figura 2.4 - Cofragem tradicional melhorada [8] .....   | 13 |
| Figura 2.5 - Exemplos de Acessórios para Cofragens [8].....                                       | 13 |
| Figura 2.6 – Exemplo de cofragem de paredes racionalizada ligeira [Fonte: o autor].....           | 15 |
| Figura 2.7 - Ligações com Auxílio de varões ridificadores [9] .....                               | 15 |
| Figura 2.8 - Exemplo de Grampos de Fixação [9] .....  | 16 |
| Figura 2.9 - Ancoragens Entre Painéis [9] .....   | 16 |
| Figura 2.10 - Sistema ULMA de cofragem em alumínio para lajes maciças em betão [9] .....          | 17 |
| Figura 2.11 - Sistema Racionalizado Recuperável de Painéis para Lajes em Betão [9].....           | 17 |
| Figura 2.12 - Sistema de Escoramento Duplamente Vigado MULTIFLEX da Empresa PERI [9].....         | 18 |
| Figura 3.1 - Economia Linear x Economia Circular [13] .....                                       | 19 |
| Figura 3.2 - Diagrama Ilustrativo de Funcionamento da Economia Circular [13] .....                | 20 |
| Figura 3.3 – Pormenores da Produção da Teia de Aranha [16] .....                                  | 24 |
| Figura 3.4 – Aspectos da Flor de Lótus e o <i>Efeito Lótus</i> [16].....                          | 25 |
| Figura 3.5 – Blocos de Betão Auto-limpantes em Roma, 2003 [18].....                               | 26 |
| Figura 3.6 – Fluxo de Materiais no Ciclo <i>Cradle-to-Cradle</i> (Berço a Berço) [18] .....       | 27 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.7 - Exemplo do Fluxo de Materiais em Indústria na Dinamarca [21] .....                          | 28 |
| Figura 3.8 – Aumento na Produção de Plásticos [13].....  | 33 |
| Figura 3.9 - Limites de Consistência dos Materiais (Limites de Atterberg) [25].....                      | 34 |
| Figura 4.1 - Classificação dos Compósitos Consoante ao Reforço [24].....                                 | 37 |
| Figura 4.2 – Porcentagem de Compósitos Utilizados na Estrutura do Boeing 787 [27].....                   | 38 |
| Figura 4.3 – Consumo de Compósitos na Indústria Aeroespacial (adaptado) [29].....                        | 39 |
| Figura 4.4 - Relação entre o Módulo de Elasticidade e o Aumento da Temperatura [28].....                 | 40 |
| Figura 4.5 - Diferentes Cortes e Formatos de Fibra de Vidro [32] .....                                   | 41 |
| Figura 4.7 - Equipamento Utilizado para Produção de Pré-Impregnados (Towpreg) no ISEP [29].....          | 43 |
| Figura 4.9 – Equipamento à esquerda: Pultrusora; Equipamento à direita: Towpreg [29] .....               | 44 |
| Figura 5.1 – Matriz Termoplástica de PET Reciclado em Pó [Fonte: o autor] .....                          | 46 |
| Figura 5.2 – Diferentes partes do Equipamento de Produção de Towpreg [29].....                           | 47 |
| Figura 5.3 – Vista Lateral do Módulo 1 [29] .....  | 47 |
| Figura 5.4 – Espalhador em Acrílico e a Alimentação de Ar Comprimido [29] .....                          | 48 |
| Figura 5.5 – Forno de Convecção Forçada [Fonte: o autor] .....   | 48 |
| Figura 5.6 – Tina e Mergulhador com Matriz Termoplástica em Pó [29].....                                 | 49 |
| Figura 5.7 – Forno de Consolidação [29] .....  | 49 |
| Figura 5.8 – Etapa final do Processo: Enrolador [Fonte: o autor] .....                                   | 50 |
| Figura 5.9 – Pultrusora Instalada no ISEP [Fonte: o autor] .....   | 50 |
| Figura 5.10 – Vista Lateral do Fornecimento dos Rovings – Etapa Inicial [29].....                        | 51 |
| Figura 5.11 – Molde Utilizados no Fabrico dos Perfis Compósitos Pultrudidos [29] .....                   | 51 |
| Figura 5.12 – Sistema de Puxo [Fonte: o autor] .....   | 52 |
| Figura 5.13 – Identificação de Provetes, dimensões próprias para o Ensaio de Flexão [Fonte: o autor] ... | 52 |
| Figura 5.14 – Misturadora e os Materiais Utilizados na Argamassa [Fonte: o autor].....                   | 53 |
| Figura 5.15 – Provetes em Contacto com Meio Alcalino (10mm espessura argamassa) [Fonte: o autor]         | 54 |
| Figura 5.16 – Argamassa Retirada dos Provetes [Fonte: o autor].....                                      | 54 |
| Figura 5.17 – Óleo descofrante utilizado no procedimento experimental [Fonte: o autor].....              | 56 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 5.18 – Equipamento Utilizado para o Ensaio de Flexão [Fonte: o autor].....   | 56 |
| Figura 5.19 – Ensaio de Flexão Após Deflexão do Provete [Fonte: o autor] .....  | 57 |
| Figura 5.20 – Paquímetro e a Medição dos Provetes [Fonte: o autor] .....  | 57 |
| Figura 6.1 – À esquerda: betão cofrado com painel metálico e à direita: aspecto final da argamassa<br>cofrado com perfil compósito [Fonte: o autor] ..... | 64 |



## ÍNDICE DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 2.1 – Diferentes Parâmetros que Influenciam no Prazo de Descimbramento [8] .....                         | 9  |
| Tabela 2.2 - Classificação das cofragens racionalizadas [9] .....   | 14 |
| Tabela 3.1 - Lista de Matérias-primas Críticas para a União Europeia e Potenciais Tecnologias [23] .....        | 30 |
| Tabela 3.2 – Porcentagem de PET nos Resíduos Plásticos Urbanos [24] .....                                       | 35 |
| Tabela 4.1 - Característica das Fibras em Relação aos Materiais na sua Forma Maciça [24] .....                  | 41 |
| Tabela 5.1 - Propriedades típicas de matrizes termoplásticas usadas em compósitos [29] .....                    | 46 |
| Tabela 5.2 - Características dos cimentos CEM I 42,5R (NP EN 197-1) [Fonte: Ficha Técnica: <i>CIMPOR</i> ] .... | 54 |
| Tabela 5.3 – Numeração dos Provetes e Períodos de Exposição Exterior [Fonte: o autor] .....                     | 55 |
| Tabela 5.4 – Resultados do Ensaio de Flexão Aplicado o Intervalo de Confiança [Fonte: o autor] .....            | 60 |
| Tabela 6.1 – Comparativo Entre Diferentes Materiais Estruturais [Fonte: o autor] .....                          | 62 |
| Tabela 6.2 – Gráfico Resumo [Fonte: o autor] .....  | 63 |



## **ABREVIATURAS**

ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

ONU – Organizações das Nações Unidas

UE – União Européia

EC – Economia circular

IE – Ecologia industrial

Tex – Peso linear de fibra

PET – Politereftalato de Etileno

PVC – Policloreto de vinilo

PAEC – Plano de Acção para a Economia Circular

ISO - Organização Internacional de Normalização

IPQ – Instituto Português de Qualidade



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Conforme projeções oficiais da Organização das Nações Unidas (ONU), atingiremos 9,8 bilhões de pessoas no planeta em 2050, conseqüentemente a demanda por recursos naturais deverá aumentar rapidamente e estima-se que serão necessários mais de 186 mil milhões de toneladas de recursos naturais (três vezes maior que a necessidade atual). Os dados também apontam para a concentração de metade deste crescimento da população mundial em apenas nove países: Índia, Nigéria, República Democrática do Congo, Paquistão, Etiópia, República Unida da Tanzânia, Estados Unidos da América, Uganda e Indonésia (ordenados pelas respectivas estimativas de crescimento). Esta concentração majoritariamente nos países mais pobres representa um desafio considerável para os respectivos governos na implementação de políticas de Desenvolvimento Sustentável. [1]

Neste contexto, o inevitável incremento nas obras de engenharia civil, normalmente sinónimo de evolução de um país, traz consigo elevados impactes ambientais e uma incerteza progressiva quanto aos níveis de recursos naturais disponíveis. A nova sociedade de consumo pós-revolução industrial permitiu o avanço das indústrias de transformação e melhorias nos produtos ofertados a sociedade, porém o sistema económico linear (extração, produção, consumo e descarte) assenta-se no falso pressuposto de que existe uma quantidade ilimitada de energia e recursos disponíveis, que a sua regeneração é possível de imediato e que os efeitos negativos deste processo podem ser facilmente absorvidos.

No início da década de 70 surgiram as primeiras definições de sustentabilidade e as primeiras políticas públicas, até que em 1987 foi apresentado no relatório de Brundtland um conceito inovador de desenvolvimento sustentável: “entende-se o desenvolvimento que satisfaz as necessidades atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras para satisfazerem as suas próprias necessidades”. Em 1991 surge no Programa das Nações Unidas para o Ambiente e do Fundo Mundial para a Natureza outra definição complementar a anterior: “desenvolvimento sustentável significa melhorar a qualidade de vida sem ultrapassar a capacidade de carga dos ecossistemas de suporte”. Um ano mais tarde houve a Conferência das Nações Unidas sobre Ambiente e Desenvolvimento no Rio de Janeiro, donde resultou o documento designado por Agenda 21, em que se definem recomendações e estratégias a serem

implementadas até ao início do século XXI, local e globalmente, em todas as vertentes do desenvolvimento sustentável. [2]

Mais recentemente em 2015, a ONU definiu 17 objetivos do desenvolvimento sustentável para uma mudança sistémica, envolvendo diversos sectores da sociedade em uma agenda de ação até 2030, na tentativa de erradicar a pobreza, promover a prosperidade e o bem-estar de todos, proteger o meio ambiente e combater as alterações climáticas. [3]



Figura 1.1 - Objetivos Para o Desenvolvimento Sustentável [3]

A economia circular é apontada como modelo económico que atende às necessidades humanas e distribui de forma justa os recursos mobilizados sem prejudicar o funcionamento da biosfera ou ultrapassar quaisquer limites físicos do planeta. Este modelo depende do desenvolvimento de estratégias – tecnológicas, de produto, de serviço, de uso ou consumo – que conduzam a reutilização contínua de materiais e recursos no seu potencial produtivo máximo (máximo valor financeiro e utilidade, pelo maior tempo possível), em ciclos devidamente alimentados por fontes renováveis. Não só os recursos são preservados como é possível restaurar e regenerar o capital natural extraído. Reduzimos assim a dependência da extração ou importação de matérias-primas e minimizamos emissões e resíduos a serem eliminados. [4]

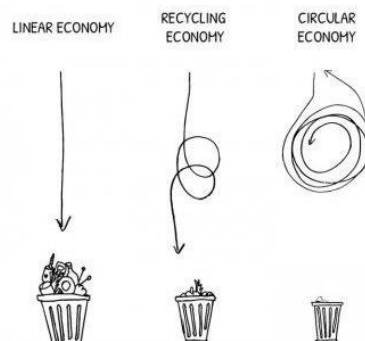


Figura 1.2 - Mudança de Paradigma no Processo Produtivo [2]

No contexto do continente europeu, extremamente dependente de matérias-primas e energia importadas, a Comissão Europeia lançou um plano de ação em Bruxelas em dezembro de 2015, com foco em aumentar a reciclagem e tender para eliminação progressiva do descarte em aterro, aumentando a eficiência dos recursos com uma série de medidas rumo a uma economia efetivamente circular. São objetivos integrantes das metas juridicamente vinculativas a União Europeia: [4]

- Reciclagem de 65% para resíduos urbanos até 2030;
- Reciclagem de 70% para embalagens até 2030;
- Reduzir a deposição em aterros para um máximo de 10% de todos os resíduos.

Além das novas propostas, foi reafirmado o compromisso com a estratégia Europa 2020, em que uma das iniciativas emblemáticas era a eficiência dos recursos. Para que atinjam os objetivos oficializados no Plano, é preciso uma participação de longo prazo a todos os níveis, dos Estados-Membros, a passar pelas autárquicas, empresas e cidadão. A economia circular terá também a função de reforçar mutuamente os compromissos internacionais assumidos pela União Europeia, nomeadamente a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas para o desenvolvimento sustentável e a Aliança do G7 sobre eficiência dos recursos. O documento também destaca a importância para o Objetivo 12, que consiste em garantir padrões sustentáveis de consumo e produção. [5]

No mesmo caminho, Portugal publicou em 2017 a Resolução do Conselho de Ministros que aprova o plano de Ação para a Economia Circular no país. A adoção das propostas legislativas contidas no pacote de economia circular criaria mais de 170.000 empregos diretos até 2035 na União Europeia e o aumento da produtividade dos recursos em 30% poderia conduzir à criação entre 1 a 3 milhões de postos de trabalho adicionais até 2030. Já para o contexto de Portugal, estimativas europeias apontam para a existência de 57.000 postos de trabalho diretos relacionados com atividades de economia circular e 36.000 empregos diretos criados até 2030. [5]

Na tentativa de fechar o ciclo entre produção e consumo sustentável e utilização dos materiais com o máximo de valor agregado durante o maior tempo possível, surge a oportunidade de reutilização de materiais em fim de ciclo de vida, como é o caso das embalagens em material plástico, oportunidade que solucionaria também a grave questão ambiental por se tratar da principal fonte de lixo marinho e dificilmente biodegradável. [24]

O elevado crescimento e importância dos plásticos no setor de embalagens devem-se às propriedades de barreira que os polímeros possuem, permitindo assim conservar todas as propriedades dos alimentos sem que ocorra contaminação, como é o caso das bebidas. Pelas suas propriedades, os plásticos estão a ser cada vez mais utilizados no setor da construção civil, na medicina e saúde, nos

## CAPÍTULO 1

componentes elétricos e na eletrônica, nos transportes e nas embalagens, sendo que este último ramo representa o setor com maior procura por plástico, gerando questões ambientais insustentáveis no seu período pós-consumo.



Figura 1.3 - Principais Tipos de Plásticos e os Respetivos Usos [13]

Devido a grande disponibilidade destes plásticos optou-se neste trabalho estudar a reutilização de PET reciclado na construção civil, mais especificamente como matriz para painéis compostos para sistemas de cofragens para betão armado. O processo de produção do composto foi a pultrusão a partir de fibras de vidro pré-impregnadas resultando em um material extremamente viável economicamente.



Figura 1.4 – Perfis Compósitos Pultrudidos Utilizados na Construção Civil [32]

## 1.2 OBJETIVOS

Os principais objetivos que se pretendem atingir com o desenvolvimento deste trabalho são:

- Apresentar uma possibilidade para a economia circular no âmbito da construção civil;
- Conceber um material a partir de PET reciclado, em detrimento a materiais finitos retirados da natureza;
- Testar, estudar e analisar o comportamento mecânico, de peças de PET reciclado com fibras de vidro, aquando em contacto com argamassa de cimento e óleo descofrante;
- Avaliar as propriedades deste material consoante ao fabrico do mesmo.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

O interesse em pesquisar ao tema advém da necessidade de mudança no setor da construção civil, responsável por grande parte da extracção de recursos naturais, ineficiência produtiva e alto consumo energético. Nesta busca pelo desenvolvimento sustentável das construções está inserido o conceito de economia circular, modelo em que o crescimento é benéfico ao ambiente. Diferente do modelo de economia linear tradicionalmente utilizado, esta nova forma de pensar as cadeias produtivas permite que os materiais em fase final de vida útil voltem ao ciclo produtivo, permitindo a indústria um papel regenerativo e não destrutivo ou predatório.

O consumo de embalagens tem atingido valores acima do aceitável, para além da matéria-prima ter disponibilidade limitada, uma grande parte deste material torna-se resíduo e causa diversos problemas ambientais. [6] Como ponto de partida, o trabalho busca fazer uso do excesso de embalagens de plástico de curto ciclo de vida, reciclando-a para suprir a necessidade de matérias-primas para a construção civil.

Neste contexto, os trabalhos com cofragem representam elevado investimento em uma obra e demandam mão de obra específica para montagem e posicionamento das peças conforme projeto de estruturas. Faz-se necessário pensar novos materiais, soluções mais leves e de fácil montagem para otimização desta importante etapa da construção. Neste âmbito os materiais compósitos surgem como uma possível solução apresentando as propriedades necessárias, com as vantagens de resultar de processos de fabrico com baixo custo e possibilidade de fabrico a partir de matrizes termoplásticas recicladas.

## **1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO**

O trabalho está dividido em seis capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução, objetivos e justificativa da pesquisa.

O segundo capítulo descreve o estado da arte sobre as cofragens para betão armado, devido ao objetivo de se utilizar o perfil compósito para este fim, além de apresentar as principais normas que abordam o tema em Portugal.

O capítulo 3 aborda o conceito da economia circular, base teórica do trabalho e seu enquadramento legal na Comunidade Europeia e no contexto atual. Na parte final ainda trata especificamente da oportunidade no reuso e reciclagem dos plásticos e as potencialidades do sector.

O capítulo 4 descreve os materiais compósitos, sua classificação e mais especificamente as matrizes e reforços utilizados no trabalho, além de descrever o processos de fabrico e apresentar as características essenciais da etapa de produção.

Já no capítulo 5 temos a descrição dos ensaios realizados e os procedimentos adoptados em laboratório na abordagem prática. Ainda neste capítulo também é apresentado principais aspectos da ISO 14 125, norma utilizada para os ensaios de flexão e cálculo dos parâmetros mecânicos do material.

O último capítulo apresenta uma análise comparativa dos resultados, conclusões do trabalho, considerações finais e sugestões para futuros trabalhos ligados a esta pesquisa.

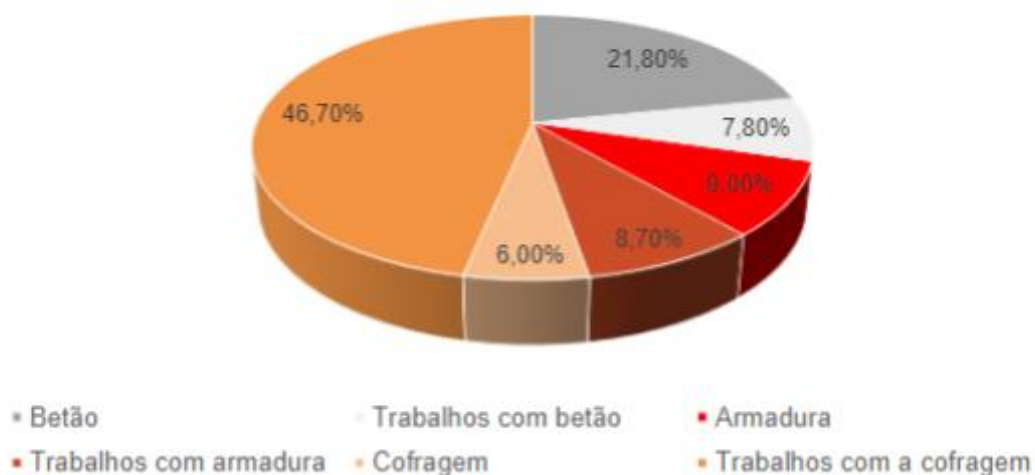
## CAPÍTULO 2

### SISTEMA DE COFRAGENS PARA BETÃO ARMADO

No processo construtivo de uma estrutura em betão, os diversos elementos (fundações, pilares, vigas, lajes e outros) necessitam de moldes, que lhes conferem forma final. A betonagem das estruturas em obra implica o uso destes moldes ao qual se atribui correntemente o nome de cofragem. [7] Devido à fluidez do betão colocado in situ é fundamental a utilização de cofragens e elementos de suporte que assegurem a geometria pretendida, além de permitir que a estrutura atinja a capacidade resistente para os diversos estados limites. Todo o sistema cofrante deve ser concebido de maneira a suportar as pressões exercidas pelo betão, resistir às cargas permanentes e às diversas acções submetidas durante a construção.

O desenvolvimento dos sistemas de cofragens tem por objectivo a minimização do trabalho em obra, na tentativa de redução do custo da mão-de-obra, que representa uma grande parte no custo total de uma estrutura em betão. Como exemplo, o gráfico abaixo exhibe os diferentes custos associados a execução de uma parede de 30cm de espessura em betão armado. [7] É possível perceber o grande impacto do item *Trabalhos com a cofragem*, representando quase 50% do custo total dos trabalhos.

Tabela 2.1 - Custos de execução de uma parede em betão [7]



A cofragem pode ser recuperável, perdida ou descartável. Neste trabalho será somente importante a primeira delas, devido ao potencial de reutilização do material. O processo evolutivo dos sistemas de cofragens nos últimos anos permitiu facilitar e otimizar o processo de construção de elementos em betão. Os principais atributos aperfeiçoados foram: [7]

- Aumento da durabilidade dos materiais e elementos de cofragem;
- Minimização do tempo de montagem e desmontagem;
- Diminuição da mão-de-obra necessária e melhoria nas condições de segurança;
- Aumento da rotatividade do equipamento;
- Melhorias no acabamento do betão à vista.

Actualmente existem diversos sistemas de cofragens e devem seguir os parâmetros legais especificados na NP EN 206-1:2007 – Especificação, desempenho, produção e conformidade do betão e na NP EN 13 670:2011 – Execução de Estruturas em betão e suas atualizações, além dos Eurocódigos:

- EN 1990: Eurocódigo – Bases para o projecto de estruturas
- EN 1992: Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão
- EN 1994: Eurocódigo 4 – Projecto de estruturas mistas aço-betão

A remoção dos cimbres e escoras de um elemento de betão é um momento particular do seu comportamento estrutural na medida em que o betão não terá ainda atingido a resistência de projecto, todavia deve resistir às acções sujeitas durante a obra e ao próprio processo de desmoldagem dos elementos. A norma NP EN 13 670 apresenta uma expressão para estimar os prazos de descimbramento em função da razão entre as cargas no momento da remoção e as cargas de projecto, da temperatura e do nível de desenvolvimento da resistência à compressão do betão.

$$t = \frac{L}{\left(1 - \frac{\log \beta}{s}\right)^2} \quad (2.1)$$

onde:

t— é o prazo de descimbramento da estrutura, em dias;

L— tempo relacionado a temperatura do betão e o seu grau de desenvolvimento, em dias;

β— é a relação entre as resistências médias à compressão do betão à idade L;

S – coeficiente relacionado a condição do betão;

O prazo  $t$ , em dias, é determinado utilizando a seguinte expressão 2.1, onde  $L$  e  $s$  são dependentes: da temperatura do betão que se verificou durante todo o período iniciado com a conclusão da betonagem desse elemento estrutural até à remoção e do grau de desenvolvimento da resistência do betão, como definido na secção 7.2 da NP EN 206-1, e têm os valores conforme a tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Diferentes Parâmetros que Influenciam no Prazo de Descimbramento [8]

| Temperatura do betão durante a colocação até ao descimbramento            | $\theta \geq 25\text{ °C}$ |                               |                               | $25\text{ °C} > \theta \geq 15\text{ °C}$ |                               |                               | $15\text{ °C} > \theta \geq 10\text{ °C}$ |                               |                               |
|---|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---|-------------------------------|-------------------------------|---|-------------------------------|-------------------------------|
|   | rápido<br>$r \geq 0,50$    | médio<br>$0,50 > r \geq 0,30$ | lento<br>$0,30 > r \geq 0,15$ | rápido<br>$r \geq 0,50$                   | médio<br>$0,50 > r \geq 0,30$ | lento<br>$0,30 > r \geq 0,15$ | rápido<br>$r \geq 0,50$                   | médio<br>$0,50 > r \geq 0,30$ | lento<br>$0,30 > r \geq 0,15$ |
| Desenvolvimento da resistência à compressão<br>$r = f_{cm,t} / f_{cm,28}$ |                            |                               |                               |   |                               |                               |   |                               |                               |
| $L$ (dias)  | 21                         |                               |                               | 28  |                               |                               | 34  | 40                            | 47                            |
| $s$ (-)   | 0,16                       | 0,32                          | 0,50                          | 0,25                                      | 0,44 <sup>B)</sup>            | 0,70                          | 0,32                                      | 0,55                          | 0,85                          |

A norma ainda prevê para os casos correntes que poderá considerar-se como critério para determinar o prazo  $t$  (em dias) de descimbramento ou de retirada do escoramento ou das faces inferiores da cofragem o da igualdade entre: a razão  $\alpha$  entre as cargas quando da remoção dos cimbramentos, escoras ou faces inferiores da cofragem e as cargas para que o elemento estrutural foi dimensionado, ambas afetadas dos coeficientes  $\gamma$  e  $\Psi$  definidos na NP EN 1990, e a razão  $\beta$  ( $f_{cm,t} / f_{cm,L}$ ) entre as resistências médias à compressão do betão às idades  $t$  e  $L$ .

Para uma melhor compreensão sobre os tipos de sistemas cofrantes utilizados atualmente, é possível uma classificação que esquematiza e contextualiza os diversos sistemas de cofragem:

Tabela 2.2 - Classificação dos sistemas de cofragem [7]

|                               | Tradicionais                        | Madeira  |
|-------------------------------|-------------------------------------|--|
|                               | <b>Cofragens Recuperáveis</b>       | Semi-racionalizadas ou tradicionais recuperáveis |
| Racionalizadas                |                                     | Ligeiras ou desmembráveis                        |
|                               |                                     | Semi-desmembráveis                               |
|                               |                                     | Pesadas ou monolíticas                           |
| Especiais                     |                                     | Vigas de lançamento                              |
|                               |                                     | Carro de avanço                                  |
|                               |                                     | Pneumáticas                                      |
| <b>Cofragens perdidas</b>     | Estruturais ou colaborantes         | Pré-lajes  |
|                               |                                     | Pavimentos aligeirados                           |
|                               |                                     | Chapas de aço galvanizado                        |
|                               | Não-estruturais ou não-colaborantes | Abobadilhas                                      |
|                               |                                     | Blocos de material expandido                     |
| <b>Cofragens Descartáveis</b> |                                     | Cofragens plásticas                              |

## 2.1 COFRAGENS RECUPERÁVEIS TRADICIONAIS

Inicialmente, no aparecimento do betão no fim do século XIX em Portugal (primeira obra data de 1896), as cofragens eram executadas unicamente em madeira, devido a grande disponibilidade do material, o baixo custo e ser um material acessível, com resistências consideráveis e facilidade de manuseio nos estaleiros de obra. A madeira já era correntemente utilizada em paredes de taipa, coberturas e outros elementos, daí a facilidade no uso deste material e sua designação como cofragem tradicional. [8]

Durante muitos anos, este foi o único sistema de cofragem, até que há algumas décadas houve uma busca por novos materiais e alternativas para moldar estruturas em betão. A evolução na Engenharia de Materiais e o avanço da indústria tecnológica permitiu o surgimento de novas técnicas e materiais para cofragem, como a utilização de painéis em alumínio, aço, aglomerados, contraplacados, fibra de vidro, entre outros, que substituíram parcialmente o uso da madeira.



Figura 2.1 - Cofragem Tradicional e a Utilização de Madeira [8]

É importante salientar que em Portugal, obras de menor dimensão ainda se utilizam, maioritariamente, elementos em madeira para os sistemas de cofragem, tendo em conta os custos dos sistemas racionalizados e a própria escala de reutilização das peças, fatores que justificam a opção pelo sistema tradicional. Este sistema é executado integralmente com barrotes e tábuas de madeira maciça, e ligadas sobretudo por pregos, em que são criados assemblagens sob a forma de taipais e estrados e sustentados normalmente por prumos de eucalipto jovem (secção circular) e prumos de pinho bravo (secção rectangular).

Tabela 2.3 – Dimensões dos elementos em madeira correntemente utilizados em cofragens [8]

| Designação | Dimensões |         |                | S = b h<br>[cm <sup>2</sup> ] | I = b h <sup>3</sup> /12<br>[cm <sup>4</sup> ] | W = b h <sup>2</sup> /2<br>[cm <sup>3</sup> ] |
|------------|-----------|---------|----------------|-------------------------------|--|---|
|            | h [cm]    | b [cm]  | l [cm]         |                               |  |   |
| Prumo      | 10        | 7       | 2.60/3.00/3.50 | 70                            | 583  | 117   |
| Prumo      | 7         | 10      | 2.60/3.00/3.50 | 70                            | 286  | 82  |
| Vigamento  | 16        | 8       | 2.60 a 6.00    | 128                           | 2731   | 341   |
| Vigamento  | 8         | 16      | 2.60 a 6.00    | 128                           | 683  | 171   |
| Solho      | 2.5       | 12 a 20 | 2.60           | 30 a 50                       | 16 a 26  | 40 a 63                                       |
| Solho      | 3         | 16 a 20 | 2.60           | 48 a 60                       | 36 a 45  | 72 a 90                                       |
| Moldura    | 4         | 16 a 20 | 2.60           | 64 a 80                       | 85 a 107                                       | 128 a 160                                     |

A versatilidade deste tipo de cofragem está na possibilidade de executar formas geométricas mais complexas através dos cortes e encaixes feitos na madeira, pormenores normalmente impraticáveis em sistemas com peças racionalizadas. A grande trabalhabilidade, a suficiente resistência e textura rugosa que imprime à superfície do betão são três fatores importantes que justificam o corrente uso da madeira como cofragem de estruturas [8]. Esta situação facilita a logística dos pequenos estaleiros, pois não requer máquinas e equipamentos potentes para a sua manipulação e movimentação em obra.



Figura 2.2 – Escoras e Solhos (tábuas) vulgarmente utilizadas em cofragens tradicionais [8]

O emprego da madeira como material de utilização provisória (descartável) pode ser utilizado na execução de formas, andaimes e escoramento. Os produtos de madeira disponibilizados no mercado, variam desde peças com pouco ou nenhum processamento até peças com diversos graus de beneficiamento. Há também grande variedade de ferramentas associadas ao processo de execução de cofragens em madeira, tais como: Serra circular, plana, rebarbadora, serrote, lima, fio-de-prumo, martelo, machado, marreta, régua, fita métrica e lápis de carpinteiro.



Figura 2.3 - Carpinteiros a trabalhar nos moldes tradicionais em madeira [9]

Porém a utilização de cofragens tradicionais tende a ser substituída por apresentar diversas desvantagens em relação a sistemas racionalizados-industrializados:

- Extração de um recurso natural finito de forma linear em que se transformam em resíduos e conseqüentemente, há impacto ambiental associado;
- Características mecânicas variáveis e capacidades de carga desconhecidas;
- Dificuldade de alinhamentos e aprumo entre as madeiras de cofragem e seus escoramentos;
- Pequeno número de reutilizações das peças de cofragem;
- Dificuldade na limpeza dos moldes após descofragem;
- Possibilidade de ataque de insectos xilófagos;

Em decorrência dos itens apontados acima, são aferidos maior custo com mão de obra, maior gasto de tempo devido a ineficiência do processo e necessidade de gestão dos resíduos de cofragem e escoramento gerando maior custo e responsabilidade ambiental à empresas construtoras.

## 2.2 COFRAGENS RECUPERÁVEIS SEMI-RACIONALIZADAS

Apesar do papel relevante das cofragens tradicionais em Portugal ainda nos dias de hoje, diversos elementos metálicos foram inseridos no processo, como a frequente utilização de prumos metálicos associado aos moldes em madeira. Este método de cofragem é designado de “tradicional melhorada” ou semi-racionalizadas. [8] Neste caso, a base é a mesma do sistema tradicional descrito anteriormente, com grandes quantidades de madeira utilizadas, porém a introdução de elementos metálicos e painéis de contraplacado permite melhor desempenho na montagem e desmontagem do sistema de cofragem.



Figura 2.4 - Cofragem tradicional melhorada [8]

A dificuldade em conseguir prumos em madeira que satisfizessem os critérios de segurança e a impossibilidade de regulação das alturas fez com que fossem gradativamente substituídos por prumos metálicos com maior durabilidade e corretamente dimensionados em função do vão que tem se suportar. Outra melhoria é no sistema de fixação dos painéis e moldes, com recurso a ligações pregadas, aparafusadas ou esticadores de aço utilizando castanhas.

#### ACESSÓRIOS DE COFRAGEM



Figura 2.5 - Exemplos de Acessórios para Cofragens [8]

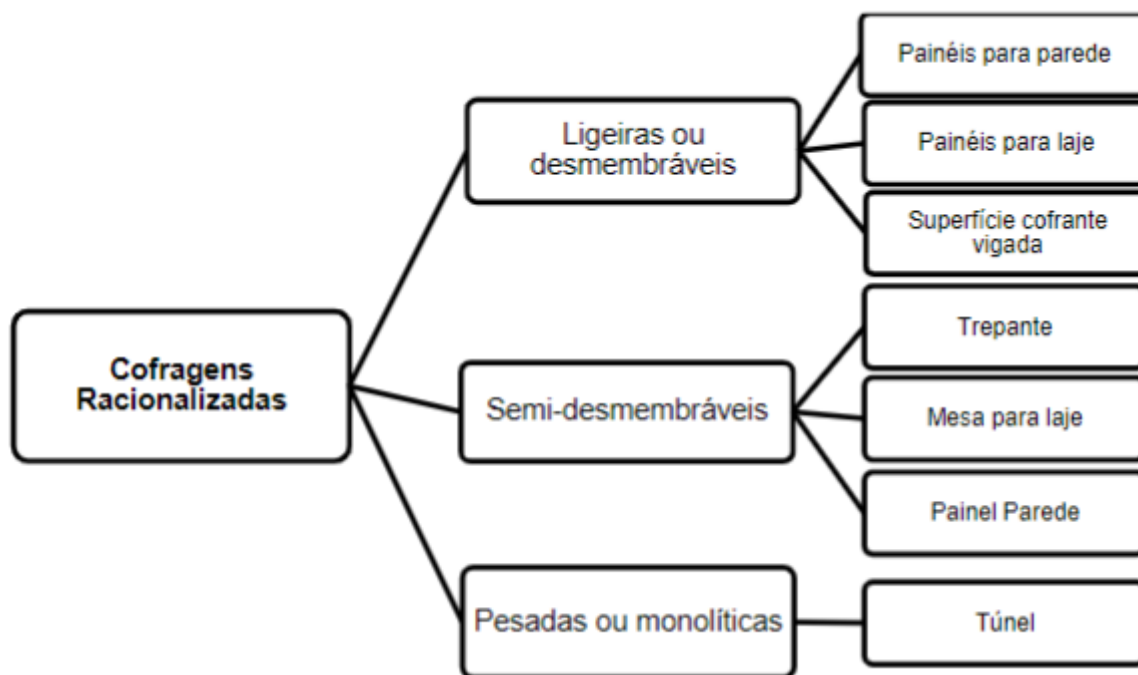
### 2.3 COFRAGENS RECUPERÁVEIS RACIONALIZADAS

Estas estruturas provisórias de sustentação são produzidas em fábrica, sendo constituídos por elementos normalizados, com melhores tecnologias de superfície para proporcionarem grande número de reutilizações. Outra característica dos sistemas racionalizados de cofragens é a forte otimização do processo construtivo, os elementos são projectados de forma a maior eficiência no processo de transporte, montagem e desmontagem em obra.

Este sistema tem origem no conceito da construção modular e da padronização de elementos construtivos, a coordenação dimensional modular é uma metodologia que visa criar uma dimensão padrão, que racionalize a conceção e a construção de edifícios, o que permite elevar o grau de industrialização da construção, mantendo, no entanto a liberdade de conceção arquitetónica dentro de valores aceitáveis. [9]

A classificação abaixo utiliza o peso dos sistemas como critério de divisão, o objeto de interesse deste trabalho é a primeira subclassificação (cofragens ligeiras ou desmembráveis) devido a maior utilização destes sistemas em detrimento ao demais.

Tabela 2.2 - Classificação das cofragens racionalizadas [9]



Como já referido, as cofragens ligeiras são compostas por módulos e diferenciam-se das demais classificações devido a separação do sistema de cofragens e seus elementos de suporte, possuindo grande versatilidade e flexibilidade e de fácil transporte e armazenamento, sendo, portanto o principal sistema de cofragem utilizado em paredes e lajes em betão armado. [7]

### 2.3.1 Cofragens Racionalizadas Ligeiras – Sistemas de Painéis para Paredes

Os painéis para paredes normalmente são autoportantes e devem suportar, para além do peso próprio, aos carregamentos submetidos durante a betonagem e o incremento de pressões exercido pelo betão ainda fluido. Existem diversos sistemas de cofragem em painéis para paredes, porém todos eles apresentam peças modulares, flexibilizando o processo construtivo e adaptando-se a diferentes formas geométricas.



Figura 2.6 – Exemplo de cofragem de paredes racionalizada ligeira [Fonte: o autor]

Alguns acessórios são utilizados para travar os painéis de cofragem e garantir o esquadro e o prumo da estrutura. As ancoragens/Varões Roscadas com porca de aperto que podem estar a conectar painéis opostos ou contíguos. Também são utilizados os grampos de fixação, peças que unem painéis adjacentes ou painéis de canto, garantindo a estanqueidade das superfícies internas dos painéis. [8]

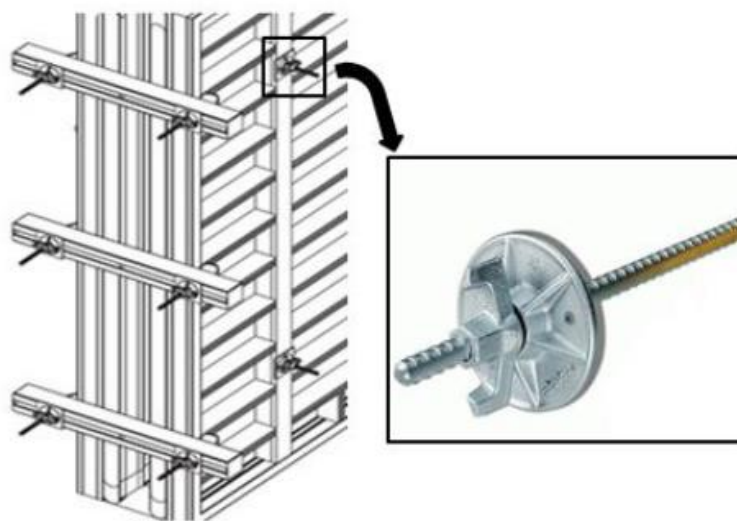


Figura 2.7 - Ligações com Auxílio de varões ridificadores [9]

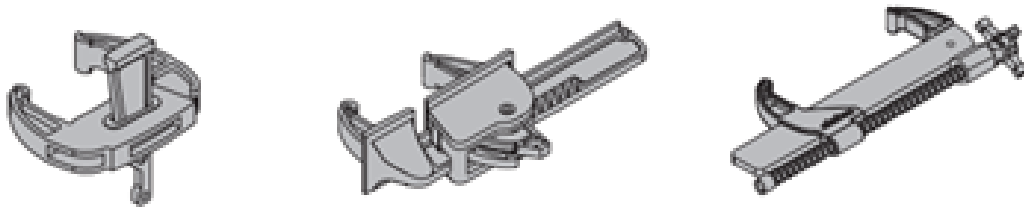
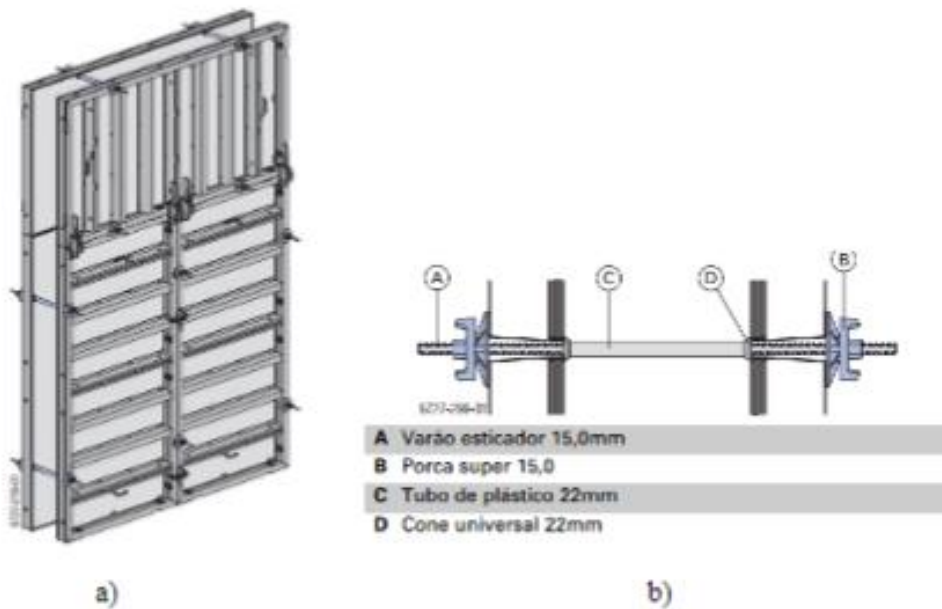


Figura 2.8 - Exemplo de Grampos de Fixação [9]

Segundo o fornecedor PERI, os painéis têm capacidade resistente de 60 kN/m<sup>2</sup> no caso dos painéis em alumínio e podem chegar a 80kN/m<sup>2</sup> em painéis de contraplacado com quadro em aço galvanizado, valores que permite uma margem confortável para a execução dos trabalhos. [7] Normalmente a parte essencial do sistema é a forma como é feita ligação e estabilidade entre painéis, sendo uma possível fragilidade na estrutura que acarretaria uma perda de betão para o exterior da cofragem, além de ser um fator determinante para a facilidade/velocidade com são que executadas.

Para a execução de painéis para paredes é essencial uma base firme para que se possam ser fixados provisoriamente os painéis e eventuais escoramentos, portanto é vulgar o uso de fundações rasas para suporte destas cofragens. Já com as cofragens estabilizadas, é feito o travamento da estrutura com os acessórios já descritos anteriormente, com o objetivo de anular os impulsos exercidos pelo betão.



a) Pontos de Colocação;

b) Pormenor da Ancoragem

Figura 2.9 - Ancoragens Entre Painéis [9]

### 2.3.2 Cofragens Racionalizadas Ligeiras – Sistemas de Painéis para Lajes

Os painéis para suportar diretamente as cargas das lajes podem ser em contraplacado ou mesmo metálicos, suportados por vigas principais que descarregam as cargas em prumos verticais. Pode haver cabeçais de saída ou outros acessórios de consolidação entre a própria laje e os prumos, reduzindo assim o tempo de descofragem.

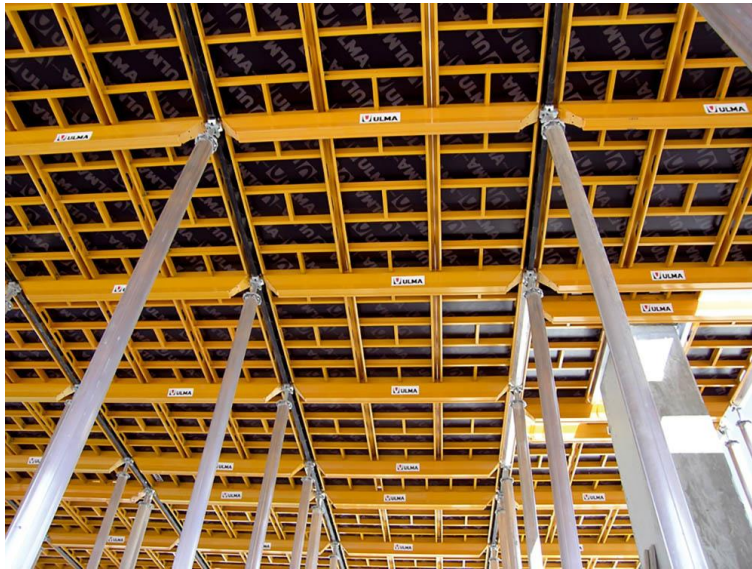


Figura 2.10 - Sistema ULMA de cofragem em alumínio para lajes maciças em betão [9]

Os painéis são apoiados nas longarinas metálicas, sem necessidade de pregos ou fixações, além da descofragem dos painéis acontecer já 3 dias após a betonagem, liberando a laje para trabalhos subsequentes devido a confortável distância entre vigas/escoras, de 1 a 2 metros, a depender da carga a que a estrutura está submetida.

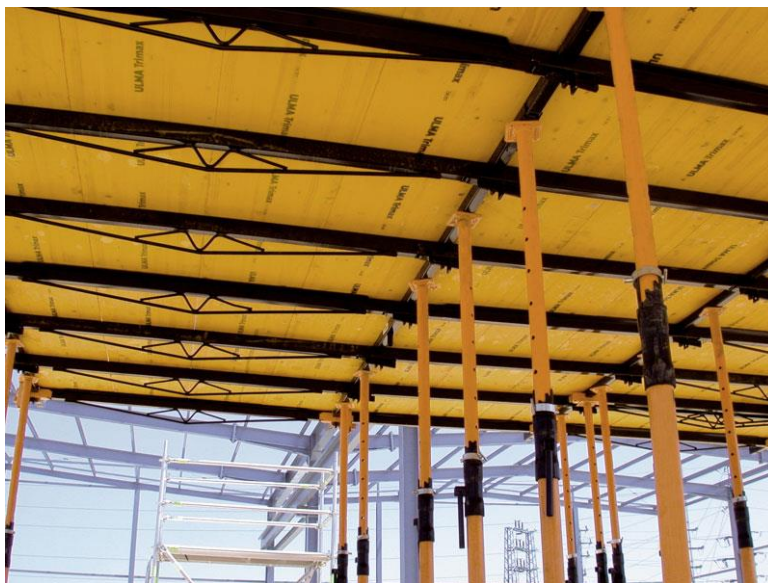


Figura 2.11 - Sistema Racionalizado Recuperável de Painéis para Lajes em Betão [9]

### 2.3.3 Cofragens Racionalizadas Ligeiras – Superfície Cofrante Vigada

Uma solução corrente no mercado de cofragens é o sistema de duplo vigamento escorado com recurso a placas de contraplacado ou outros tipos de superfícies cofrantes. Para melhorar a rigidez e a estabilidade deste sistema são utilizados contraventamentos as escoras, como os tripés na base de alguns prumos conforme a figura abaixo. Esta solução permite uma eficiente montagem e desmontagem, pois é composta de peças menores e individuais que são dimensionadas de acordo com o vão a vencer e as cargas submetidas pela estrutura de betão. [8]

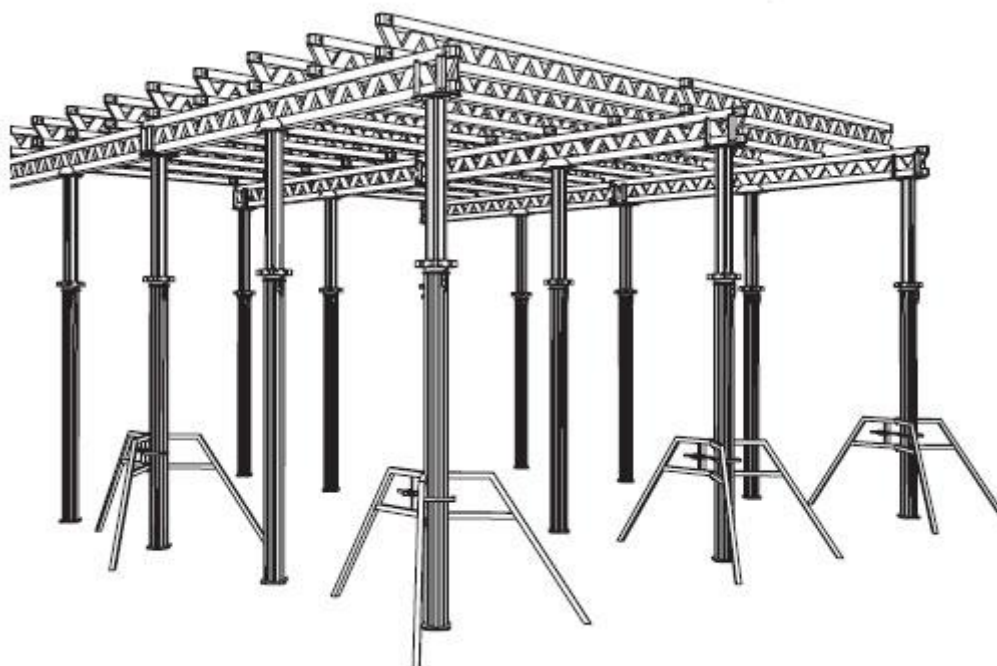


Figura 2.12 - Sistema de Escoramento Duplamente Vigado MULTIFLEX da Empresa PERI [9]

## CAPÍTULO 3

### ECONOMIA CIRCULAR

#### 3.1 DEFINIÇÕES E CONCEITOS

O conceito de Economia Circular (EC) é cada vez mais tratado como solução para superar o atual modelo linear de produção e consumo baseado no crescimento contínuo e no aumento do fluxo de matéria-prima. [10] O modelo linear começa a estar ameaçado devido à disponibilidade limitada de recursos naturais. Ao promover a adoção de padrões de produção assentados na reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energia dentro de um sistema econômico, a EC visa aumentar a eficiência do uso de recursos, com foco especial em resíduos urbanos e industriais, para alcançar um melhor equilíbrio e harmonia entre economia, meio ambiente e sociedade. [11]

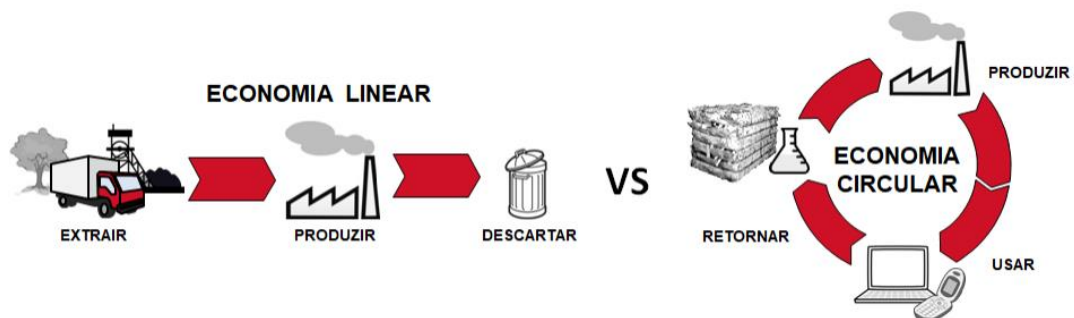


Figura 3.1 - Economia Linear x Economia Circular [13]

A Economia Circular é um modelo que nos permite repensar o processo de produção e consumo da sociedade atual e que se inspira no funcionamento da própria Natureza, ou seja, não há perdas ou resíduos no processo produtivo, pois a própria atividade econômica constrói e reconstrói a saúde geral do sistema. Inclui-se num quadro de desenvolvimento sustentável baseado no princípio de “fechar o ciclo de vida” dos produtos, permitindo a redução no consumo de matérias-primas e recursos naturais utilizados nos processos de extração e transporte dos mesmos. Promove o desenvolvimento de novas

relações entre as empresas, que passam a ser simultaneamente consumidoras e fornecedoras de materiais que são reincorporados no ciclo produtivo. [12]

A figura abaixo fornece uma visualização dos fluxos da economia circular. A coluna vertical simboliza a economia linear utilizada atualmente e as laterais do diagrama mostra como as matérias-primas podem fluir através de diferentes fases do sistema económico. Os círculos verdes à esquerda são ciclos para nutrientes biológicos e do lado direito, os círculos em azul são para os ciclos técnicos. O princípio inicial é o controlo de stocks de recursos finitos e balanceamento dos recursos renováveis, ou seja, a preservação do capital natural. Já na etapa de produção e consumo do produto, o objectivo é otimizar o consumo do recurso, circulando produtos, componentes e materiais em uso na mais alta utilidade em todos os momentos, tanto em ciclos técnicos como biológicos. No fim do processo é preciso aperfeiçoar a circularidade, revelando as externalidades negativas e soluções para fechar o ciclo de cada uma delas.

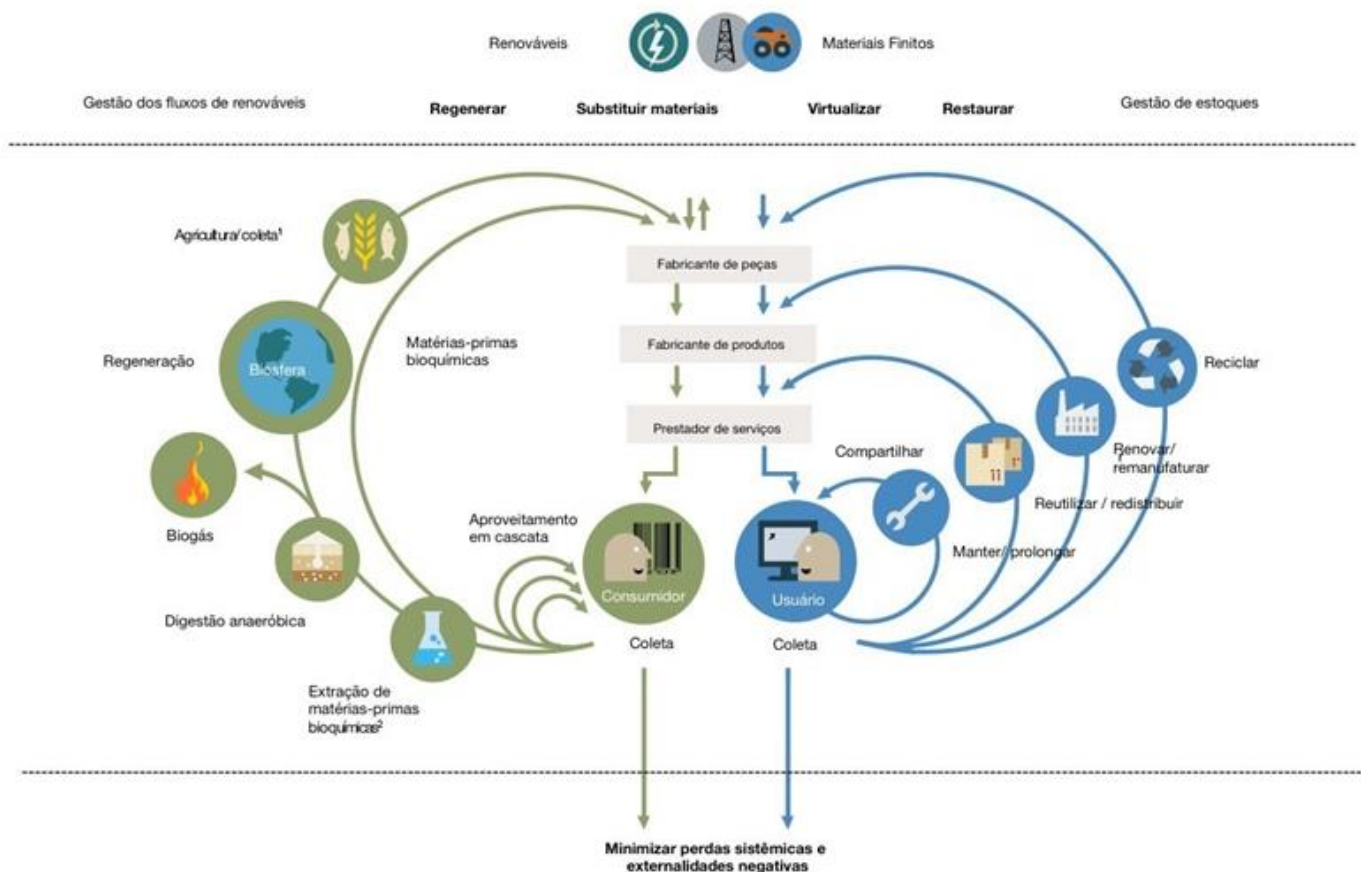


Figura 3.2 - Diagrama Ilustrativo de Funcionamento da Economia Circular [13]

São definidos dois tipos de fluxos de materiais no processo de produção e consumo: fluxo biológico e fluxo técnico, em que no ciclo biológico os nutrientes são projetados para reentrar na biosfera com segurança e reconstruir o capital natural. [18] O que entendemos por resíduos podem voltar ao processo como nutrientes para a agricultura ou matéria-prima para a produção de energia. Já para o ciclo

técnico, é preciso que as indústrias tenham a responsabilidade alargada dos produtos de forma a manterem os recursos pelo maior tempo possível, e quando o produto está em fase final de aproveitamento, a indústria recebe-o para reciclagem, renovação ou remanufaturação.

É preciso trabalhar a mudança de paradigma efetivamente em todas as escalas - para grandes e pequenas empresas, para organizações e indivíduos, global e localmente. A transição para uma economia circular não representa apenas ajustes destinados a reduzir os impactos negativos da economia linear, pelo contrário, representa uma mudança sistémica que cria resiliência de longo prazo, gera oportunidades comerciais e económicas e proporciona benefícios ambientais e sociais.

A economia circular é um modelo que se baseia no desenvolvimento e aplicação de estratégias tecnológicas, de produto, serviço e de utilização, que incentivam a reutilizar continuamente os materiais no seu potencial produtivo máximo (máximo valor financeiro e utilidade, pelo maior tempo possível), em ciclos energizados por fontes renováveis. Deste modo, o capital extraído é preservado, restaurado e reintroduzido no sistema ciclicamente, gerando mais retorno financeiro para o produtor, reduzindo custos de extração e importação de matérias primas, minimizando resíduos e emissões associadas. [18]

*Uma economia circular (...) é uma economia inteligente. A ideia é manter um dado recurso em circulação pelo maior tempo possível. Isso significa desenhar produtos, processos e serviços que otimizam o uso de recursos, de tal modo que no fim da sua vida útil nós podemos reutilizá-los, repará-los ou remanufaturá-los. Ou reciclamos os materiais e reinserimo-los na economia.*  
Karmenu Vella, Comissário Europeu Ambiente, 2016. [13]

Esta abordagem vai para além da procura de eficiência, cujo objetivo é reduzir a intensidade material e energética do processo produtivo, o “fazer mais com menos”. É um passo fundamental, mas o crescimento advém por via de cortes incrementais associados aos ganhos de eficiência continua-se a consumir matérias primas. Já numa abordagem circular é extraído mais valor a partir de materiais já mobilizados no processo económico. Claro que, eventualmente, os materiais se degradam, mas ao prolongar o seu uso pelo maior tempo possível ganhamos mais em valor e extraímos muito menos.

Assim, este novo modelo em que a indústria é regenerativa (e não destrutiva e predatória) proporciona uma oportunidade de negócio viável para enfrentar com êxito um mercado cada vez mais competitivo e com exigências ecológicas.

A noção de fluxo circular tem base em diferentes escolas de pensamento e profundas origens históricas e filosóficas. Os resultados evidenciam que a origem da EC está principalmente enraizada na economia ambiental e na ecologia industrial. [11] Houve um ressurgimento nos países industrializados após a Segunda Guerra Mundial quando o advento de estudos baseados em computador de sistemas não

lineares revelou a natureza complexa, inter-relacionada e, portanto, imprevisível do mundo em que vivemos - mais parecido com um metabolismo do que uma máquina. [13]

Os economistas ambientais Pearce e Turner em 1989 introduziram principalmente o conceito de sistema econômico circular baseado em estudos anteriores do economista ecológico Boulding (1966). A ideia de economia de Boulding como um sistema circular é vista como um pré-requisito para a manutenção da sustentabilidade da vida humana na Terra (um sistema fechado com praticamente nenhuma troca de matéria com o ambiente externo). Em seu arcabouço teórico, Pearce e Turner explicam a mudança do tradicional sistema econômico aberto para o sistema econômico circular como consequência da lei da termodinâmica, que dita a degradação da matéria e da energia. Raízes de CE também são encontradas na Teoria Geral de Sistemas (Von Bertalanffy, 1950, 1968) e Ecologia Industrial (Preston, 2012). Além da visão newtoniana de “simplicidade organizada”, Von Bertalanffy (1950) propôs que todos os organismos fossem considerados como sistemas, sendo as principais características as relações entre seus organismos. [13]

A ecologia industrial (IE) surgiu em oposição a atual concepção de que os impactos ambientais dos sistemas industriais devem ser estudados mantendo separadas: a fonte “sistema industrial” e o receptor dos impactos “o meio ambiente”. A ecologia introduziu uma perspectiva diferente, analisando o sistema industrial e seu ambiente como um ecossistema comum caracterizado por fluxos de material, energia e informação, bem fornecimento de recursos e serviços da Biosfera. [14]

Deve-se ressaltar, no entanto, que a pesquisa sobre a implementação do CE tem sido e ainda é enraizada principalmente na ideia de análise de benefícios em termos de fluxos físicos, e não monetários. É importante mencionar que os benefícios da reciclagem de materiais tendem a diminuir até que um ponto de corte seja alcançado, onde a reciclagem pode ser ambientalmente ou economicamente muito cara para proporcionar um benefício líquido. A Fundação Ellen Macarthur atribui a teorias mais recentes, como: design regenerativo, economia de desempenho, berço ao berço (Cradle to Cradle), biomimética e economia azul, importante contribuição para o refinamento e desenvolvimento do conceito de economia circular.

## **3.2 FUNDAMENTOS DA ECONOMIA CIRCULAR**

### **3.2.1 Biomimética**

O termo biomimética foi introduzido por Otto Schmitt na década de 1950 para a transferência de ideias e análogos da biologia para a tecnologia, na sua pesquisa em que tentava produzir um dispositivo físico que imitava explicitamente a ação elétrica de um nervo do corpo humano. Diversos cientistas e

pensadores buscaram perceber o perfeito funcionamento da Natureza para a melhor compreensão do planeta em que vivemos. No longínquo século XVI, Nicolau Copérnico (1473 – 1543), famoso astrónomo e matemático disse: “A sabedoria da Natureza é tal que não produz nada de supérfluo ou inútil”. Mais adiante o arquitecto americano R. Buckminster Fuller (1895 – 1983): “Não estou a tentar imitar a Natureza, estou a tentar descobrir os princípios que ela usa.” [15] Ou seja, a ideia principal é que quanto maior for a semelhança entre o nosso mundo e o mundo natural, maior é a probabilidade de nele se sobreviver. [17]

A Biomimética consiste na imitação dos modelos, sistemas e elementos da Natureza com a finalidade de resolver problemas humanos complexos. [17] Esta nova ciência tem vindo a encorajar-nos a observar com mais atenção o funcionamento da Natureza. São três os princípios que descrevem esta nova área de estudo:

- Natureza como modelo: Estuda os modelos da Natureza e imita-os ou usa-os como inspiração para o design e processos, com o objetivo de resolver problemas humanos;
- Natureza como medida: Usa o padrão ecológico para julgar a sustentabilidade das inovações humanas, baseado no aprimoramento de milhares de anos de evolução, a Natureza aprendeu o que funciona e o que é apropriado;
- Natureza como um mentor: Considera uma nova forma de integração com a Natureza, não apenas com foco no que podemos extrair do mundo natural, mas no que podemos aprender com ele.

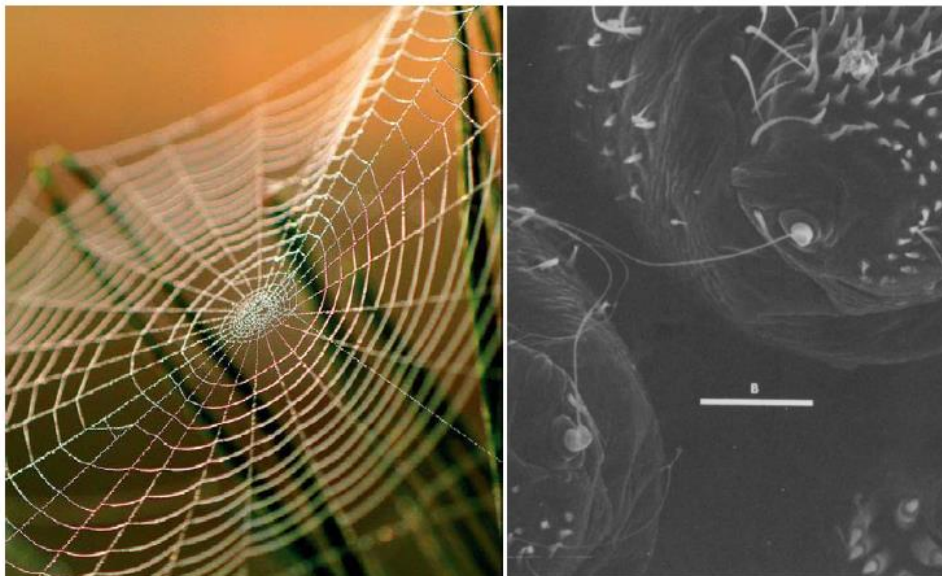
No metabolismo natural da biosfera, a matéria descartada pelo homem e saudável para a Natureza, é reaproveitada, reciclada e absorvida por ela, dando continuidade aos ciclos de nutrientes no processo natural de nascer, viver e morrer. [15] Já no metabolismo da tecnosfera, o que é produzido pela intervenção humana (materiais depois de utilizados e descartados) volta a ser matéria-prima para novos produtos. Ou seja, o material descartado torna-se matéria-prima. É um ciclo fechado que gera alimento a Natureza e a indústria.

Edwin Datschefski, nome indissociável do desenvolvimento do Biomimetismo como ciência, investigador especializado no desenvolvimento e promoção de conceitos de produtos sustentáveis, alerta todos os envolvidos no processo de design do produto para o trabalho urgente de repensar o processo, no sentido de torná-los 100% sustentáveis. Seus princípios são: [30]

- CÍCLICO: os produtos devem fazer parte de ciclos naturais, produzidos a partir de material que possa ser compostado ou tornar-se parte de um ciclo humano, como um círculo fechado de reciclagem;

- SOLAR: toda a energia usada na produção e uso do produto deve ter origem em fontes de energia renováveis, sob todas as suas formas, como a solar;
- EFICIENTE: aumentar o grau de eficiência no uso e na produção dos materiais significa menor impacto ambiental, os produtos podem ser redesenhados para utilizar um décimo da energia que antes utilizavam;
- SEGURANÇA: os produtos e subprodutos não devem conter materiais tóxicos;
- SOCIAL: o fabrico dos produtos não pode incluir a exploração de trabalhadores.

Diversos são os exemplos de design biomiméticos recentemente desenvolvidos na busca por novos materiais e aprimoramento de materiais já produzidos pela indústria. Nos últimos anos a comunidade científica vem se debruçando nessa direção, desenvolvendo pesquisas comparativas entre soluções naturais e seu equivalente produzido pelo homem. A teia de aranha é um grande exemplo de eficácia das soluções naturais, que apresentam resistência à tracção superior a resistência do aço, em termos de rácio resistência/massa. Apresenta inclusive energia de ruptura superior ao das fibras sintéticas KEVLAR, desenvolvido industrialmente e utilizado em coletes a prova de bala. Se comparado ao aço de alta resistência, que atinge ruptura para uma extensão inferior a 1%, o fio da teia de aranha consegue uma extensão de 30% até o limite de ruptura. Essa propriedade lhe permite absorver a elevada energia associada ao impacto de insetos durante o voo, e o processo de produção deste material ocorre de maneira natural, por uma glândula interna ao abdômen das aranhas. [16]



a) Teia de Aranha – Aspecto Geral

b) Microestrutura das glândulas de produção

Figura 3.3 – Pormenores da Produção da Teia de Aranha [16]

A capacidade de auto-limpeza é outra característica invejável dos sistemas naturais, como acontece nas folhas da flor de lótus, cuja microestrutura proporciona essa propriedade. Inspirado na situação descrita, surgiram na década de 60 os primeiros materiais com capacidade de auto-limpeza, recorrendo às capacidades fotocatalíticas dos materiais semi-condutores. Essas capacidades levam a que durante a absorção dos raios ultravioletas da luz solar conjuntamente com a presença de moléculas de água, formem-se substância com forte poder oxidante, que reagem com a sujidade e outros compostos orgânicos e inorgânicos, provocando sua dissociação e consequente desintegração. Contribui para o aumento do efeito auto-limpante o facto dos semicondutores quando sujeitos a radiação ultravioleta reduzirem o ângulo de atrito interno da água, tornando a superfície do material hidrofílica. [16]

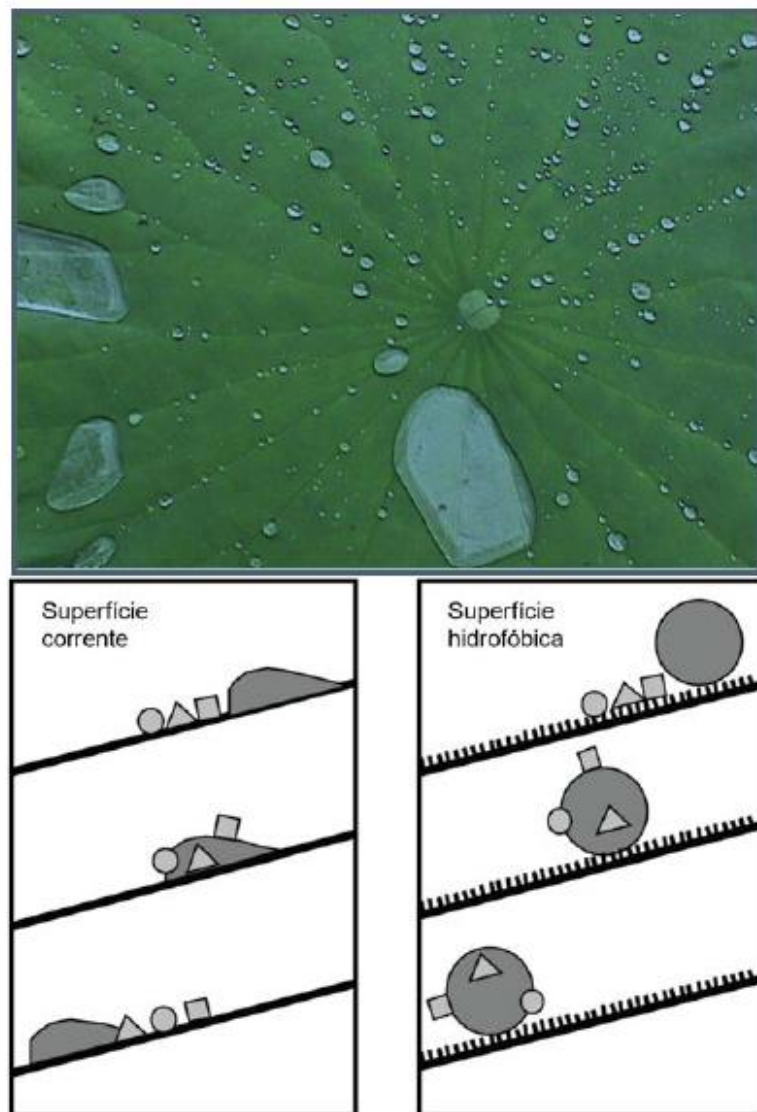


Figura 3.4 – Aspectos da Flor de Lótus e o *Efeito Lótus* [16]

Situada em Roma e construída em 2003, a igreja “Dives in Misericordia” do arquitecto americano Richard Meier é constituída de 346 blocos em betão a vista feito com cimento branco e característica de

auto-limpeza devido ao uso de partículas nanométricas na sua pré-fabricação. Análises evidenciaram que após 6 anos de sua construção, há apenas ligeiras diferenças entre a cor branca nos betões a nível interior e exterior.



Figura 3.5 – Blocos de Betão Auto-limpantes em Roma, 2003 [18]

### 3.2.2 Cradle to Cradle

Atualmente a Análise do Ciclo de Vida de um material é muito importante para controlar seus impactos ao meio ambiente, desde a extração da matéria-prima (cradle) até a disposição final (grave). Em outras palavras, o design do produto deve ser selecionado de acordo com um processo de descarte seguro, é uma tentativa de proteger o meio ambiente, mas continuará a esgotar os recursos naturais. Se o produto for projetado de acordo com o conceito cradle-to-cradle, os materiais podem ser reutilizados, sem geração de resíduo. Isso pode ser conseguido fazendo com que as indústrias mudem sua forma de conceber os produtos, exigindo uma responsabilidade alargada do produtor. [19]

O conceito cradle to cradle promove o desenvolvimento sustentável. É um sistema de pensamento baseado na crença de que os esforços humanos podem melhorar para um sistema de produtividade segura e regenerativa da natureza, transformando indústrias em empreendimentos sustentáveis e eliminando o conceito de desperdício.

Devido ao surgimento de regulamentos governamentais rigorosos, mais atenção tem sido direcionada para a eco-eficiência, o que implica na minimização de resíduos, poluição e esgotamento de recursos naturais. Os autores Braungart e McDonough abordam uma mudança da abordagem atual cradle-to-grave, onde os produtos residuais são descartados em um aterro sanitário, para uma

abordagem cradle-to-cradle, na qual os resíduos podem ser usados para a produção de outros produtos. Eles recomendam a abordagem de reciclagem “eco-efetiva” para permitir a reutilização de materiais com alta qualidade e acrescentam que, combinar diferentes materiais em um produto impede que os produtos sejam totalmente reciclados. Assim, os projetistas precisam planejar a reutilização de seus produtos para evitar a geração de resíduos. [18]

A adoção dos princípios do berço ao berço cria um fluxo cíclico de materiais, em oposição ao conceito do berço ao túmulo unidirecional. Os materiais consumidos na indústria se assemelham aos nutrientes que fluem ciclicamente nos ecossistemas naturais e podem circular em um dos dois metabolismos biológicos ou técnicos.

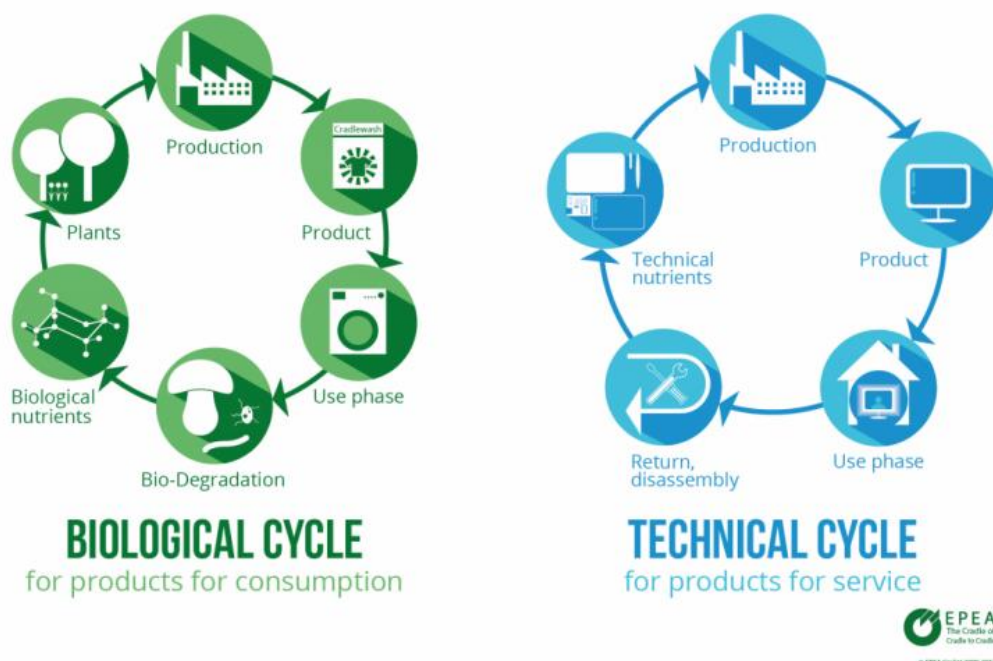


Figura 3.6 – Fluxo de Materiais no Ciclo *Cradle-to-Cradle* (Berço a Berço) [18]

### 3.2.3 Ecologia Industrial

Este fundamento da economia circular tem base na metáfora que advém de retirar lições úteis da análise do funcionamento dos ecossistemas naturais para gerir melhor os sistemas industriais, ou seja, a sociedade é quem caracteriza as economias modernas e industrializadas.[20] A Ecologia Industrial (EI) é entendida como um sistema aberto, onde ambiente e a economia interagem, surgindo o conceito de metabolismo da economia, que está vinculado ao conceito de ciclo de vida e são cruciais para o fechamento dos ciclos de materiais já falados anteriormente.

Assim como um organismo pode ser considerado sozinho ou parte de um ecossistema, uma indústria pode organizar-se interagindo e promovendo parcerias em cooperação com as demais, como no funcionamento de uma comunidade.

A análise da sustentabilidade dos fluxos de recursos entre as empresas é o tema central da EI, vistas como possíveis agentes de melhoria ambiental, pelo facto de produzirem a maioria dos bens e serviços para a sociedade e, conseqüentemente, serem uma fonte importante de danos ambientais. Conforme Chertow, Ashton & Espinosa a análise desses fluxos é essencial porque elas possuem o conhecimento tecnológico fundamental para a execução bem-sucedida do design ambientalmente inteligente de produtos e processos. [21]

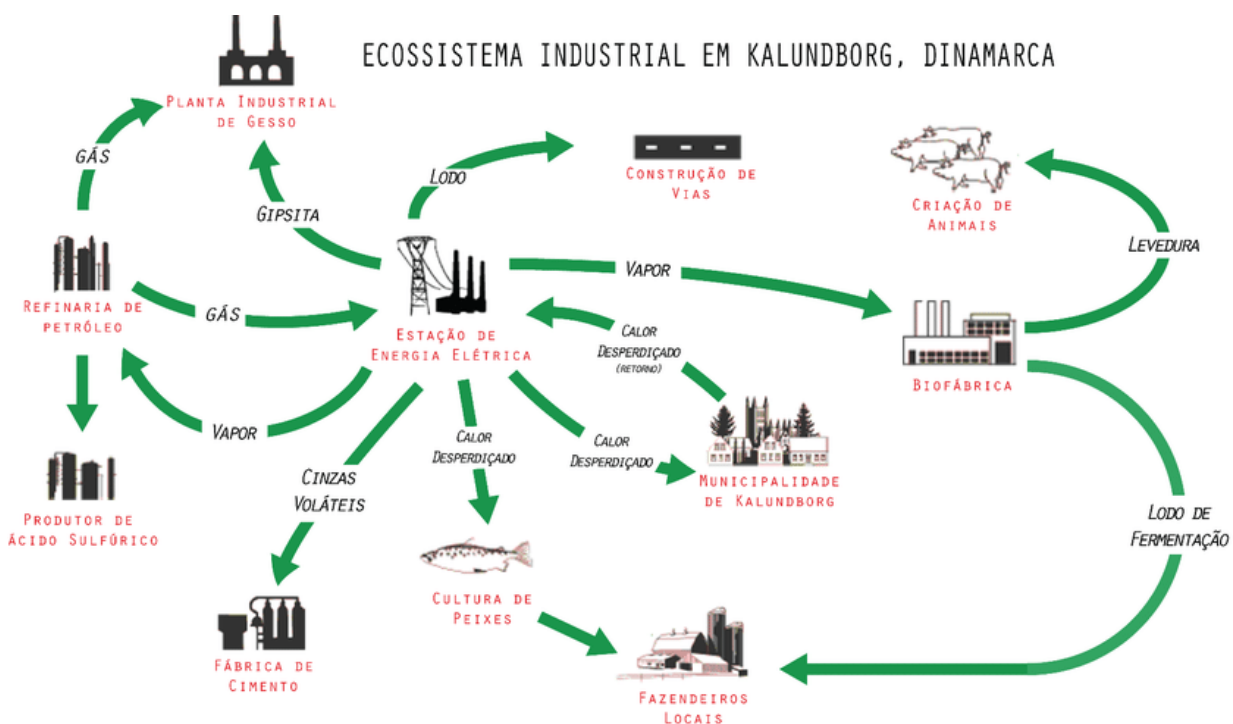


Figura 3.7 - Exemplo do Fluxo de Materiais em Indústria na Dinamarca [21]

A figura acima mostra o ciclo dos materiais gerados no processo produtivo e seus diferentes intermediários, suprimindo a necessidade de outras indústrias, prestadores de serviço ou até mesmo para benefício da população local. Existe, deste modo, uma interação entre o desenvolvimento industrial e o desenvolvimento sustentável, com ênfase na produção limpa, na prevenção da poluição, reuso máximo dos materiais e design de fluxos para conservar recursos.

A Ecologia Industrial é sistêmica, tem uma abordagem e abrangente e sua implementação depende não apenas das empresas em si, mas principalmente da cooperação entre Governo, autoridades locais e agente financiadores. Este processo integrado do sistema produtivo não se limita a análises

puramente económicas e independentes de cada empresa, mas abrange uma visão global do meio biofísico envolvente e seu ecossistema, objetivo principal do desenvolvimento sustentável. [21]

### **3.3 ENQUADRAMENTO LEGAL PARA GESTÃO DE RESÍDUOS NA UNIÃO EUROPEIA**

A directiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu teve como base a directiva anterior – Directiva 2006/12/CE e estabeleceu medidas de protecção do ambiente e da saúde humana, prevenindo ou reduzindo os impactos adversos decorrentes da geração e gestão de resíduos. Consoante a forma como cada Estado-Membro procede à recolha e transporte dos resíduos domésticos, devem regulamentar políticas de forma a incentivar o desenvolvimento, a produção e comercialização de produtos adequados e tecnicamente duradouros, e que depois de transformados em resíduos, sejam sujeitos a uma valorização correta e uma eliminação compatível com o ambiente.

O documento reforça a possibilidade de os Estados-Membros legislarem a favor de produtores para que tenham responsabilidade alargada sobre o produto final, além de tomar medidas para incentivar a concepção de produtos que deem origem a menos resíduos durante sua produção e posterior utilização. Definiu-se um regime de recolha seletivo para papel, plástico, vidro e metais até o ano de 2015 e que até o ano de 2020 a preparação e reciclagem destes resíduos sofram aumento mínimo global de 50% em peso. [22]

Também foram definidos nesta directiva os resíduos perigosos, suas características e as devidas condições de licença e registo de empresas capacitadas para trabalhar com este tipo de atividade. Por fim são estipuladas as condições de elaboração do Plano de Gestão de Resíduos pelas autoridades competentes de cada Estado-Membro, devendo abranger todo o território geográfico do mesmo e analisar a situação actual da gestão de resíduos assim como alternativas para se alcançar a meta já descrita anteriormente.

Em 2015, tornou-se oficial na cidade de Bruxelas um comunicado ao Parlamento Europeu a respeito da necessidade de fechar o ciclo para uma economia circular, transição apontada como oportunidade de transformação da economia, em que se criariam vantagens competitivas e sustentáveis para a Europa.

Mais recentemente a Directiva 2018/851 veio alterar a anterior ao se estabelecer novas metas, principalmente na percentagem de reutilização e reciclagem de resíduos, em que foram aumentadas de modo a refletirem melhor a ambição da União avançar rumo a uma economia circular. Foi reafirmado o compromisso com a Iniciativa Matérias-Primas, em que os Estados-Membros deverão tomar medidas para assegurar a melhor gestão possível dos resíduos que contém quantidades significativas de matérias-

primas críticas, conforme lista publicada em 2017 com as matérias-primas de grande importância para a União Europeia e está sujeita a revisão periódica. [23]

Tabela 3.1 - Lista de Matérias-primas Críticas para a União Europeia e Potenciais Tecnologias [23]

As principais tecnologias emergentes para as matérias-primas críticas são as seguintes:

| <b>Matérias-primas</b>  | <b>Tecnologias emergentes (seleccionadas)</b>       |
|-------------------------|---|
| Antimónio               | ATO, micro condensadores                            |
| Cobalto                 | Baterias de lítio-cobalto, combustíveis sintéticos  |
| Gálio                   | Camadas finas de células fotovoltaicas, IC, WLED    |
| Germânio                | Cabos fibra óptica, tecnologias ópticas IR          |
| Índio                   | Mostradores, Camadas finas de células fotovoltaicas |
| Platina (MGP)           | Células combustíveis, catalizadores                 |
| Paládio (MGP)           | Catalizadores, dessalinização da água do mar        |
| Nióbio                  | Micro condensadores, ligas de ferro                 |
| Neodímio (Terras raras) | Imanes permanentes, tecnologia laser                |
| Tântalo                 | Micro condensadores, tecnologia médica              |

A directiva também altera um artigo importante relativamente as datas para se cumprir os objetivos já descritos: [23]

“c) Até 2025, a preparação para a reutilização e a reciclagem de resíduos urbanos devem aumentar para um mínimo de 55 %, em peso;

d) Até 2030, a preparação para a reutilização e a reciclagem de resíduos urbanos deve aumentar para um mínimo de 60 %, em peso;

e) Até 2035, a preparação para a reutilização e a reciclagem de resíduos urbanos deve aumentar para um mínimo de 65 %, em peso.”

Está previsto também uma possível prorrogação destes prazos por um máximo de cinco anos, desde que os Estados-Membros tenham preparado para reutilização e reciclado menos de 20% ou depositado em aterro mais de 60% dos resíduos urbanos produzidos em 2013, também deverá apresentar um plano de execução nos termos da Lei e notificar a Comissão o mais tardar 24 meses antes dos prazos estipulados nas alíneas anteriores. [23]

Outra questão abordada pela Directiva de 2018 de grande interesse para o trabalho é o problema do lixo marinho, objetivo partilhado pela Assembleia Geral das Nações Unidas em 2015 na Agenda para o Desenvolvimento Sustentável 2030, com foco em prevenir e reduzir a poluição marinha de todos os tipos até 2025, sobretudo os resultante das más práticas de gestão de resíduos sólidos, nomeadamente os resíduos de plástico.

### 3.4 PLANO DE AÇÃO PARA A ECONOMIA CIRCULAR NA COMUNIDADE EUROPEIA

A transição para uma economia sustentável, hipocarbónica, eficiente em termos de recursos e competitiva é apontada como uma oportunidade da União Europeia se proteger contra a escassez de recursos e volatilidade dos preços. Cenário em que o valor dos produtos, materiais e recursos mantém na economia o máximo de tempo possível e a produção de resíduos se reduzir ao mínimo. É uma possibilidade de poupar energia e evitar danos irreversíveis causados pela utilização de recursos a um ritmo superior a capacidade natural de renovação, em termos de clima, biodiversidade e poluição do ar, do solo e da água. Ou seja, a transição para a economia circular está diretamente relacionada com as prioridades de primeiro plano da UE. [4] entre as quais estão o crescimento e emprego, agenda de investimento, clima e energia, agenda social e inovação industrial, bem como com os esforços à escala mundial a favor do desenvolvimento sustentável.

Os agentes económicos são cruciais no efetivo funcionamento de uma economia circular, produtores e consumidores devem ser estimulados para a mudança de paradigma, porém as autoridades locais, regionais e nacionais devem viabilizar a transição, juntamente com a UE., cujas principais responsabilidades são:

- Promover o investimento e criação de condições equitativas;
- Eliminar eventuais obstáculos decorrentes da legislação europeia;
- Aprofundar o mercado único;
- Assegurar condições favoráveis para a inovação e o envolvimento de todas as partes interessadas.

Com o apoio do programa de investigação Horizonte 2020, da UE os Estados-Membros devem estimular as atividades sustentáveis em setores fulcrais da economia, de forma a desbloquear o potencial de crescimento e de emprego na economia circular. Para que isto se torne realidade, é preciso uma participação em longo prazo a todos os níveis, desde Estados-Membros e as autarquias até o cidadão. Este plano de ação proposto será primordial para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável até 2030, com destaque para o Objetivo 12, que consiste em garantir padrões sustentáveis de produção e consumo. [4]

Os diversos setores produtivos enfrentam desafios específicos no âmbito da economia circular, pelas diferentes cadeias de valor, pela pegada ambiental ou dependência de matérias-primas provenientes de países terceiros. É preciso analisar as diferentes fases do ciclo produtivo para se conseguir a interação plena em toda a cadeia de valor.

Um domínio prioritário para a implementação da economia circular é a necessidade de melhorar os índices de reciclagem de embalagens plásticas, haja vista que a produção de plástico tem aumentado a

um ritmo constante, porém são reciclados apenas 25% do plástico descartado nas cidades, sendo o aterro o destino de cerca de 50% deste material pós-consumo. Grande parcela dos plásticos também tem como destino os oceanos, sendo este o material o maior responsável pelo lixo marinho. A presença de aditivos e diferentes tipos de polímeros constituintes nas embalagens são desafios que impõe dificuldades técnicas na reciclagem, todavia a inovação neste setor pode contribuir para uma nova forma de armazenamento de alimentos e novas técnicas de reciclagem e reuso do material em um fluxo circular do material pós-consumo. [4]

### 3.4.1 A Transição em Portugal

Seguindo o mesmo caminho das políticas europeias, Portugal tem implementado estratégias e políticas que potenciam a transição para a economia circular. O Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal (PAEC) 2017-2020 estabelece prioridades, ações e metas e considera a EC um conceito estratégico que assenta na prevenção, redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energia, substituindo o conceito de fim-de-vida da economia linear por novos fluxos circulares de reutilização, restauração e renovação.

Foi identificado que a indústria nacional é fortemente dependente de recursos externos e combustíveis fósseis, não apenas em termos energéticos, mas também nas matérias-primas. Segundo o PAEC 2017-2020 o metabolismo de Portugal é lento, a economia acumula materiais: extrai e importa mais matéria-prima do que exporta produto acabado, acumulando materiais em stock, nomeadamente edifícios, infraestruturas, etc. O documento ainda divide em quatro subáreas fundamentais de investigação e inovação para atingir se atingir os compromissos assumidos até 2030: [4]

- Design e desenvolvimento de novos produtos, processos e serviços;
- Gestão sustentável dos ciclos de recursos;
- Governança e território;
- Novos modelos de negócio, comportamento e consumo.

Nos diferentes setores observam-se cada vez maior número de experiências em Portugal, a indústria têxtil, de serviços, de madeira e mobiliário são as que apresentam novos modelos de negócio e estratégias inter-organizacionais. Muitas dessas iniciativas surgem na forma de pesquisas paralelas/experimentais de produtos e serviços dentro das empresas, portanto é fulcral o entendimento do processo de difusão das tecnologias, práticas sociais e benefícios, diagnosticando assim os entraves existentes nestes processos.

### 3.5 A NOVA ECONOMIA DO PLÁSTICO

Desde as primeiras experiências com em laboratórios químicos por volta de 1860 - com o desenvolvimento do primeiro plástico a ter aplicações práticas - até 1960, somente cerca de 15 novos materiais entraram em fase de industrialização. Ou seja, os plásticos se desenvolveram lentamente nestes 100 anos iniciais, porém nas últimas décadas, a criação de novos materiais teve um progresso fantasticamente acelerado.[24]

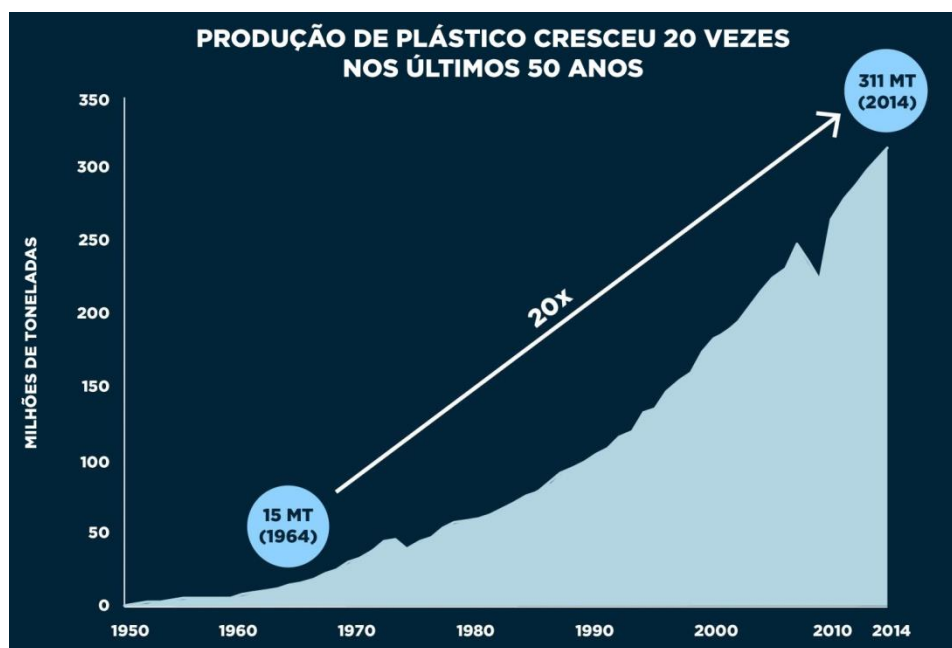


Figura 3.8 – Aumento na Produção de Plásticos [13]

Conforme uma definição generalista, plástico é todo material com propriedades de adquirir e conservar determinadas formas pela ação de uma força exterior. A plasticidade de muitos materiais ocorre em condições específicas, como o exemplo da argila, que quando completamente desidratada pode se apresentar em formato de pó e uma pequena quantidade deste pó pode ser dissolvida em água. Em nenhuma das condições anteriores a argila será um material plástico, o que somente ocorrerá se futuramente atingir uma proporção adequada entre os dois materiais. [25]

No âmbito técnico, “plástico” é um vocábulo aplicado um variado grupo de materiais sintéticos que são processados, aquecendo-os e moldando-os para que adquiriam uma geometria desejada. É um material artificial obtido pela combinação de carbono com oxigênio, hidrogênio, nitrogênio e outros elementos orgânicos ou inorgânicos que se apresenta sob a condição de plastômeros (materiais amolecidos, mas que não chegam a se liquefazer). [24] Neste estado, estas substâncias são injetadas ao interior de moldes que lhe darão a forma desejada, apresentando-se em estado sólido na sua fase final.

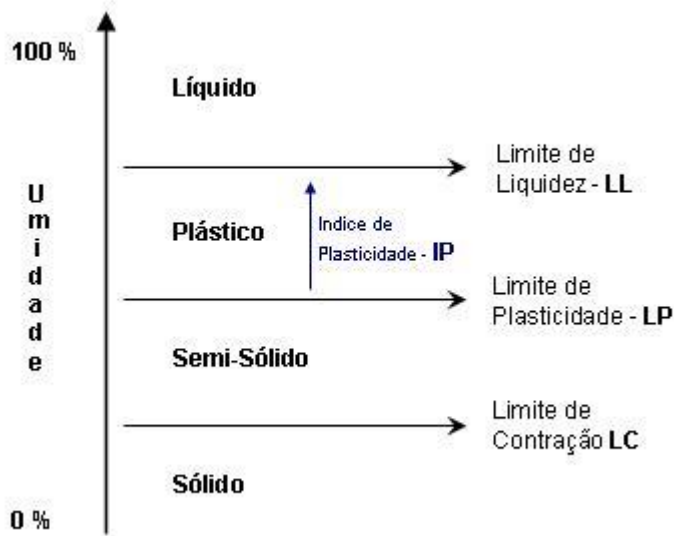


Figura 3.9 - Limites de Consistência dos Materiais (Limites de Atterberg) [25]

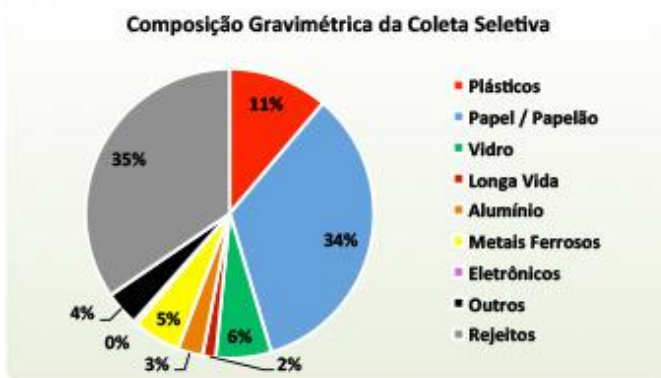
Quimicamente, os plásticos são compostos por uma cadeia de moléculas de alto peso molecular, chamados polímeros, macromoléculas com elevado número de átomos. Os polímeros são usualmente fabricados a partir de compostos químicos simples, designados monômeros como: fenol, uréia, etileno, etc. Existem aproximadamente cinquenta famílias básicas de polímeros, que se diferenciam pelo processo de fabrico, uso ou não de aditivos e suas proporções que resultam em diferentes características físico-químicas, podendo ser classificados em três categorias básicas: Termoplásticos, Termofixos e os Elastômeros. [30]

- Termoplásticos: produzidos por poliadiação, são plásticos que necessitam de calor para serem deformados e as elevadas temperaturas podem causar degradação ou decomposição. Portanto podem ser reaquecidos e moldados novamente sem que ocorra alteração significativa de suas propriedades. Os mais utilizados são o polietileno, polipropileno, PVC e os acrílicos.
- Termoendurecidos: produzidos por policondensação, ou seja, essas reações de condensação dão origem a macromoléculas de natureza mais complexa, que se apresentam solidificadas de forma irreversível. Os termofixos mais conhecidos são a resina fenólica (fenoplastos), a resina uréia (aminoplastos) e a resina melamínica (compostos melamínicos). [25]
- Elastômeros: são polímeros que, apesar das deformações elásticas em que são submetidos, sempre readquirem sua forma original. São denominados de borrachas sintéticas. Os mais

utilizados são o neoprene (policloropreno), o teflon, o SBR (estireno-butadieno) e o hypalon (polietileno clorossulfanado).

Apenas os Termoplásticos serão importantes para este trabalho devido ao foco no processo de reciclagem, especificamente o PET (Politereftalato de Etileno) por constituírem grande parte das embalagens primárias de alimentos, representando 42% dos plásticos de resíduos urbanos.

Tabela 3.2 – Porcentagem de PET nos Resíduos Plásticos Urbanos [24]





## CAPÍTULO 4

### COMPÓSITOS

Os compósitos são resultado da união de pelo menos dois materiais com características diferentes e qualidade complementares, que quando associados originam propriedades globais superiores às dos constituintes. Um exemplo clássico e vulgar são os compósitos fibrosos, que resultam da dispersão de fibras num material aglomerante (matriz). A incorporação de fibras para melhoria das propriedades dos materiais tradicionais tem origem nos primórdios da história, os primeiros casos foram os tijolos de argila reforçados com fibra de palha, referidos no Antigo Testamento. [26]

Atualmente o conjunto de materiais designados compósitos é muito vasto, desde o betão armado até aos compósitos de elevado desempenho à base de resina de epóxico reforçadas com fibra de carbono. As suas propriedades mecânicas dependem das características do reforço, no caso de fibras: seu comprimento, forma, orientação e distribuição, mas também da sua matriz e a respectiva técnica de fabrico. Em casos específicos poderão ser utilizados aditivos e cargas de enchimento (*fillers*) que podem ter diversos objetivos, como facilitar o manuseamento, melhorar características de moldação e pós-cura ou até mesmo para baixar o custo final do compósito. [30] É possível também uma classificação consoante a morfologia do reforço utilizado, dividindo-se em três grupos principais: compósitos reforçados de partículas, reforçados com fibras ou compósitos estruturais. A figura 4.3 abaixo ilustra de forma simples a classificação apresentada.

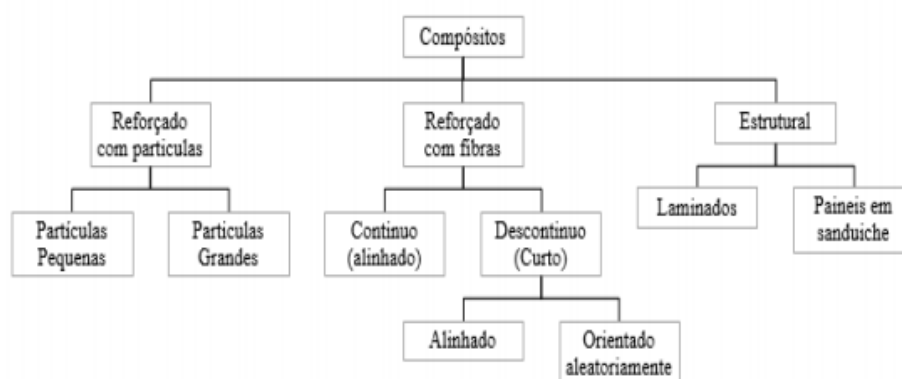


Figura 4.1 - Classificação dos Compósitos Consoante ao Reforço [24]

Devido ao avanço tecnológico nas indústrias na década de 80, os compósitos revolucionaram o setor automobilístico, substituindo peças em alumínio e proporcionando resistência e baixo peso aos veículos, além do aumento na segurança em caso de acidentes. Em regra, os compósitos em carbono têm se destacado na indústria aeroespacial pois apresentam elevada rigidez e baixo peso, características ideais para suportar condições severas, rigorosas temperaturas e elevadas tensões no material. Estruturas de carbono-epóxico tem particular interesse para aeronaves pois podem apresentar coeficientes de expansão térmica nulo e quando expostas diretamente aos raios solares mantem sua estabilidade dimensional. [26]

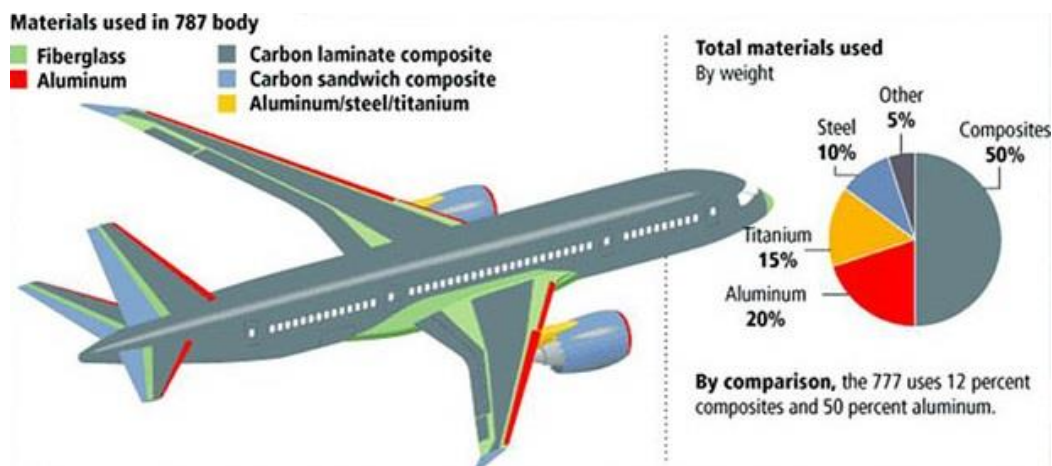


Figura 4.2 – Porcentagem de Compósitos Utilizados na Estrutura do Boeing 787 [27]

#### 4.1 COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA

Os materiais compósitos com fibra em matriz polimérica podem ser divididos em duas grandes famílias: as matrizes termoendurecíveis; as matrizes termoplásticas. Ambas possuem o mesmo papel de impossibilitar o movimento das fibras, isolando as mesmas do meio ambiente, além de conferir uma geometria estável que facilite as distribuições das solicitações a que o material esteja sujeito. As matrizes de qualidade têm como características: [24]

- Boa resistência a tração;
- Módulo de elasticidade elevado;
- Boa tenacidade e resistência ao impacto, ao corte e à degradação térmica;
- Coeficiente de dilatação térmica com valores próximos aos da fibra;
- Relativo baixo custo.

Os problemas que os termoplásticos apresentam estão relacionados a impregnação da matriz a fibra de reforço, motivo principal para os termoendurecíveis dominarem industrialmente o mercado de

compósitos. [32] A má impregnação das matrizes termoplásticas com reforço de fibras contínuas resultava numa baixa adesão entre os materiais, o que lhe conferia propriedades mecânicas fracas. No entanto, os compósitos de matriz termoplástica são mais dúcteis, tenazes, possuem ciclos de fabrico mais curtos e característica principal no âmbito do presente trabalho têm maior facilidade de reciclagem, reparação e reprocessamento que os termoendurecíveis. Na figura 4.2 é possível observar a alta taxa de crescimento que os compósitos termoplásticos apresentam na indústria aeroespacial, e a projeção até 2023. [29]

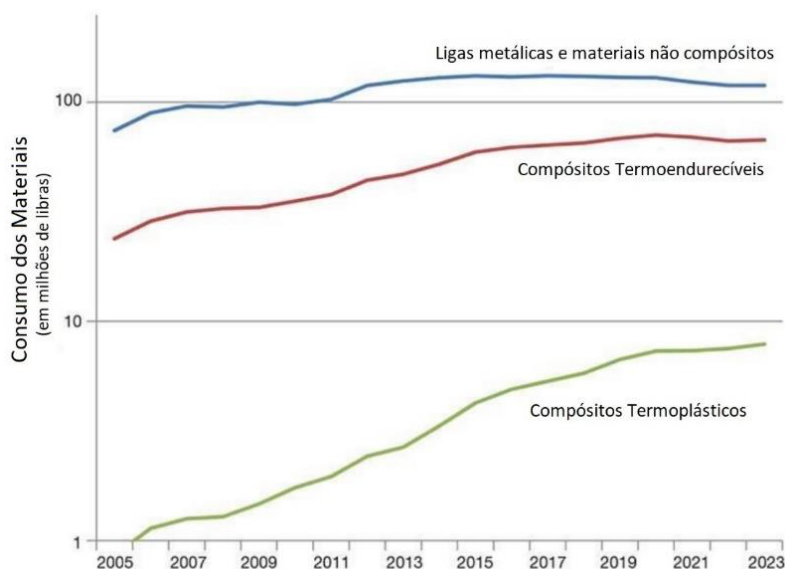


Figura 4.3 – Consumo de Compósitos na Indústria Aeroespacial (adaptado) [29]

A utilização das matrizes termoplásticas comporta, no entanto, também novos desafios tecnológicos e científicos que derivam, sobretudo, dos elevados níveis de temperatura e de pressão que o seu processamento exige. De facto, como os termoplásticos apresentam maior viscosidade que os termoendurecíveis, torna-se muito mais difícil e complexo a impregnação com eles e, conseqüentemente, a consolidação dos compósitos finais. [32] Por essa razão, o êxito da aplicação de compósitos de matriz termoplástico nos mercados comerciais ainda se encontra bastante dependente do desenvolvimento de novos processos de transformação ou adaptação dos equipamentos actualmente usados para a produção de compósitos de matriz termoendurecível às exigências do processamento de polímeros.

Os polímeros apresentam diferentes fases associadas a “temperaturas de transição”. Há um limite caracterizado como *temperatura de transição vítrea* ( $T_g$ ), temperatura em que marca a mudança de um comportamento rígido para um comportamento caracterizado pelo amolecimento e redução considerável do módulo de elasticidade, tornando-se dúcteis e facilmente deformáveis. Se continuarmos a aumentar a temperatura, o material atingirá a designada *temperatura de fusão* ( $T_m$ ), apresentando-se no estado líquido viscoso. [28]

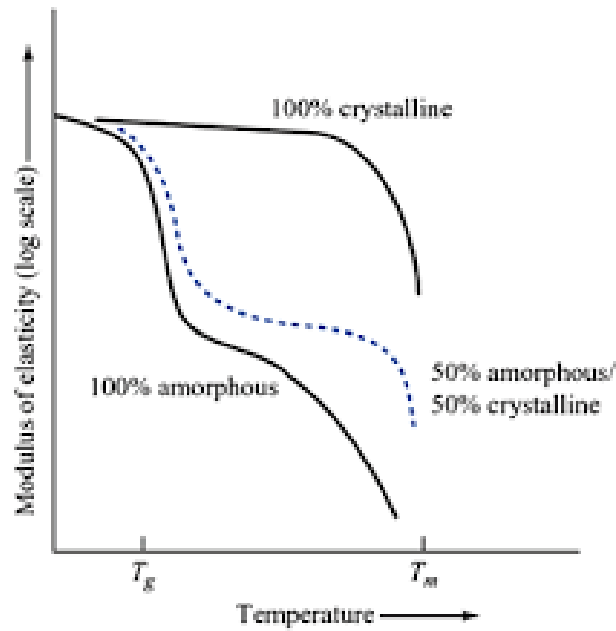


Figura 4.4 - Relação entre o Módulo de Elasticidade e o Aumento da Temperatura [28]

#### 4.1.1 Matrizes Termoplásticas

A matriz termoplástica encontra-se em estado sólido à temperatura ambiente e habitualmente em forma de grão, é processada pela variação do binómio calor e pressão. A grande vantagem destas matrizes é a possibilidade de reprocessamento através de ciclos de aquecimento e arrefecimento, praticamente sem redução de suas propriedades, o que promove a reciclagem. As suas características mecânicas em relação as matrizes termoendurecíveis são: melhor resistência ao impacto, melhor tenacidade e baixa higroscopia. Os polipropilenos (PP), as poliamidas (PA) e os policarbonatos (PC) são exemplos destas matrizes [27]

As principais funções da matriz são:

- Transmissão da força entre as fibras;
- Impedimento das quebras devido a expansão entre as fibras;
- Manutenção das fibras e sua apropriada orientação;
- Proteção das fibras do meio externo.

### 4.1.2 Fibras de Reforço

Uma das principais razões para as excelentes propriedades dos compósitos resulta de as fibras apresentarem propriedades mecânicas muito superiores às dos materiais idênticos na forma maciça. Facto demonstrado pela primeira vez quando constatado que o vidro possuía tensões de rotura de cerca de 170 Mpa, enquanto as fibras de vidro (com cerca de 20 $\mu$ m de diâmetro) alcançavam tensões de rotura de 3500 Mpa. A tabela abaixo ilustra essa diferença de propriedades entre algumas fibras e seus respectivos materiais na forma maciça [26]

Tabela 4.1 - Característica das Fibras em Relação aos Materiais na sua Forma Maciça [24]

| Material                        | Módulo de elasticidade (E) (GPa) | Resistência à tracção ( $\sigma_u$ ) (GPa) | Densidade ( $\rho$ ) (g/cm <sup>3</sup> ) | Módulo específico (E/ $\rho$ ) | Resistência específica ( $\sigma_u/\rho$ ) |
|---------------------------------|----------------------------------|--|---|--------------------------------|--|
| <b>Fibras:</b>                  |                                  |  |   |                                |  |
| Vidro E                         | 72.4                             | 3.5  | 2.54                                      | 28.5                           | 1.38                                       |
| Vidro S                         | 85.5                             | 4.6  | 2.48                                      | 34.5                           | 1.85                                       |
| Carbono (HM)                    | 390                              | 5.5  | 1.90                                      | 205                            | 2.9  |
| Boro                            | 385                              | 2.8  | 2.63                                      | 146                            | 1.1  |
| Sílica                          | 72.4                             | 5.8  | 2.19                                      | 33                             | 2.65                                       |
| Tungsténio                      | 414                              | 4.2  | 19.3                                      | 21                             | 0.22                                       |
| Berílio                         | 240                              | 1.3  | 1.83                                      | 131                            | 0.71                                       |
| Kevlar® 49                      | 130                              | 2.8  | 1.50                                      | 87                             | 1.87                                       |
| <b>Materiais convencionais:</b> |                                  |  |   |                                |  |
| aço                             | 210                              | 0.34 – 2.1                                 | 7.8                                       | 26.9                           | 0.043 – 0.27                               |
| Ligas de Al                     | 70                               | 0.14 – 0.62                                | 2.7                                       | 25.9                           | 0.052 – 0.23                               |
| vidro                           | 70                               | 0.7 – 2.1                                  | 2.5                                       | 28                             | 0.28 – 0.84                                |
| Tungsténio                      | 350                              | 1.1 – 4.1                                  | 19.3                                      | 18.1                           | 0.057 – 0.21                               |
| Berílio                         | 300                              | 0.7  | 1.83                                      | 164                            | 0.38                                       |

As fibras podem ser classificadas conforme o conceito Tex, este termo designa o peso de 1000 metros de um fio composto por aproximadamente 20 filamentos, como exemplo se tivéssemos 50 gramas de fibra por cada 1000 metros, teríamos a um Tex de 50.



Figura 4.5 - Diferentes Cortes e Formatos de Fibra de Vidro [32]

## **4.2 PROCESSAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS**

Este capítulo refere-se ao conjunto de técnicas utilizadas que conduziram à obtenção das peças em materiais compósitos de matrizes poliméricas recicladas. O desenvolvimento tecnológico recente tem permitido acentuar o grau de automação dos processos de fabrico tornando-os economicamente competitivos. Os diferentes processos de produção podem ser classificados em dois tipos: processos de molde aberto ou processos em molde fechado. Nos primeiros, apenas uma das superfícies da peça tem bom acabamento, limitação que é compensada pela facilidade de realizar componentes de grandes dimensões ou geometrias complexas. Já os componentes produzidos em moldes fechados apresentam excelente acabamentos nas duas superfícies e ótima reprodutibilidade, além de emitir menos produtos voláteis nocivos à saúde.

Diversos são os processos de produção de compósitos, as peças produzidas neste trabalho foram produzidas inicialmente pela impregnação por mistura íntima de pó com as fibras de reforço (towpreg) e posteriormente processadas por pultrusão, portanto serão descritos a seguir estas duas etapas da produção dos perfis compósitos utilizados nesta dissertação. Todos os trabalhos descritos a seguir foram realizados no laboratório de compósitos, edifício F do ISEP.

### **4.2.1 Impregnação por Mistura Íntima de Pó Termoplástico com Fibras de Reforço**

A parte inicial do processo de fabrico é a própria produção do pré-impregnado, que neste caso consiste em fazer a deposição de pó termoplástico a seco (matriz) sobre fibras contínuas (reforço), o produto deste processo é o towpreg. Comparativamente a outros processos de impregnação, a mistura do termoplástico em pó com o reforço apresenta algumas vantagens como a não dependência da viscosidade do termoplástico usado como matriz e a ausência de solventes, água ou aditivos que poderiam originar vazios no compósito. [29]

O processo inicia-se no desenrolamento das mechas de fibra, sendo levadas a passar por um espalhador, onde os filamentos são separados e espalhados, logo após esses filamentos são aquecidos em forno de convecção e entram na câmara de deposição de pó termoplástico depositado a seco, nos fornos de consolidação acontece a efectiva adesão entre a fibra e o polímero em pó e por fim tem-se o enrolamento em bobinas do pré-impregnado final (towpreg).



Figura 4.6 - Equipamento Utilizado para Produção de Pré-Impregnados (Towpreg) no ISEP [29]

#### 4.2.2 Pultrusão

Esta é uma técnica de fabrico em contínuo através do qual se produzem perfis de secção constante em materiais compósitos, podem ser ocós ou maciços, de diferentes geometrias consoante aos moldes utilizados. As fibras de reforço são dispostas de modo a proporcionarem um reforço longitudinal, sendo tipicamente na forma de roving, manta ou tecido.

As mechas pré-impregnadas são desenroladas e guiadas até o forno de pré-aquecimento, até o polímero atingir a sua temperatura de fusão, condição necessária para a próxima etapa. Na primeira fieira o pré-impregnado é aquecido e pressurizado dentro do molde resultando na geometria desejada. Na segunda fieira ocorre o arrefecimento e tem como objetivo solidificar o termoplástico e consolidar a geometria moldada na fieira anterior. O sistema de puxo controla a velocidade do processo. [29] A velocidade típica da pultrusão é de 0,5 a 2 metros por minuto, a depender dos materiais, espessuras e complexidade do perfil. [25]



Figura 4.7 – Equipamento à esquerda: Pultrusora; Equipamento à direita: Towpreg [29]

A utilização de matrizes termoplásticas em vez das termoendurecíveis tem vantagens como inexistência de problemas ligados a cura ou mistura do banho de resina termoendurecível, melhor qualidade do ambiente de trabalho, reciclagem dos polímeros não utilizados e a possibilidade de obter-se perfis curvos. No entanto, a cadência de produção de termoplásticos é consideravelmente menor que a dos termoendurecíveis. [29]

Outras vantagens deste processo são a produção contínua totalmente automática, com pouca incorporação de mão de obra ao produto final, excelentes características mecânicas na direção longitudinal em virtude dos altos índices de fibras (30 a 70%) em peso e a versatilidade de peças e geometrias que podem ser obtidas. As desvantagens do processo são a limitação de fabrico de componentes com secção constante, não haver grande rigor dimensional, o reforço estar limitado a direção longitudinal e no caso de utilização de resinas termoplásticas (maior viscosidade) seriam necessárias maiores forças de arrasto e o processo tornar-se-ia mais complexo. [25]

## CAPÍTULO 5

### PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo será descrita a componente prática e experimental realizada nesta dissertação. Como já referido anteriormente no trabalho, o interesse em utilizar estes compósitos para sistemas de cofragens nos levou a estudar o seu comportamento quando submetidos à exposição solar e humidade durante o período de cura da argamassa e quando exposto a alcalinidade do cimento, de forma a simular as condições reais dos moldes e cofragens.

Portanto, inicialmente foram produzidos provetes pelo processo de pultrusão no laboratório de compósitos do ISEP durante o mês de abril de 2019, posteriormente foram testados em 3 diferentes situações, todas elas expostas as condições climáticas em junho na cidade do Porto: provetes originais, provetes em contacto com argamassa de cimento e provetes em contacto com óleo descofrante. As amostras permaneceram sob as condições atmosféricas naturais, durante período máximo de 14 dias. Finalmente após este período, os provetes foram medidos e ensaiados à flexão junto ao laboratório de ensaios mecânicos do ISEP.

#### 5.1 MATÉRIAS PRIMAS

##### 5.1.1 Fibra de Reforço

Neste trabalho utilizou-se como reforço a fibra de vidro. Como já referido anteriormente é um material com excelente custo-desempenho e é vulgarmente utilizado na engenharia actualmente. As fibras de vidro utilizada para o fabrico dos pré-impregnados foram fornecidas pela empresa Owens Corning, com um peso linear de 2400 g/km (Tex 2400).

As fibras de vidro foram escolhidas para o presente trabalho por constituírem o tipo de reforço mais utilizado, mais especificamente as fibras de vidro tipo E. Esta fibra é produzida a partir de um vidro de borossilicato com baixa quantidade de compostos alcalinos e apresenta boas propriedades elétricas,

mecânicas e químicas, além de baixo custo de mercado. Apresenta uma densidade próxima a  $2.6 \text{ g/cm}^3$ , módulo de Young de 76 e tensão de rotura de 3500 Mpa. [25]

### 5.1.2 Matriz Termoplástica

Utilizou-se como matriz termoplástica o PET reciclado resultado de uma reciclagem industrial. Ainda por ser um material experimental não se tem todas as propriedades determinadas. O PET (Poliitereftalato de Etileno) é um poliéster termoplástico que apresenta elevada dureza, resistência ao desgaste, alta transparência, dimensionalmente estável e excelentes propriedades de barreira a gases, produtos químicos e humidade. As características descritas fizeram do PET o material ideal a embalagens de bebidas. A elevada resistência a altas temperaturas e adequada inércia química tornaram o PET ideal para embalagens de alimentos pré-cozinhados e saquetas de alimentos possível de se aquecer utilizando a própria embalagem. [30]

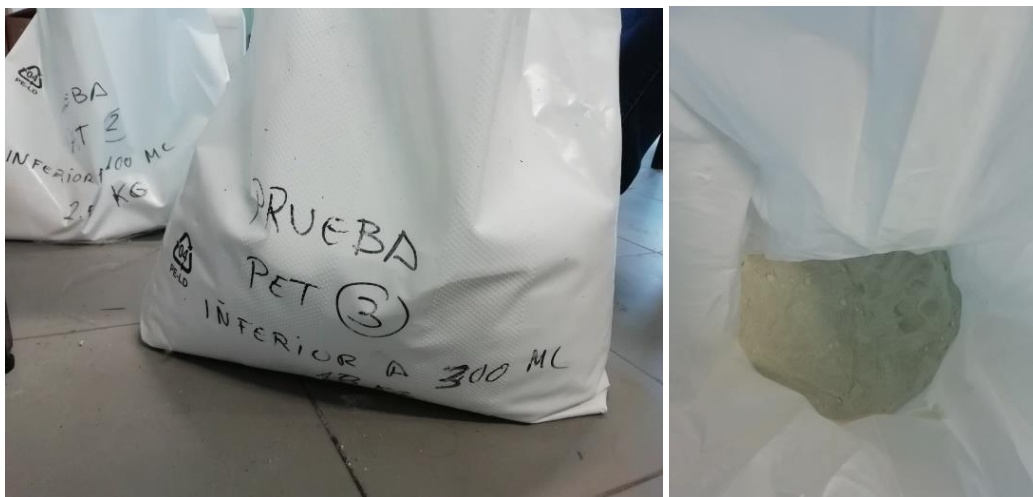


Figura 5.1 – Matriz Termoplástica de PET Reciclado em Pó [Fonte: o autor]

Tabela 5.1 - Propriedades típicas de matrizes termoplásticas usadas em compósitos [29]

| Propriedade               | Unidade | PP      | PA6     | PET     | PPS     | PEI     | PEEK    |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Densidade                 | -       | 0,9     | 1,1     | 1,3     | 1,35    | 1,26    | 1,3     |
| Módulo de Young           | GPa     | 1,4     | 3,0     | 3,5     | 3,4     | 3,4     | 3,6     |
| Tensão de rotura          | MPa     | 31-42   | 35      | 48-73   | 48-87   | 62-150  | 70-105  |
| Temperatura fusão         | °C      | 165     | 220     | 250     | 285     | -       | 335     |
| Temperatura processamento | °C      | 190-230 | 230-285 | 260-350 | 310-335 | 340-370 | 340-400 |
| Custo relativo            | €/kg    | 1       | 1,8     | 2,8     | 4,9     | 10,9    | 51      |

## 5.2 PRODUÇÃO DE PRÉ-IMPREGNADOS

O equipamento utilizado neste trabalho para o fabrico de towpreg encontra-se no laboratório de compósitos do ISEP e seu funcionamento será descrito resumidamente dividindo o equipamento em 6 módulos:

- I. Desenrolador
- II. Espalhador
- III. Forno de Convecção
- IV. Câmara de Deposição
- V. Forno de Consolidação
- VI. Enrolador

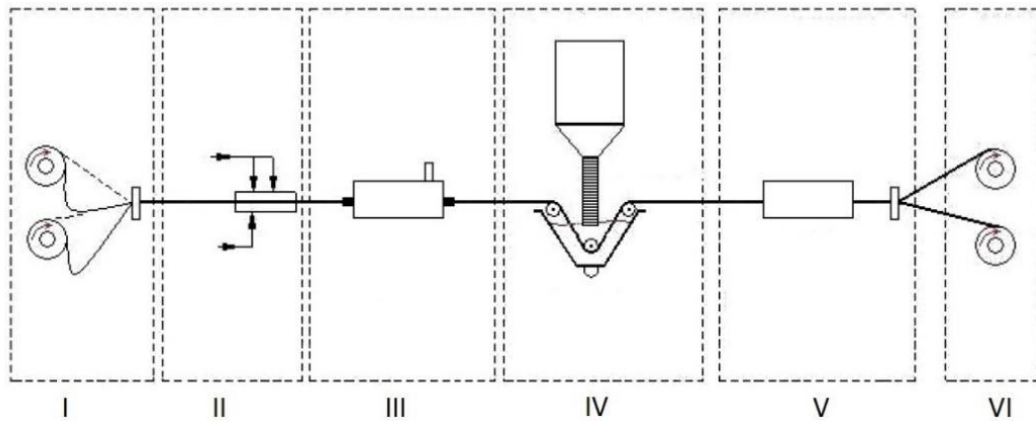


Figura 5.2 – Diferentes partes do Equipamento de Produção de Towpreg [29]

O processo inicia-se com o desenrolamento das fibras (módulo 1), local de armazenamento e fornecimento das fibras de reforço. O desenrolador é acionado por um sistema pneumático para garantir o tensionamento da fibra, enquanto os rolos estão em contacto entre si e são acionados por um motor elétrico que controla a velocidade de desenrolamento. A tensão em que se mantém a fibra após o rolo e a velocidade de puxo são parâmetros importantes para se ter em conta no processo de fabrico.

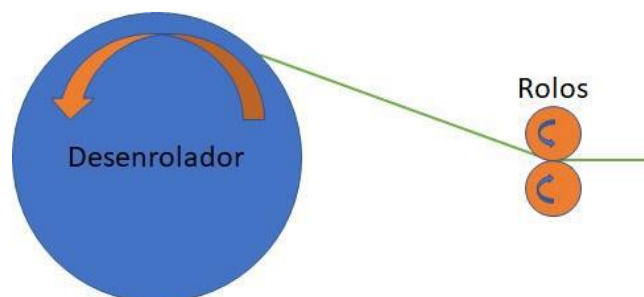


Figura 5.3 – Vista Lateral do Módulo 1 [29]

Já o segundo módulo consiste num espalhador das fibras alimentado a ar comprimido. O objetivo desta etapa é espalhar as fibras para facilitar a distribuição do polímero em pó entre elas. A largura da entrada é cerca de 3 vezes menor que a saída e esta parte do equipamento é feita em acrílico para se observar o funcionamento interior conforme visto na figura a seguir.

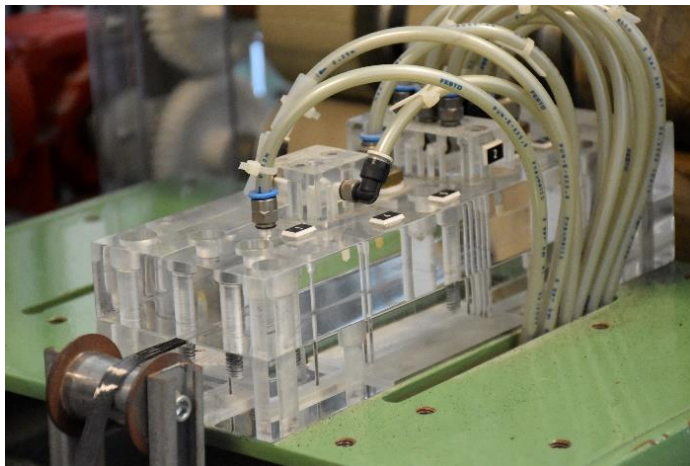


Figura 5.4 – Espalhador em Acrílico e a Alimentação de Ar Comprimido [29]

O módulo 3 consiste em um forno de convecção para aquecimento das fibras já espalhadas. Um soprador de ar quente elétrico com fluxo de ar comprimido aquece as fibras a tal temperatura que as fibras, quando mergulhadas na tina com o polímero em pó, adiram ao polímero com facilidade. Um computador faz o controlo elétrico de todo o sistema, onde são definidas as velocidades, temperaturas e todas as variáveis inerentes ao processo de fabrico dos pré-impregnados.

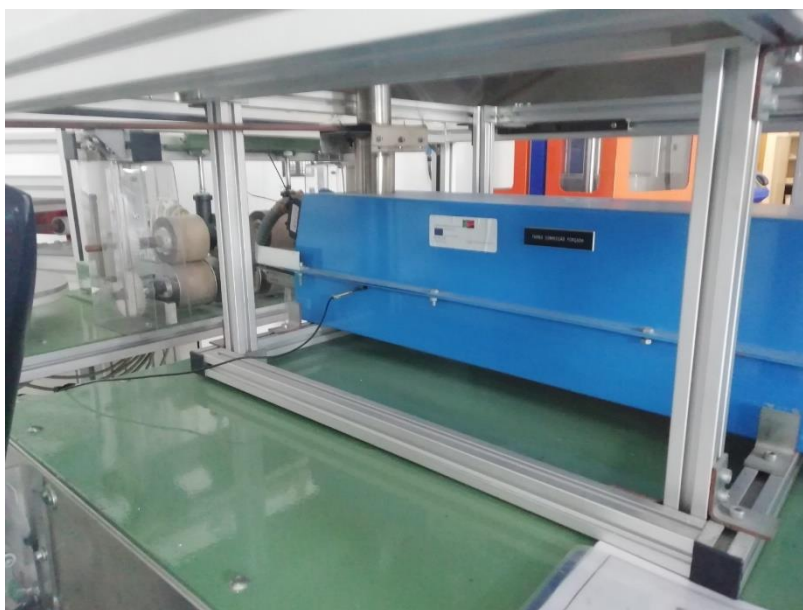


Figura 5.5 – Forno de Convecção Forçada [Fonte: o autor]

No módulo 4 temos o mergulhador e a tina, onde as fibras já espalhadas e aquecidas entram na tina e ocorre a deposição do pó seco de PET reciclado sobre a fibra de vidro. O mergulhador permanece na posição superior no momento inicial do alinhamento das fibras, porém quando a fibra entra na tina o mergulhador desloca-se verticalmente tensionando a fibra para baixo para imergir a fibra no polímero em pó e proporcionar melhor adesão entre o polímero e a fibra.



Figura 5.6 – Tina e Mergulhador com Matriz Termoplástica em Pó [29]

Após sair da tina as fibras chegam ao módulo V, fornos de consolidação baixam a viscosidade do polímero, reduzindo assim alguma granulometria, impregnando-se as fibras por efeito da temperatura, tornando o towpreg arrefecido mais rígido para se encaminhar ao último módulo de enrolamento.



Figura 5.7 – Forno de Consolidação [29]

Já com as fibras impregnadas ao polímero chega-se ao último módulo, o enrolador, que tem seu funcionamento de forma semelhante ao primeiro módulo. Nesta etapa final o enrolador puxa os pré-impregnados para armazená-los de forma a serem utilizados nos processos posteriores de transformação em materiais compósitos.

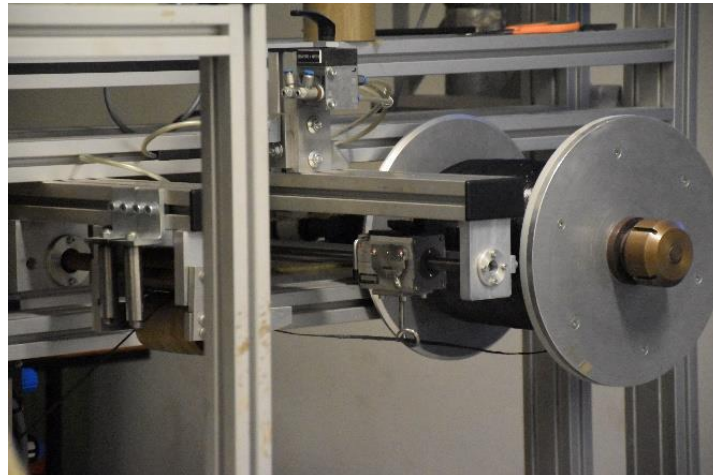


Figura 5.8 – Etapa final do Processo: Enrolador [Fonte: o autor]

### 5.3 TRANSFORMAÇÃO DE PRÉ-IMPREGNADOS POR PULTRUSÃO

A pultrusão é um dos possíveis processos de transformação de Towpreg em perfis compósitos, conforme já descrito anteriormente no capítulo 4.2.2. A produção destes perfis ocorreu durante o mês de abril de 2019 e foi utilizado o equipamento instalado junto ao laboratório de compósitos do ISEP.

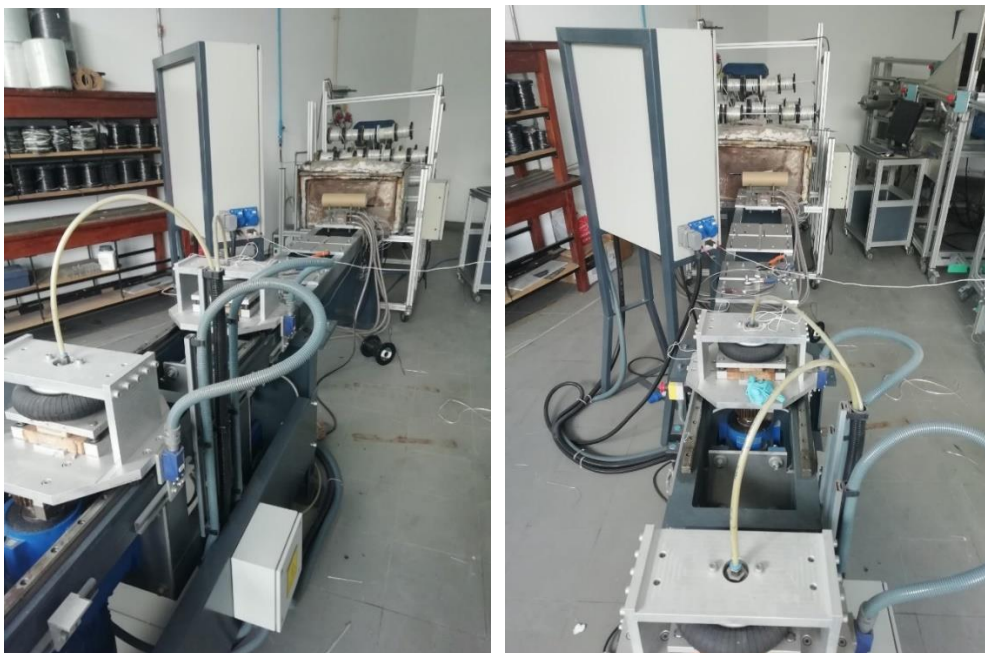


Figura 5.9 – Pultrusora Instalada no ISEP [Fonte: o autor]

O fabrico de perfis compósitos por pultrusão inicia-se com o fornecimento, guiamento e pré-aquecimento dos rovings. As bobines de towpreg fornecem as fibras pré-impregnadas, que são alinhadas e entram paralelamente no forno de pré-aquecimento onde o polímero é aquecido e preparado para o aquecimento propriamente dito.

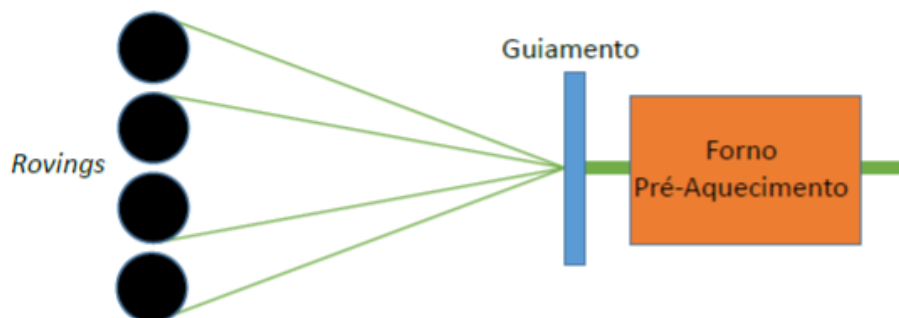


Figura 5.10 – Vista Lateral do Fornecimento dos Rovings – Etapa Inicial [29]

A seguir temos as duas fieiras de aquecimento e arrefecimento que conferem a geometria ao perfil, sendo aplicada temperatura e pressão pré-determinada para se obter o perfil desejado. Neste trabalho foi utilizada a geometria conforme figura a seguir, dimensões determinadas pela norma para os ensaios de flexão.

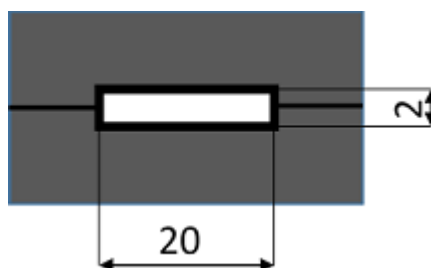


Figura 5.11 – Molde Utilizados no Fabrico dos Perfis Compósitos Pultrudidos [29]

A última etapa do processo é formada pelo sistema de puxo e corte, consiste em dois carrinhos que ficam no fim do equipamento e fazem o controlo da velocidade de puxo que é sempre constante. Esses carrinhos deslocam-se longitudinalmente por motores elétricos e os perfis são presos aos carrinhos por atuadores pneumáticos. Já com o perfil pultrudido o corte é feito com o auxílio de uma serra manual.

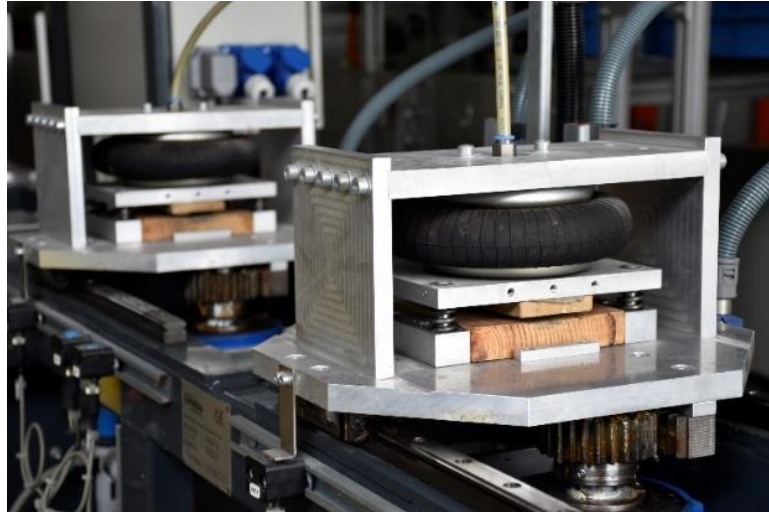


Figura 5.12 – Sistema de Puxo [Fonte: o autor]

#### 5.4 CONTACTO COM MEIO ALCALINO

Para analisar o contacto com o cimento nos perfis compostos optou-se por barrar uma argamassa de cimento nos provetes e compará-los com provetes similares submetidos as mesmas condições atmosféricas, sem contacto com meio alcalino (originais). Devido a restrição na disponibilidade do material, foram produzidos 3 provetes para cada uma das 4 condições temporais quando se interrompeu o contacto com a argamassa: 1 dia, 3 dias, 7 dias e 14 dias, num total de 12 provetes. Seus resultados foram comparados aos provetes sujeitos as mesmas condições, porém sem argamassa, de forma a comprovar se o meio alcalino reduz a capacidade resistente dos perfis pultrudidos.



Figura 5.13 –Identificação de Provetes, dimensões próprias para o Ensaio de Flexão [Fonte: o autor]

As amostras foram produzidas com espessura média de 2mm e largura de 20mm, dimensões estipuladas na norma ISO 14.125:1998 que determina as propriedades de flexão de materiais compostos termoplásticos, assunto detalhado no próximo capítulo. O comprimento das amostras ficou com 100mm

na média, apenas para apresentar estabilidade junto ao ensaio de flexão, cujos apoios estão a 80mm de distância. A tabela com as dimensões de todas as amostras pode ser encontrada nos anexos.

Para execução da argamassa, seguiu-se o procedimento referido em NP EN 196/1:2006 (IPQ, 2006), norma que padroniza os métodos de ensaio de cimentos e suas resistências mecânicas. Assim sendo, o procedimento utilizado foi o seguinte:

- i) homogeneização manual da massa sólida da mistura;
- ii) introdução da água no copo da misturadora;
- iii) introdução da massa sólida homogeneizada no copo da misturadora;
- iv) início da mistura, acionando a misturadora durante 90 segundos em velocidade lenta;
- v) interrupção do funcionamento da misturadora, deixando a argamassa repousar durante 90 segundos, sendo que os primeiros 15 segundos do tempo de repouso foram utilizados para juntar à mistura a argamassa aderente as paredes do copo;
- vi) reinício do funcionamento da misturadora durante 60 segundos em velocidade lenta.

A misturadora utilizada é composta de um copo de 3 litros, uma pá de mistura e é dotada de duas velocidades (lenta e rápida) e está localizada no laboratório de materiais de construção do ISEP. Foi utilizado 225g do cimento Portland apresentado na tabela 5.3 (CEM1-42,5R) e 450g de areia normalizada, seguindo a norma foi utilizado uma relação água/cimento de 0,5.



Figura 5.14 – Misturadora e os Materiais Utilizados na Argamassa [Fonte: o autor]

Para se obter uma elevada proporção de cimento na mistura e conseqüentemente produzir uma argamassa com maior resistência e elevada libertação de calor no processo de cura, optou-se por um traço de 1:2 (relação entre a relação de cimento e areia). O cimento utilizado foi o cimento Portland (CEM I-42,5R) da fabricante *CIMPOR*, disponibilizado pelo laboratório de materiais de construção do ISEP.

Tabela 5.2 - Características dos cimentos CEM I 42,5R (NP EN 197-1) [Fonte: Ficha Técnica: *CIMPOR*]

| Características |   |        | Cimentos    |                  | Norma        |
|-----------------|---|--------|-------------|------------------|--------------|
|                 |   |        | CEM I 42,5R | CEM II/A-L 42,5R |              |
| Mecânicas       | Valores mínimos de resistência à compressão (MPa) | 2 dias | 20          |                  | NP EN 196-1  |
|                 |   | 7 dias | 42,5        |                  |              |
| Físicas         | Início de presa (min)                             |        | ≥ 60        |                  | NP EN 196-3  |
|                 | Expansibilidade (mm)                              |        | ≤ 10        |                  |              |
| Químicas        | Teor de sulfatos (SO <sub>3</sub> )               |        | ≤ 4%        |                  | NP EN 196-2  |
|                 | Teor de cloretos (CL)                             |        | ≤ 0,10%     |                  | NP EN 196-21 |

A argamassa foi aplicada nos provetes de modo a formar uma camada de cerca de 10mm em contato com 80% (em média) dos provetes conforme a figura 5.15.



Figura 5.15 – Provetes em Contacto com Meio Alcalino (10mm espessura argamassa) [Fonte: o autor]

Após o primeiro dia exposto ao sol as primeiras 8 amostras (3 com argamassa e 5 sem argamassa) foram retiradas das condições exteriores, com a ajuda de uma espátula metálica a camada de argamassa foi retirada com facilidade devido a baixa rugosidade superficial do material. Após este procedimento, as amostras foram guardadas em sacos plásticos com a devida identificação, de forma semelhante procedeu-se para as condições de 3 dias, 7 dias e finalmente 14 dias.



Figura 5.16 – Argamassa Retirada dos Provetes [Fonte: o autor]

Tabela 5.3 – Numeração dos Provetes e Períodos de Exposição Exterior [Fonte: o autor]

| <b>condição</b>   | <b>nº provetes por condição</b> | <b>provetes limpos</b> | <b>provetes em contacto COM ARGAMASSA</b> | <b>provetes em contacto com óleo descofrante</b> |
|-------------------|---------------------------------|------------------------|---|--|
| ZERO              | <b>05 provetes</b>              | 0-1                    |   |  |
|                   |                                 | 0-2                    |   |  |
|                   |                                 | 0-3                    |   |  |
|                   |                                 | 0-4                    |   |  |
|                   |                                 | 0-5                    |   |  |
| UM (1 dia)        | <b>08 provetes</b>              | 1-1                    | 1-1 A                                     |  |
|                   |                                 | 1-2                    | 1-2 A                                     |  |
|                   |                                 | 1-3                    | 1-3 A                                     |  |
|                   |                                 | 1-4                    |   |  |
|                   |                                 | 1-5                    |   |  |
| TRÊS (3 dias)     | <b>08 provetes</b>              | 3-1                    | 3-1 A                                     |  |
|                   |                                 | 3-2                    | 3-2 A                                     |  |
|                   |                                 | 3-3                    | 3-3 A                                     |  |
|                   |                                 | 3-4                    |   |  |
|                   |                                 | 3-5                    |   |  |
| SETE (7 dias)     | <b>08 provetes</b>              | 7-1                    | 7-1 A                                     |  |
|                   |                                 | 7-2                    | 7-2 A                                     |  |
|                   |                                 | 7-3                    | 7-3 A                                     |  |
|                   |                                 | 7-4                    |   |  |
|                   |                                 | 7-5                    |   |  |
| CATORZE (14 dias) | <b>13 provetes</b>              | 14-1                   | 14-1 A                                    | D-1  |
|                   |                                 | 14-2                   | 14-2 A                                    | D-2  |
|                   |                                 | 14-3                   | 14-3 A                                    | D-3  |
|                   |                                 | 14-4                   |   | D-4  |
|                   |                                 | 14-5                   |   | D-5  |

## 5.5 CONTACTO COM ÓLEO DESCOFRANTE

Cinco provetes foram testados após contacto com óleo descofrante. O óleo descofrante utilizado foi o RELAGO 432, fabricado pela empresa Euromodal. Sendo um óleo descofrante de base vegetal e elevado rendimento adequado para moldes em madeira ou aço. A ficha técnica do produto encontra-se nos anexos deste trabalho. O produto foi aplicado com rolo, no provete já limpo e seco e permaneceu durante 14 dias exposto às condições exteriores junto aos demais provetes.

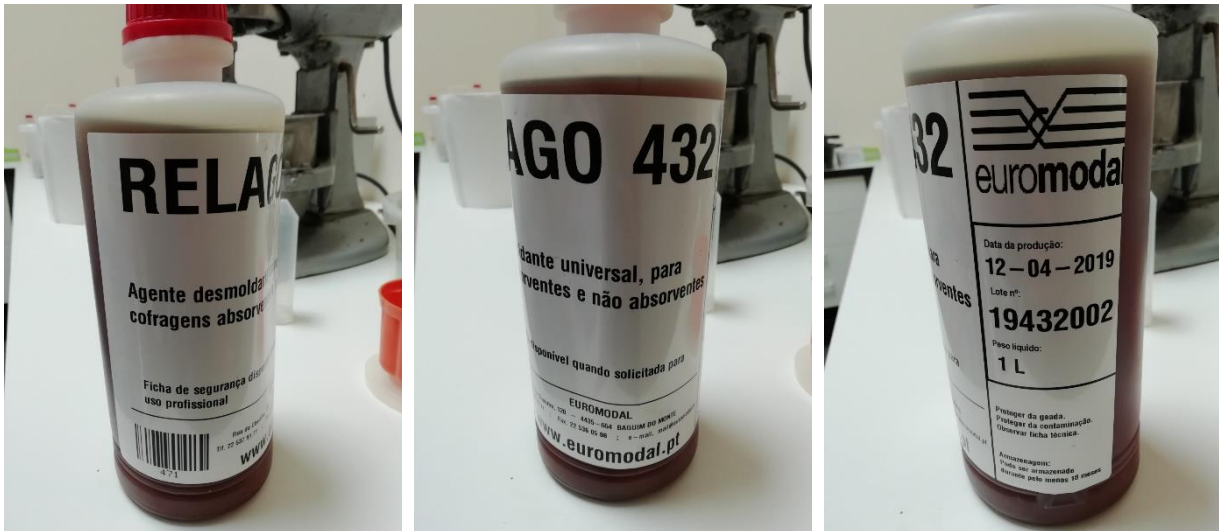


Figura 5.17 – Óleo descofrante utilizado no procedimento experimental [Fonte: o autor]

## 5.6 ENSAIO DE FLEXÃO

Os ensaios de flexão foram realizados conforme a norma internacional ISO 14 125:1998. O documento especifica dois métodos para a determinação das propriedades de flexão para compósitos termoplásticos reforçados com fibra, foi utilizado o método A – ensaio de flexão a três pontos, frequentemente utilizado na determinação de propriedades mecânicas em materiais frágeis. Os ensaios foram realizados durante o mês de junho no equipamento universal de ensaios Shimadzu, que podemos ver na figura adiante, instalada no Laboratório de Ensaios Mecânicos do ISEP, com uma célula de carga de 100kN. O método é usado para investigar o comportamento de flexão dos corpos de prova e para determinar a resistência à flexão, módulo de flexão e outros aspectos da relação tensão / tensão de flexão sob condições definidas.

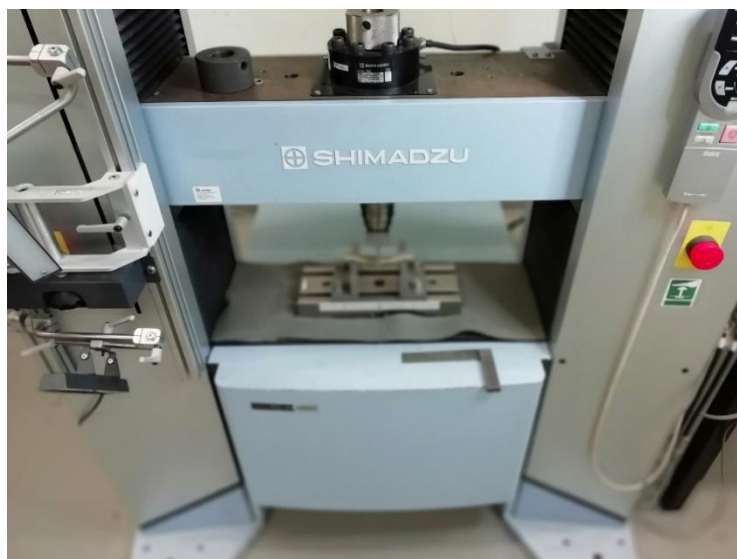


Figura 5.18 – Equipamento Utilizado para o Ensaio de Flexão [Fonte: o autor]

Neste ensaio o provete foi colocado sob dois apoios com 80mm de distância entre si e com a ajuda de um esquadro metálico simples, garantiu-se o correto posicionamento da amostra junto ao equipamento. A deflexão da amostra ocorreu com velocidade constante de 2mm/minuto até que ocorresse a fratura ou a deformação máxima pretendida. Durante este procedimento, a força aplicada e o deslocamento da amostra foram medidos e utilizados como base para o desenvolvimento do diagrama tensão x deformação.

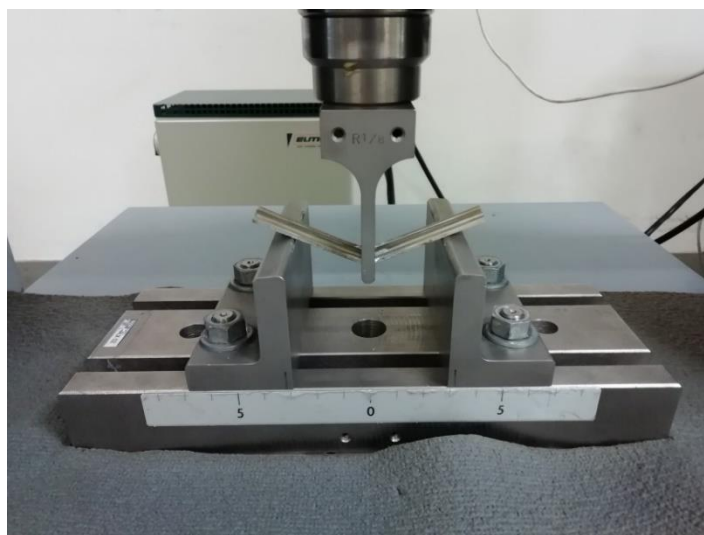


Figura 5.19 – Ensaio de Flexão Após Deflexão do Provete [Fonte: o autor]

Inicialmente foram feitos ensaios do material na condição chamada 0 (zero) em que não se teve contato com sol ou argamassa de cimento e serviram como referência para comparações com resultados dos ensaios posteriores. Além desta condição inicial foram feitos 20 ensaios nos provetes que não tiveram contacto com argamassa, doze ensaios nos provetes em contacto com a argamassa conforme descrito no capítulo 5.4 e mais 5 ensaios conforme 5.5 (óleo descofrante), totalizando 42 ensaios de flexão.



Figura 5.20 – Paquímetro e a Medição dos Provetes [Fonte: o autor]

As dimensões dos provetes encontram-se nos anexos deste trabalho e a medição destas dimensões foi realizada com um paquímetro digital *Mitutoya Absolute Digimatic* de 150mm. Após a realização dos ensaios, foram calculadas as seguintes propriedades à flexão dos perfis conforme especificado na norma ISO 14 125:1998:

### 5.6.1 Tensão de Rotura

A tensão de rotura foi calculada conforme a equação:

$$\sigma_f = \frac{3 F L}{2 b h^2} \quad (5.1)$$

onde:

$\sigma_f$  — é a tensão de rotura à flexão, em Megapascal;

$F$  — é a força máxima aplicada, em Newtons;

$L$  — é a distância entre apoios, em milímetros;

$b$  — é a largura média do provete, em milímetros;

$h$  — é a espessura média do provete, em milímetros.

$s$  — é a deflexão do provete a meio vão, em milímetros;

A norma apresenta no anexo B uma alternativa para a correção da tensão de rotura quando a deflexão é maior que 10% da distância entre apoios, ou seja, maior que 8mm, portanto corrigimos os valores da tensão de rotura conforme a equação:

$$\sigma_f = \frac{3 F L}{2 b h^2} \left\{ 1 + 6 \left( \frac{s}{L} \right)^2 - 3 \left( \frac{s h}{L^2} \right) \right\} \quad (5.2)$$

### 5.6.2 Deformação

A deformação foi calculada conforme a equação:

$$\varepsilon = \frac{6 s h}{L^2} \quad (5.3)$$

onde:

$\varepsilon$  — é a deformação do provete, em milímetros;

$L$  — é a distância entre apoios, em milímetros;

$h$  — é a espessura média do provete, em milímetros.

$S$  — é a deflexão do provete a meio vão, em milímetros;

### 5.6.3 Módulo de Elasticidade à Flexão

O cálculo do módulo de elasticidade à flexão do material foi feito com base na equação 5 da norma, selecionando os valores de tensão entre  $\varepsilon' = 0,0005$  e  $\varepsilon'' = 0,0025$  e suas respectivas deformações conforme a equação:

$$E_f = \left( \frac{\Delta F}{\Delta S} \right) \quad (5.4)$$

onde:

$E_f$  — é o módulo de elasticidade, em Megapascal;

$\Delta F$  — é a diferença entre as cargas  $F''$  e  $F'$  em  $s''$  e  $s'$  respectivamente, em Newtons;

$\Delta S$  — é a diferença entre a deflexão  $s''$  e  $s'$ , em milímetros;

Após os resultados organizados em tabelas (encontram-se nos anexos), devido a elevada variação dos dados, optou-se por seguir a alínea r) do capítulo 12 da norma ISO 14125:1998 que assume um intervalo de confiança para minorar a dispersão de dados e aumentar a fiabilidade estatística dos resultados. Conforme tabela a seguir, os valores em cinzento foram desconsiderados por estarem fora do intervalo de confiança estabelecido de 10% do valor médio da tensão de rotura, não sendo portanto representativos estatisticamente.

Tabela 5.4 – Resultados do Ensaio de Flexão Aplicado o Intervalo de Confiança [Fonte: o autor]

| Flexão condição 0 - REFERÊNCIA |               |                |                          |
|--------------------------------|---------------|----------------|--------------------------|
| Provete                        | E (Gpa)       | Tensão (Mpa)   | $\sigma$ corrigida (Mpa) |
| 0-1                            | 45,03         | 725,30         | 775,58                   |
| 0-2                            | 44,6          | 685,92         | 732,75                   |
| 0-3                            | 47,11         | 824,64         | 892,81                   |
| 0-4                            | 42,5          | 663,62         | 708,65                   |
| 0-5                            | 42,63         | 550,74         | 581,24                   |
| Média                          | 44,37         | 690,04         | 738,20                   |
| DesvioP                        | 1,7041        | 88,8572        | 100,8388                 |
| <b>Média</b>                   | <b>44,04</b>  | <b>691,61</b>  | <b>738,99</b>            |
| <b>DesvioP</b>                 | <b>1,1053</b> | <b>25,5008</b> | <b>27,6774</b>           |

| Flexão condição D-14 - ÓLEO DESCOFRANTE |               |                |                          |
|---|---------------|----------------|--------------------------|
| Provete                                 | E (Gpa)       | Tensão (Mpa)   | $\sigma$ corrigida (Mpa) |
| D-1                                     | 45,93         | 771,07         | 828,06                   |
| D-2                                     | 46,49         | 779,53         | 838,59                   |
| D-3                                     | 46,27         | 785,08         | 841,24                   |
| D-4                                     | 43,19         | 566,40         | 605,51                   |
| D-5                                     | 45,15         | 702,37         | 754,16                   |
| Média                                   | 45,41         | 720,89         | 773,51                   |
| DesvioP                                 | 1,1977        | 82,8106        | 89,8878                  |
| <b>Média</b>                            | <b>45,86</b>  | <b>750,99</b>  | <b>806,94</b>            |
| <b>DesvioP</b>                          | <b>0,5495</b> | <b>34,5535</b> | <b>37,5666</b>           |

| Flexão condição 1 |               |                |                          |
|-------------------|---------------|----------------|--------------------------|
| Provete           | E (Gpa)       | Tensão (Mpa)   | $\sigma$ corrigida (Mpa) |
| 1-1               | 42,72         | 824,64         | 753,50                   |
| 1-2               | 43,39         | 725,73         | 774,24                   |
| 1-3               | 43,04         | 658,01         | 704,01                   |
| 1-4               | 43,73         | 716,00         | 767,54                   |
| 1-5               | 43,74         | 672,75         | 711,79                   |
| <b>Média</b>      | <b>43,32</b>  | <b>719,43</b>  | <b>742,22</b>            |
| <b>DesvioP</b>    | <b>0,3969</b> | <b>58,4318</b> | <b>28,9111</b>           |

| Flexão condição 1 - COM ARGAMASSA |               |                |                          |
|-----------------------------------|---------------|----------------|--------------------------|
| Provete                           | E (Gpa)       | Tensão (Mpa)   | $\sigma$ corrigida (Mpa) |
| 1-1-A                             | 45,77         | 567,85         | 610,51                   |
| 1-2-A                             | 43,95         | 648,11         | 688,86                   |
| 1-3-A                             | 42,84         | 614,78         | 651,93                   |
| <b>Média</b>                      | <b>44,19</b>  | <b>610,24</b>  | <b>650,44</b>            |
| <b>DesvioP</b>                    | <b>1,2078</b> | <b>32,9239</b> | <b>32,0060</b>           |

Todos os valores estão contidos no intervalo de confiança

Todos os valores estão contidos no intervalo de confiança

| Flexão condição 3 |               |                |                          |
|-------------------|---------------|----------------|--------------------------|
| Provete           | E (Gpa)       | Tensão (Mpa)   | $\sigma$ corrigida (Mpa) |
| 3-1               | 43,55         | 769,07         | 832,89                   |
| 3-2               | 43,39         | 679,87         | 719,38                   |
| 3-3               | 43,6          | 601,87         | 902,52                   |
| 3-4               | 45,96         | 663,62         | 631,59                   |
| 3-5               | 43,42         | 789,04         | 853,22                   |
| Média             | 43,98         | 700,69         | 787,92                   |
| DesvioP           | 0,9911        | 69,3612        | 98,5459                  |
| <b>Média</b>      | <b>43,45</b>  | <b>745,99</b>  | <b>801,83</b>            |
| <b>DesvioP</b>    | <b>0,0694</b> | <b>47,4621</b> | <b>58,8897</b>           |

| Flexão condição 3 - COM ARGAMASSA |               |               |                          |
|-----------------------------------|---------------|---------------|--------------------------|
| Provete                           | E (Gpa)       | Tensão (Mpa)  | $\sigma$ corrigida (Mpa) |
| 3-1-A                             | 44,39         | 755,27        | 808,69                   |
| 3-2-A                             | 42,77         | 744,07        | 811,24                   |
| 3-3-A                             | 43,08         | 740,65        | 792,97                   |
| <b>Média</b>                      | <b>43,41</b>  | <b>746,67</b> | <b>804,30</b>            |
| <b>DesvioP</b>                    | <b>0,7021</b> | <b>6,2440</b> | <b>8,0798</b>            |

Todos os valores estão contidos no intervalo de confiança

| Flexão condição 7 |               |                |                          |
|-------------------|---------------|----------------|--------------------------|
| Provete           | E (Gpa)       | Tensão (Mpa)   | $\sigma$ corrigida (Mpa) |
| 7-1               | 44,42         | 614,78         | 823,94                   |
| 7-2               | 46,24         | 639,36         | 682,71                   |
| 7-3               | 47,09         | 551,33         | 575,01                   |
| 7-4               | 43,24         | 590,28         | 540,09                   |
| 7-5               | 45,22         | 718,54         | 549,89                   |
| Média             | 45,24         | 622,86         | 634,33                   |
| DesvioP           | 1,3487        | 55,9830        | 107,5391                 |
| <b>Média</b>      | <b>46,18</b>  | <b>636,41</b>  | <b>602,54</b>            |
| <b>DesvioP</b>    | <b>0,7645</b> | <b>68,2959</b> | <b>57,6125</b>           |

| Flexão condição 7 - COM ARGAMASSA |               |               |                          |
|-----------------------------------|---------------|---------------|--------------------------|
| Provete                           | E (Gpa)       | Tensão (Mpa)  | $\sigma$ corrigida (Mpa) |
| 7-1-A                             | 42,7          | 593,35        | 629,81                   |
| 7-2-A                             | 44,3          | 599,43        | 636,26                   |
| 7-3-A                             | 43,82         | 483,39        | 501,76                   |
| Média                             | 43,61         | 558,72        | 589,28                   |
| DesvioP                           | 0,6704        | 53,3273       | 61,9397                  |
| <b>Média</b>                      | <b>43,50</b>  | <b>596,39</b> | <b>633,04</b>            |
| <b>DesvioP</b>                    | <b>0,8000</b> | <b>3,0400</b> | <b>3,2268</b>            |

| Flexão condição 14 |               |                |                          |
|--------------------|---------------|----------------|--------------------------|
| Provete            | E (Gpa)       | Tensão (Mpa)   | $\sigma$ corrigida (Mpa) |
| 14-1               | 42,84         | 614,78         | 651,93                   |
| 14-2               | 45,43         | 598,94         | 651,88                   |
| 14-3               | 47,59         | 706,19         | 748,86                   |
| 14-4               | 44,61         | 590,28         | 620,96                   |
| 14-5               | 47,02         | 718,54         | 766,75                   |
| Média              | 45,50         | 645,75         | 688,08                   |
| DesvioP            | 1,7059        | 55,0977        | 58,3187                  |
| <b>Média</b>       | <b>45,12</b>  | <b>627,55</b>  | <b>668,41</b>            |
| <b>DesvioP</b>     | <b>1,7070</b> | <b>46,2470</b> | <b>48,1358</b>           |

| Flexão condição 14 - COM ARGAMASSA |               |               |                          |
|------------------------------------|---------------|---------------|--------------------------|
| Provete                            | E (Gpa)       | Tensão (Mpa)  | $\sigma$ corrigida (Mpa) |
| 14-1-A                             | 45,93         | 685,31        | 767,54                   |
| 14-2-A                             | 47,36         | 672,22        | 712,53                   |
| 14-3-A                             | 45,55         | 685,32        | 726,64                   |
| <b>Média</b>                       | <b>46,28</b>  | <b>680,95</b> | <b>735,57</b>            |
| <b>DesvioP</b>                     | <b>0,7793</b> | <b>6,1745</b> | <b>23,3281</b>           |

Todos os valores estão contidos no intervalo de confiança

## CAPÍTULO 6

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como descrito ao longo da dissertação, a economia circular permite a construção civil se reinventar e aumentar os índices de eficiência e sustentabilidade. A utilização de resíduos plásticos de outras indústrias é uma oportunidade em potencial para o desenvolvimento de novos materiais e matérias primas para a engenharia civil. No decorrer deste trabalho foi apresentado um perfil compósito a partir de PET reciclado reforçado com fibra de vidro, produzido pelo processo de towpreg e transformado por pultrusão. Finalmente realizaram-se ensaios de flexão nos provetes em diferentes condições, afim de avaliar as propriedades mecânicas do material para a utilização dos perfis em painéis de cofragem.

#### 6.1 CONCLUSÕES

No processo de fabricação do compósito é possível identificar parâmetros que influenciam nas características do material produzido. O processo de impregnação de termoplásticos é a barreira a se vencer, essa etapa cria a sinergia entre a matriz e o reforço, da qual resultam as propriedades finais do compósito. A impregnação deve ser uniforme, distribuindo a matriz em pó ao longo das fibras de reforço. O comprimento a impregnar, a pressão a aplicar, a viscosidade do polímero, a geometria e disposição espacial das fibras são os principais fatores a ter em conta para se garantir uma adequada e completa impregnação. Na transformação por pultrusão também foi possível identificar variáveis a se dimensionar para o melhor resultado: posição das bobinas, temperatura do forno, a distância entre feiras de aquecimento e arrefecimento e a velocidade de puxo.

Para além dos parâmetros de fabrico e transformação dos compósitos, é possível concluir que as diferentes matérias primas podem alterar significativamente as propriedades mecânicas do material produzido. O Tex da fibra de reforço e a qualidade da matriz termoplástica são fatores que devem ser ajustados para se ter o resultado desejado. Conclusão baseada nos resultados significativamente inferiores dos primeiros provetes ensaiados, produzidos sem controlo da qualidade e origem do PET.

O perfil pultrudido apresenta elevado módulo de elasticidade conforme é possível se perceber na tabela a seguir, sendo consideravelmente maior que o módulo de elasticidade da madeira, material tradicionalmente utilizado como cofragens. Esta qualidade foi demonstrada pelo ensaio de flexão e a

rigidez inerente ao material é suficiente para a sua utilização em cofragens, permitindo elevadas tensões na fase elástico linear.

Tabela 6.1 – Comparativo Entre Diferentes Materiais Estruturais [Fonte: o autor]

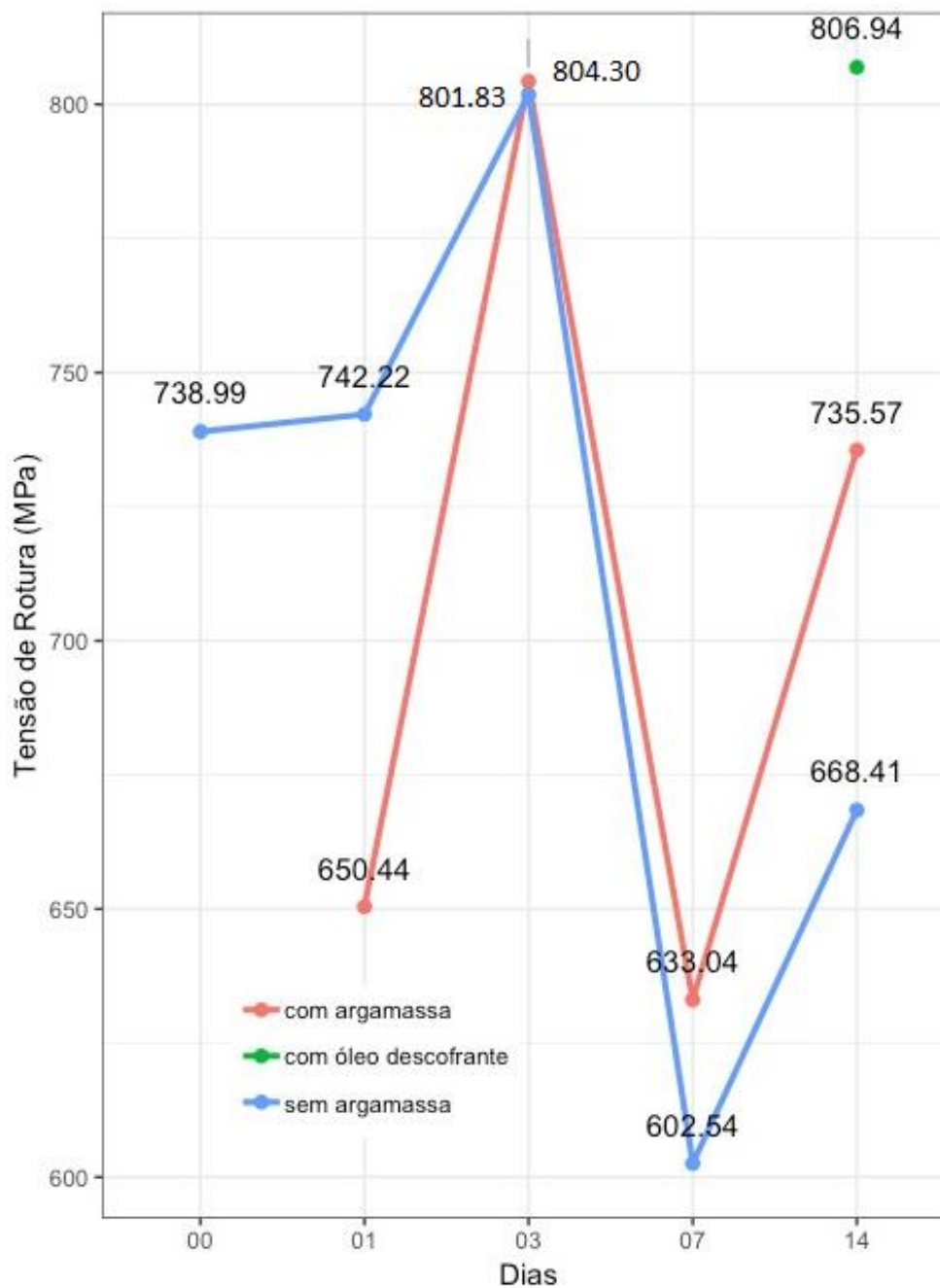
| <b>Materiais Estruturais</b>   | <b>Módulo de Elast.<br/>E (Gpa)</b> | <b>Tensão de Rotura*<br/><math>\sigma</math> (Mpa)</b> |
|--|-------------------------------------|--|
| <b>MADEIRA</b><br>Pinho Bravo Classe C18<br>Valores característicos EN 338 | 12                                  | 180  |
| <b>MADEIRA</b><br>Pinho Bravo Classe C35<br>Valores característicos EN 338 | 14                                  | 350  |
| <b>MADEIRA</b><br>Abeto GL28h<br>Valores característicos EN 1194           | 12,6                                | 280  |
| <b>COMPÓSITO</b><br>Provetes sem argamassa<br>Valores médios**             | 44,42                               | 718,79   |
| <b>COMPÓSITO</b><br>Provetes com argamassa<br>Valores médios**             | 44,34                               | 705,83   |
| <b>COMPÓSITO</b><br>Provetes com óleo descofrante<br>Valores médios**      | 45,86                               | 806,94   |
| <b>ALUMÍNIO</b><br>Alumínio de alta resistência                            | 72                                  | 4200   |

\* tensão de rotura de flexão

\*\* intervalo de confiança de 90% dos resultados de ensaio (ISO 14125)

Outro objetivo da dissertação era perceber como o perfil compósito se comportava durante o período em que as cofragens ficam expostas as condições climáticas. Os resultados dos ensaios não demonstraram perda evidente de resistência ao longo do tempo, inclusive apresentando resultados melhores que condição inicial de referência, como é possível analisar no gráfico a seguir.

Tabela 6.2 – Gráfico Resumo [Fonte: o autor]



O material apresentou uma grande heterogeneidade durante os ensaios, inclusive apresentando alto desvio padrão para uma mesma condição. Essa falta de uma tensão de ruptura constante demonstra a variação do material compósito estudado. A questão está relacionada a falta de padrão da matriz termoplástica utilizada, o PET reciclado em pó impregnado nas fibras de reforço não é um material que se conhece as suas características, é resultado de um processo de reciclagem industrial. Por se tratar de uma matriz de baixo custo e possivelmente, pouco controle da separação e processamento do material, o resultado do compósito não apresenta um padrão. É oportuno a ponderação sobre a possibilidade do

uso deste material pelo viés económico, talvez um maior cuidado na reciclagem do PET e uma produção mais controlada dessa matriz termoplástica poderia inviabilizar o custo extremamente atraente que o material apresenta atualmente, e este pode ser um dos motivos que o processo estudado não é tão difundido na indústria.

A utilização destes perfis pultrudidos como cofragens implica em entender se há qualquer influência da argamassa de cimento no material. Os resultados demonstraram que a liberação de calor pelas reações de hidratação do cimento e os diferentes módulos de dilatação térmica não influenciaram nas propriedades mecânicas do compósito e a variação nos resultados ocorreram de forma semelhante aos provetes que não tiveram contacto com o meio alcalino.

Os provetes em contacto com o óleo descofrante, apesar de permanecerem o tempo máximo de ensaio nas condições atmosféricas, apresentou elevado desempenho em suas propriedades mecânicas. O óleo vegetal forma uma barreira superficial no perfil, criando assim uma proteção contra possíveis degradações da matriz termoplástica e mantendo as características iniciais do compósito.

A fim de se utilizar estes perfis como cofragens para estruturas de betão armado, deveríamos confirmar também o aspecto final da superfície após a descofragem. Portanto conforme a figura 6.1 é possível perceber que o aspecto da argamassa é muito semelhante a uma cofragem metálica, a utilização dos perfis compósitos pultrudidos proporciona um acabamento aceitável e não apresenta qualquer dificuldade ou trabalho de estética após a descofragem.



Figura 6.1 – À esquerda: betão cofrado com painel metálico e à direita: aspecto final da argamassa cofrado com perfil compósito [Fonte: o autor]

Ficam evidentes as diversas vantagens da utilização de materiais compósitos na Engenharia Mecânica conforme descrito no capítulo 4, a divulgação do alto desempenho destes materiais deve ser promovido de forma a se aplicar na Construção Civil, beneficiando-se da excelente relação custo/benefício que o material apresenta. Os perfis compósitos pultrudidos apresentam potencialidades para inúmeros usos durante o processo de construção de obras de Engenharia Civil de forma geral. Desde o uso em fachadas ventiladas devido a leveza/resistência do material até isolamentos acústicos e térmicos e futuramente, poderá ser um possível substituto das madeiras em todas as suas utilizações.

## 6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Com o processo de aprendizagem no decorrer deste trabalho, apresento a seguir sugestões para trabalhos futuros:

- É fundamental conhecer as propriedades mecânicas reais das matérias primas utilizadas nos trabalhos de investigação, de forma a valorizar a pesquisa e ter mais fiabilidade nos resultados. Portanto seria de grande valia desenvolver tecnologias eficientes para aferição da qualidade do PET reciclado.
- Estudar uma melhor solução de impregnação na passagem da fibra na tina de pó, de forma a resultar numa mistura comprovadamente eficiente.
- Realizar os testes nos perfis após exposição do compósito em ambiente com condições controladas de forma a se obter parâmetros mais fiáveis do comportamento deste material ao longo do tempo. Inclusive a análise do desempenho do material em relação a absorção de água e humidade, de forma a se pensar na sua utilização para isolamentos térmicos e acústicos.
- Produzir perfis compósitos por towpreg e transformá-los por pultrusão com dimensões maiores para se avaliar o desempenho do perfil na direção perpendicular às fibras de reforço, por se tratar de um material anisotrópico.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] United Nations – Department of Economic and Social Affairs [Consult. 11 fev. 2019]. Disponível em <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/world-population-prospects-2017.html>
- [2] **LIDERAR A TRANSIÇÃO: Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal 2017-2020**, República Portuguesa do Ambiente - Grupo Interministerial Economia Circular [Consult. 10 jan. 2019]. Disponível em <https://participa.pt/downloadp.jsp?pFile=157115>
- [3] ONU, **Sustainable Development Goals** – Knowledge Platform [Consult. 04 jan. 2019] Disponível em <https://sustainabledevelopment.un.org/?menu=1300>
- [4] **FECHAR O CICLO: Plano de Ação da União Europeia para a Economia Circular**, 2015 [Consult. 20 fev. 2019] Disponível em [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0007.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0007.02/DOC_1&format=PDF)
- [5] Resolução do Conselho de Ministros n.º 190-A/2017 [Consult. 20 fev. 2019] Disponível em <https://dre.pt/home/-/dre/114337039/details/maximized>
- [6] NEVES DOS SANTOS, Liliana Rosa: **Avaliação da Eficiência da Separação de Plásticos de Resíduos Sólidos Urbanos por Métodos de Dissolução Selectiva**. Guimarães, 2009. Universidade do Minho. Dissertação para a obtenção do grau Mestre em Processamento e Caracterização de Materiais. [Consult. 12 mar. 2019] Disponível em <http://hdl.handle.net/1822/10739>
- [7] PIRES, Rui Pedro Oliveira: **Análise de Diferentes Sistemas de Cofragem para Realização de Edifícios com Estrutura Parede**. Porto, 2015. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Dissertação para a obtenção do grau Mestre em Engenharia Civil. [Consult. 18 abr. 2019] Disponível em [https://sigarra.up.pt/fcnaup/pt/pub\\_geral.pub\\_view?pi\\_pub\\_base\\_id=36244](https://sigarra.up.pt/fcnaup/pt/pub_geral.pub_view?pi_pub_base_id=36244)
- [8] DE BRITO, Jorge: **Cofragens Tradicionais**. Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2001. [Consult. 18 abr 2019] Disponível em [https://www.researchgate.net/publication/282250812\\_Cofragens\\_tradicionais](https://www.researchgate.net/publication/282250812_Cofragens_tradicionais)
- [9] CASTELO, João: **Desenvolvimento de Modelo Conceptual de Sistema Construtivo Industrializado Leve Destinado à Realização de Edifícios Metálicos**. Porto, 2008. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Dissertação para a obtenção do grau Mestre em Engenharia Civil. [Consult. 10 abr. 2019] Disponível em <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/60243/1/000130697.pdf>

[10] MATHIEUX, F. , ARDENTE, F. , BOBBA, S. , NUSS, P. BLENGINI, G. , ALVES DIAS, P. , BLAGOEVA, D. , TORRES DE MATOS, C. , WITTMER, D. , PAVEL, C. , HAMOR, T. , SAVEYN, H. , GAWLIK, B. , ORVEILLON, G. HUYGENS, D. , GARBARINO, E. , TZIMAS, E. , BOURAOUI, F. and SOLAR, S. – **Critical Raw Materials and the Circular Economy – Background report**. JRC Science-for-policy report, EUR 28832 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017. ISBN 978-92-79-74282-8

[11] GHISELLINI, Patrizia , CIALANI, Catia, ULGIATI, Sergio – A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 114, nº 15 (2016), 11-32. [Consult. 12 Abril 2019].

Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615012287?via%3Dihub>

[12] KIEBOOM, C. – **The transition towards a circular economy: an explorative research into potential revenue models in the construction industry from the perspective of the manufacturer and supplier**. Tese de Mestrado (2018), Eindhoven University of Technology. [Consult. 03 Abril 2019].

Disponível em <https://research.tue.nl/en/studentTheses/the-transition-towards-a-circular-economy>

[13] Ellen Macarthur Foundation - **Report 2016: The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics & catalysing action** [Consult. 03 Abril 2019]

Disponível em <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics-catalysing-action>

[14] ERKMAN, S. – Industrial ecology: an historical view. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 5, nº 1-2 (1997), 1-10. [Consult. 15 Abril 2019].

Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652697000036?via%3Dihub>

[15] LEITÃO, Alexandra - Economia circular: uma nova filosofia de gestão para o séc. XXI. **Portuguese Journal of Finance, Management and Accounting**. Vol. 1, nº 2 (2015), [Consult. 02 Maio 2019].

Disponível em <http://u3isjournal.isvouga.pt/index.php/PJFMA/article/view/114/52> ISSN: 2183-3826

[16] TORRALBA, F. Pacheco, JALALI, Said – Materiais Biomiméticos: materiais de construção inspirados na natureza. **Revista Arte e Construção**. Vol. 240 (2011), 38-40. [Consult. 01 Maio 2019]

Disponível em <http://hdl.handle.net/1822/16426>

[17] BENYUS, J. M. (2002). **Biomimicry: innovation inspired by Nature**. Perennial.

[18] MCDONOUGH, W. , BRAUNGART, M. – **Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things**. 1ª ed. New York: North Point Press, 2002. ISBN 0-86547-587-3

[19] EL-HAGGAR, Salah – **Sustainable Industrial Design and Waste Management**. Academic Press Elsevier Ltd. (2007) ISBN: 978-0-12-373623-9

[20] FERRÃO, Paulo C. - **Ecologia industrial: princípios e ferramentas**. Eng. Sanit. Ambient. vol.17 no.1 Rio de Janeiro Jan./Mar. 2012 ISSN 1413-4152. [Consult. 01 Maio 2019]

Disponível em <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522012000100002>

[21] CHERTOW M. R., ASHTON W. S., ESPINOSA J. C - **Industrial Symbiosis in Puerto Rico: Environmentally Related Agglomeration Economies**. 2008 [Consult. 01 Maio 2019]

Disponível em <https://doi.org/10.1080/00343400701874123>

[22] Jornal Oficial da União Europeia – **Directiva 2008/98/CE**. Parlamento Europeu. 19 de Novembro de 2008. [Consult. 12 Maio 2019]

Disponível em <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A32008L0098>

[23] Jornal Oficial da União Europeia – **Directiva 2018/851**. Parlamento Europeu. 30 de Maio de 2018. [Consult. 12 Maio 2019]

Disponível em <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A32018L0851>

[24] GUEDES, Benedito, FILKAUSKAS, Mario E. – **O Plástico**. 2ª ed. São Paulo: Érica, 1986.

ISBN 85-7194-080-0

[25] KONAGANO; LIMA; ROCHA. A utilização de plásticos na construção civil. **Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**, 40, 2012, Belém. COBENGE,2012 [Consult. 12 Abril 2019]

Disponível em <http://www.abenge.org.br/cobenge/arquivos/3/anais/anais.html>

[26] MOURA, Marcelo F.S.F., MORAIS, Alfredo B. De, MAGALHÃES, António G. De – **Materiais Compósitos – Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico**. 2005 Publindústria ISBN 972-8953-00-3

[27] PEREIRA, Júlio M. Da Cruz R. – **Desenvolvimento e fabrico de compósitos de matriz polimérica com fibras naturais**. Tese Mestrado. Instituto Politécnico de Leiria (2017).

Disponível em <https://iconline.ipleiria.pt/handle/10400.8/3138>

[28] ALBUQUERQUE, Jorge Artur C. – **O Plástico na prática: manual de aplicações dirigido a pessoal envolvido em manutenção, projetos, nacionalização e compras**. 1ª ed. Porto Alegre: Sagra, 1990. ISBN 85-241-0260-8

[29] ESFANDIARI, Púria. - **Produção de Pré-Impregnados de Matriz Termoplástica e Fibras de Carbono: Transformação por Pultrusão e Compressão a Quente**. Tese Mestrado ISEP (2017)

Disponível em <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/11738/2/Texto%20integral.pdf>

*REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS*

- [30] FORLIN, Flávio J., FARIA, José de Assis F. – Considerações Sobre a Reciclagem de Embalagens Plásticas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. Vol. 12, nº 1 (2002), 1-10. [Consult. 02 Maio 2019]. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/po/v12n1/9876>
- [31] DASHEFSKY, H. Steven - **Dicionário de educação ambiental: um guia de A a Z**. 2.ed. São Paulo: Gaia, (2001) ISBN: 978-8-58-35165-6
- [32] SILVA, João F. - **Pré-impregnados de Matriz Termoplástica: Fabrico e Transformação por Compressão a Quente e Enrolamento Filamentar**. Universidade do Porto, Porto (2005) Consult. 05 Maio 2019]. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/11738/2/Texto%20integral.pdf>

## ANEXO A – ENSAIO DE FLEXÃO – DIMENSÃO DOS PROVETES

| CONDIÇÃO 0 | LARGURA (mm) |       | ESPESSURA (mm) |       |
|------------|--------------|-------|----------------|-------|
| zero dias  | medida       | média | medida         | média |
| 0-1        | 19,96        | 19,96 | 2,1            | 2,11  |
|            | 19,95        |       | 2,11           |       |
|            | 19,96        |       | 2,11           |       |
| 0-2        | 19,97        | 19,98 | 2,12           | 2,12  |
|            | 19,97        |       | 2,11           |       |
|            | 19,99        |       | 2,12           |       |
| 0-3        | 19,99        | 19,97 | 2,09           | 2,09  |
|            | 19,96        |       | 2,09           |       |
|            | 19,97        |       | 2,1            |       |
| 0-4        | 19,94        | 19,94 | 2,11           | 2,10  |
|            | 19,94        |       | 2,1            |       |
|            | 19,93        |       | 2,09           |       |
| 0-5        | 19,97        | 19,98 | 2,13           | 2,12  |
|            | 19,98        |       | 2,11           |       |
|            | 19,98        |       | 2,13           |       |

| CONDIÇÃO D   | LARGURA (mm) |       | ESPESSURA (mm) |       |
|--------------|--------------|-------|----------------|-------|
| óleo descof. | medida       | média | medida         | média |
| D-1          | 19,94        | 19,95 | 2,09           | 2,09  |
|              | 19,94        |       | 2,08           |       |
|              | 19,96        |       | 2,11           |       |
| D-2          | 19,96        | 19,97 | 2,08           | 2,09  |
|              | 19,99        |       | 2,09           |       |
|              | 19,95        |       | 2,09           |       |
| D-3          | 19,95        | 19,95 | 2,1            | 2,10  |
|              | 19,96        |       | 2,1            |       |
|              | 19,94        |       | 2,09           |       |
| D-4          | 19,97        | 19,98 | 2,11           | 2,11  |
|              | 19,98        |       | 2,1            |       |
|              | 19,98        |       | 2,11           |       |
| D-5          | 19,95        | 19,96 | 2,1            | 2,10  |
|              | 19,96        |       | 2,1            |       |
|              | 19,97        |       | 2,11           |       |

| CONDIÇÃO 1 | LARGURA (mm) |       | ESPESSURA (mm) |       |
|------------|--------------|-------|----------------|-------|
| um dia     | medida       | média | medida         | média |
| 1-1        | 19,99        | 19,99 | 2,11           | 2,11  |
|            | 19,99        |       | 2,12           |       |
|            | 20           |       | 2,09           |       |
| 1-2        | 19,95        | 19,95 | 2,1            | 2,10  |
|            | 19,96        |       | 2,09           |       |
|            | 19,95        |       | 2,11           |       |
| 1-3        | 19,94        | 19,96 | 2,11           | 2,12  |
|            | 19,97        |       | 2,12           |       |
|            | 19,97        |       | 2,12           |       |
| 1-4        | 19,99        | 19,99 | 2,12           | 2,11  |
|            | 19,99        |       | 2,11           |       |
|            | 20           |       | 2,1            |       |
| 1-5        | 19,99        | 19,99 | 2,11           | 2,12  |
|            | 19,99        |       | 2,13           |       |
|            | 19,99        |       | 2,12           |       |

| CONDIÇÃO 1* | LARGURA (mm) |       | ESPESSURA (mm) |       |
|-------------|--------------|-------|----------------|-------|
| um dia      | medida       | média | medida         | média |
| 1-1-A       | 19,95        | 19,94 | 2,07           | 2,07  |
|             | 19,92        |       | 2,12           |       |
|             | 19,95        |       | 2,03           |       |
| 1-2-A       | 19,93        | 19,95 | 2,04           | 2,07  |
|             | 19,95        |       | 2,15           |       |
|             | 19,97        |       | 2,02           |       |
| 1-3-A       | 19,96        | 19,96 | 2,11           | 2,12  |
|             | 19,94        |       | 2,12           |       |
|             | 19,98        |       | 2,12           |       |
|             |              |       |                |       |
|             |              |       |                |       |

\* provetes em contacto com argamassa

| CONDIÇÃO 3 | LARGURA (mm) |       | ESPESSURA (mm) |       |
|------------|--------------|-------|----------------|-------|
|            | medida       | média | medida         | média |
| 3-1        | 19,95        | 19,94 | 2,1            | 2,10  |
|            | 19,93        |       | 2,1            |       |
|            | 19,94        |       | 2,11           |       |
| 3-2        | 19,94        | 19,95 | 2,09           | 2,10  |
|            | 19,97        |       | 2,1            |       |
|            | 19,95        |       | 2,12           |       |
| 3-3        | 19,96        | 19,96 | 2,1            | 2,11  |
|            | 19,95        |       | 2,11           |       |
|            | 19,96        |       | 2,11           |       |
| 3-4        | 19,98        | 19,98 | 2,1            | 2,10  |
|            | 19,98        |       | 2,1            |       |
|            | 19,99        |       | 2,11           |       |
| 3-5        | 19,95        | 19,95 | 2,1            | 2,11  |
|            | 19,94        |       | 2,11           |       |
|            | 19,95        |       | 2,11           |       |

| CONDIÇÃO 3* | LARGURA (mm) |       | ESPESSURA (mm) |       |
|-------------|--------------|-------|----------------|-------|
|             | medida       | média | medida         | média |
| 3-1-A       | 19,98        | 19,98 | 2,09           | 2,09  |
|             | 19,98        |       | 2,08           |       |
|             | 19,99        |       | 2,09           |       |
| 3-2-A       | 19,98        | 19,98 | 2,12           | 2,12  |
|             | 19,98        |       | 2,13           |       |
|             | 19,99        |       | 2,11           |       |
| 3-3-A       | 19,98        | 19,99 | 2,1            | 2,11  |
|             | 19,99        |       | 2,11           |       |
|             | 20,01        |       | 2,11           |       |
|             |              |       |                |       |
|             |              |       |                |       |
|             |              |       |                |       |

\* provetes em contacto com argamassa

| CONDIÇÃO 7 | LARGURA (mm) |       | ESPESSURA (mm) |       |
|------------|--------------|-------|----------------|-------|
|            | medida       | média | medida         | média |
| 7-1        | 19,94        | 19,92 | 2,11           | 2,11  |
|            | 19,92        |       | 2,12           |       |
|            | 19,91        |       | 2,11           |       |
| 7-2        | 19,98        | 19,97 | 2,07           | 2,09  |
|            | 19,95        |       | 2,1            |       |
|            | 19,97        |       | 2,09           |       |
| 7-3        | 19,94        | 19,95 | 2,08           | 2,08  |
|            | 19,96        |       | 2,07           |       |
|            | 19,95        |       | 2,08           |       |
| 7-4        | 19,97        | 19,97 | 2,09           | 2,09  |
|            | 19,98        |       | 2,07           |       |
|            | 19,95        |       | 2,1            |       |
| 7-5        | 19,95        | 19,96 | 2,11           | 2,11  |
|            | 19,94        |       | 2,1            |       |
|            | 19,98        |       | 2,11           |       |

| CONDIÇÃO 7 | LARGURA (mm) |       | ESPESSURA (mm) |       |
|------------|--------------|-------|----------------|-------|
|            | medida       | média | medida         | média |
| 7-1-A      | 19,91        | 19,94 | 2,07           | 2,08  |
|            | 19,94        |       | 2,08           |       |
|            | 19,98        |       | 2,1            |       |
| 7-2-A      | 19,93        | 19,94 | 2,08           | 2,08  |
|            | 19,94        |       | 2,08           |       |
|            | 19,96        |       | 2,08           |       |
| 7-3-A      | 19,97        | 19,95 | 2,12           | 2,12  |
|            | 19,95        |       | 2,12           |       |
|            | 19,93        |       | 2,11           |       |
|            |              |       |                |       |
|            |              |       |                |       |
|            |              |       |                |       |

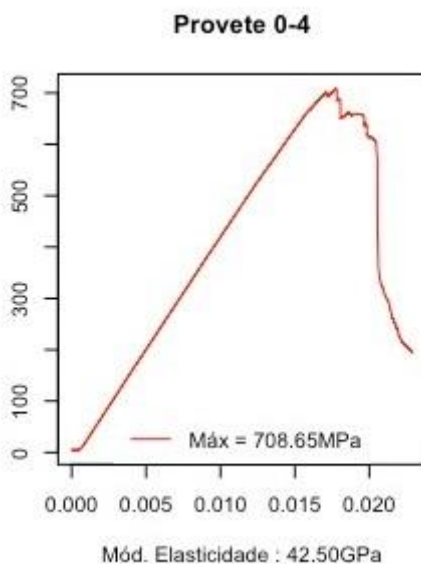
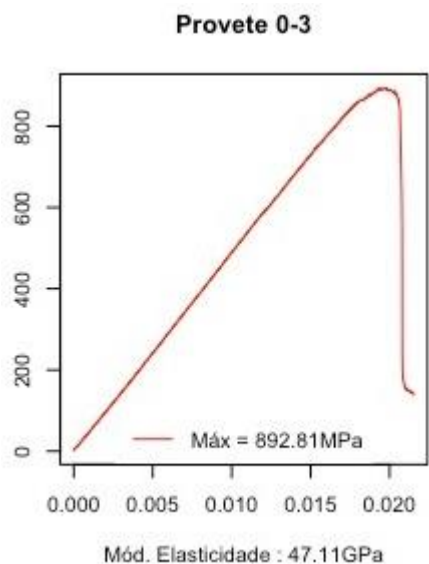
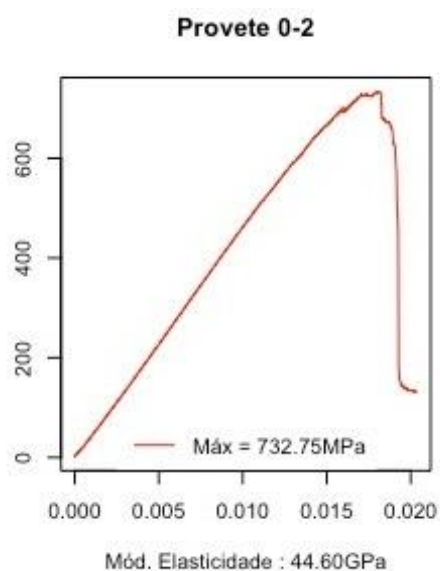
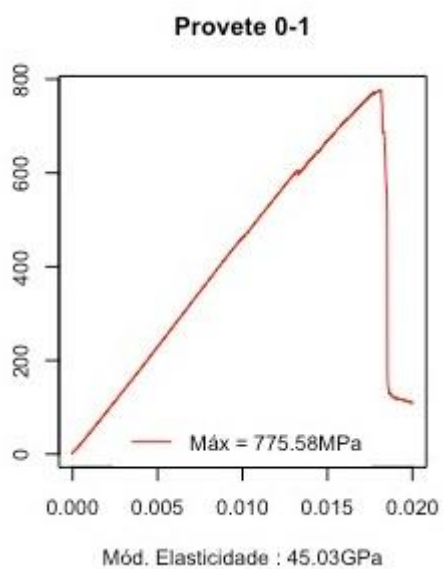
\* provetes em contacto com argamassa

| CONDIÇÃO 14 | LARGURA (mm) |        | ESPESSURA (mm) |        | CONDIÇÃO 14* | LARGURA (mm) |              | ESPESSURA (mm) |       |
|-------------|--------------|--------|----------------|--------|--------------|--------------|--------------|----------------|-------|
|             | catorze dias | medida | média          | medida |              | média        | catorze dias | medida         | média |
| 14-1        | 19,96        | 19,96  | 2,11           | 2,12   | 14-1-A       | 19,98        | 19,99        | 2,11           | 2,11  |
|             | 19,95        |        | 2,12           |        |              | 2,12         |              |                |       |
|             | 19,98        |        | 2,12           |        |              | 2,11         |              |                |       |
| 14-2        | 19,95        | 19,95  | 2,11           | 2,11   | 14-2-A       | 19,93        | 19,94        | 2,06           | 2,08  |
|             | 19,94        |        | 2,1            |        |              | 2,1          |              |                |       |
|             | 19,95        |        | 2,11           |        |              | 2,08         |              |                |       |
| 14-3        | 19,94        | 19,96  | 2,08           | 2,09   | 14-3-A       | 19,99        | 19,99        | 2,13           | 2,12  |
|             | 19,96        |        | 2,09           |        |              | 2,12         |              |                |       |
|             | 19,97        |        | 2,1            |        |              | 2,1          |              |                |       |
| 14-4        | 19,96        | 19,97  | 2,1            | 2,09   |              |              |              |                |       |
|             | 19,97        |        | 2,09           |        |              |              |              |                |       |
|             | 19,97        |        | 2,09           |        |              |              |              |                |       |
| 14-5        | 19,96        | 19,95  | 2,1            | 2,09   |              |              |              |                |       |
|             | 19,94        |        | 2,08           |        |              |              |              |                |       |
|             | 19,94        |        | 2,08           |        |              |              |              |                |       |

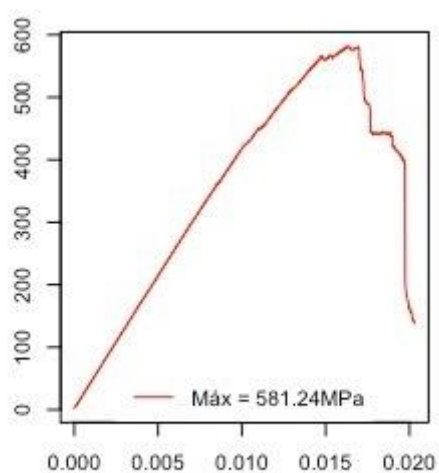
\* provetes em contacto com argamassa



## ANEXO B – ENSAIO DE FLEXÃO - GRÁFICOS TENSÃO - DEFORMAÇÃO

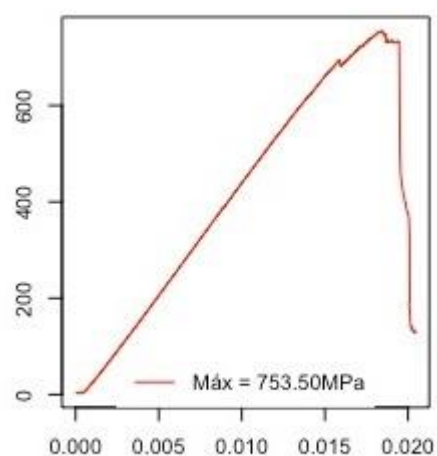


Provete 0-5



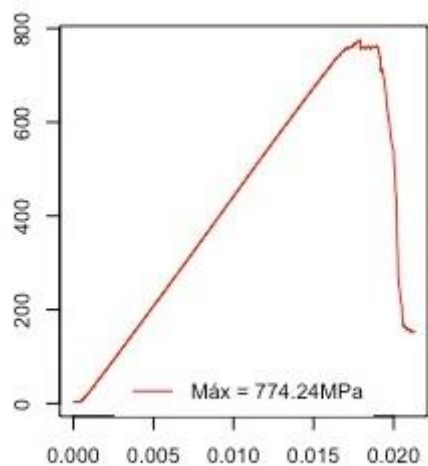
Mód. Elasticidade : 42.63GPa

Provete 1-1



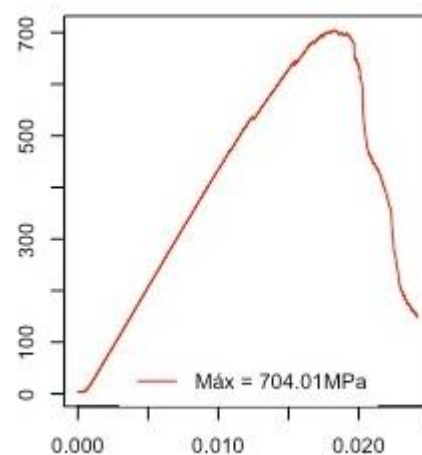
Mód. Elasticidade : 42.72GPa

Provete 1-2



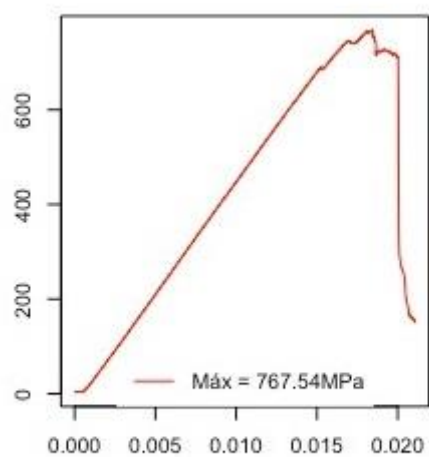
Mód. Elasticidade : 43.39GPa

Provete 1-3



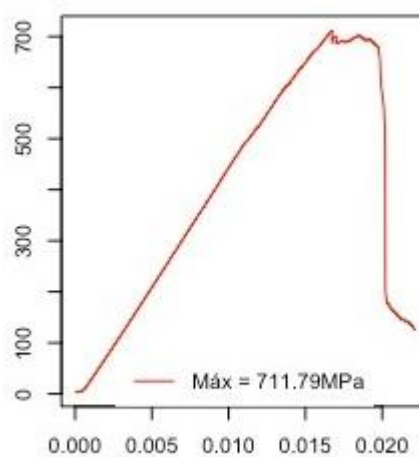
Mód. Elasticidade : 43.04GPa

Provete 1-4



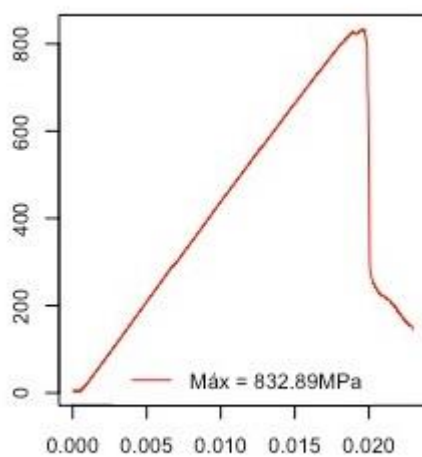
Mód. Elasticidade : 43.73GPa

Provete 1-5



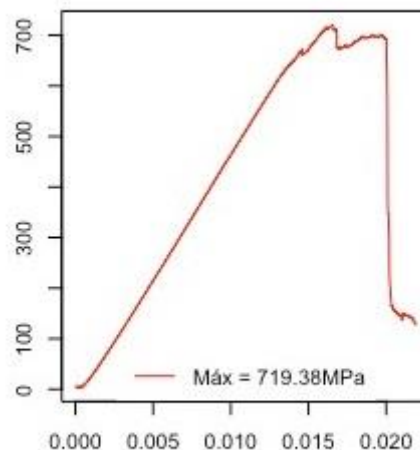
Mód. Elasticidade : 43.74GPa

Provete 3-1



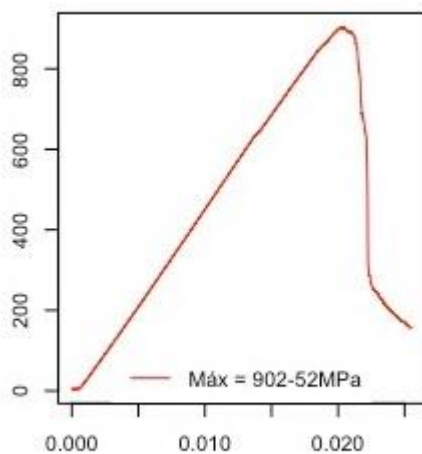
Mód. Elasticidade : 43.55GPa

Provete 3-2



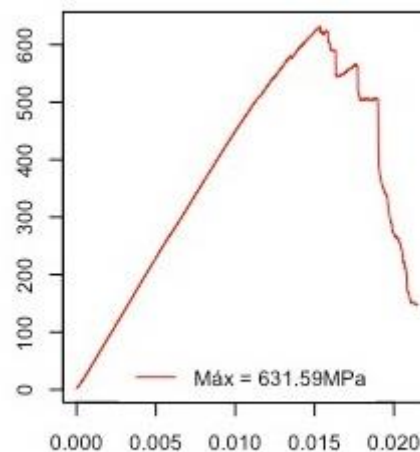
Mód. Elasticidade : 43.39GPa

Provete 3-3



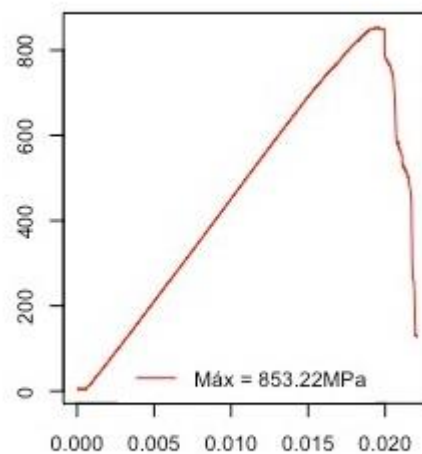
Mód. Elasticidade : 43.60GPa

Provete 3-4



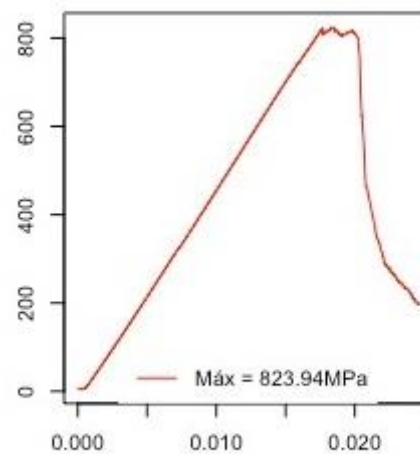
Mód. Elasticidade : 45.96GPa

Provete 3-5



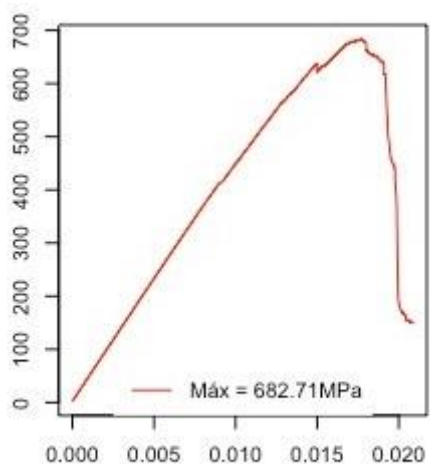
Mód. Elasticidade : 43.42GPa

Provete 7-1



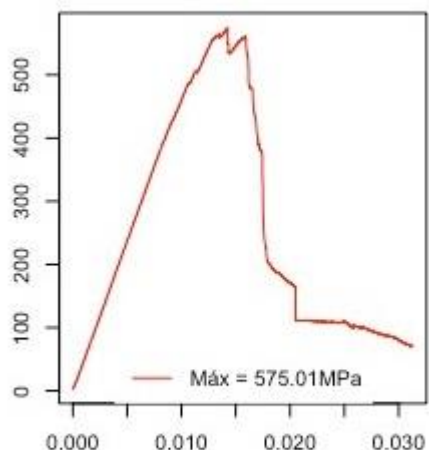
Mód. Elasticidade : 44.42GPa

**Provete 7-2**



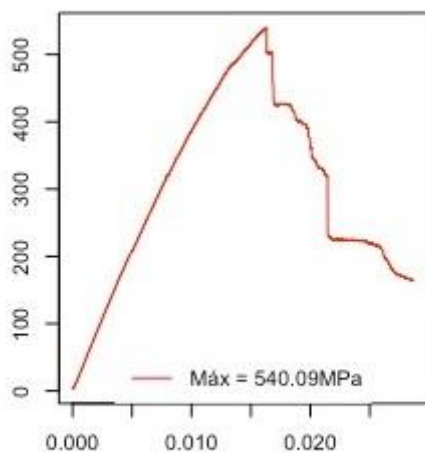
Mód. Elasticidade : 46.24GPa

**Provete 7-3**



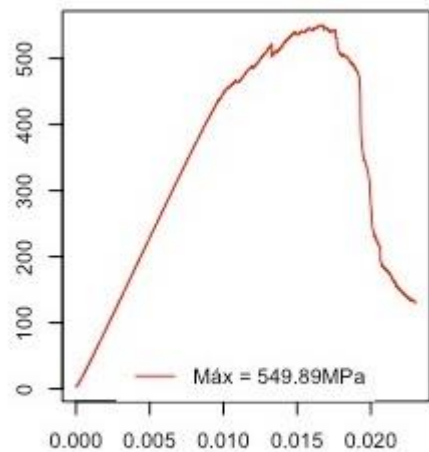
Mód. Elasticidade : 47.09GPa

**Provete 7-4**



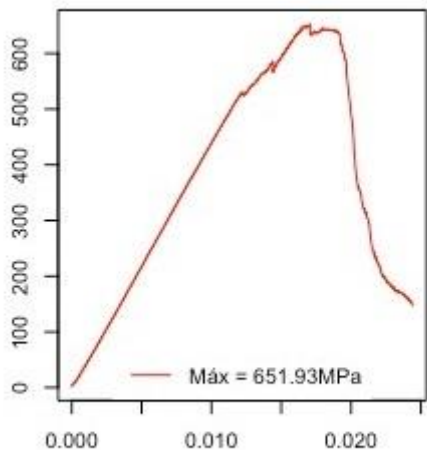
Mód. Elasticidade : 43.24GPa

**Provete 7-5**



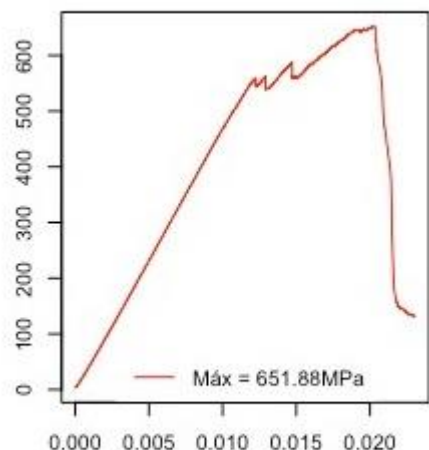
Mód. Elasticidade : 45.22GPa

**Provete 14-1**



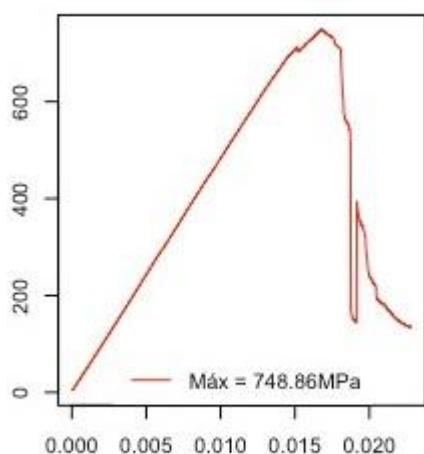
Mód. Elasticidade : 42.84GPa

**Provete 14-2**



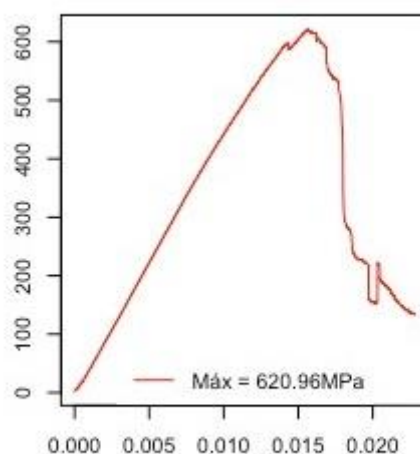
Mód. Elasticidade : 45.43GPa

**Provete 14-3**



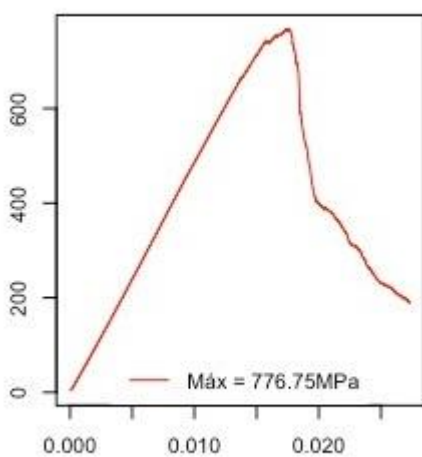
Mód. Elasticidade : 47.59GPa

**Provete 14-4**



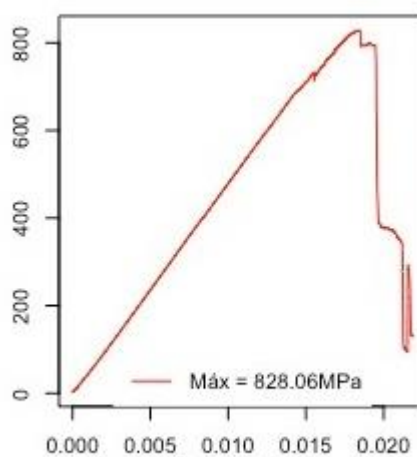
Mód. Elasticidade : 44.61GPa

**Provete 14-5**



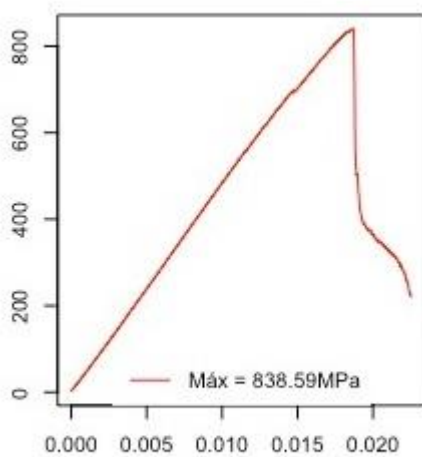
Mód. Elasticidade : 47.02GPa

**Provete D-1**



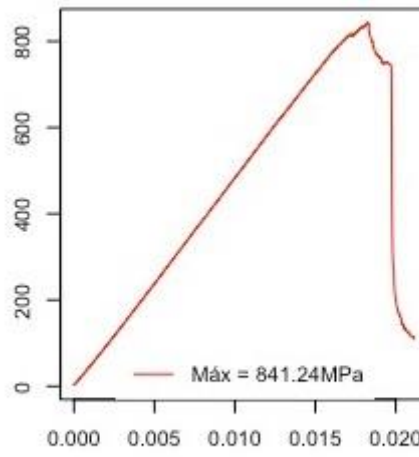
Mód. Elasticidade : 45.93GPa

**Provete D-2**



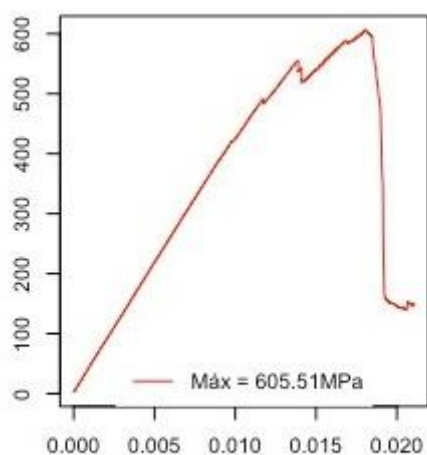
Mód. Elasticidade : 46.49GPa

**Provete D-3**



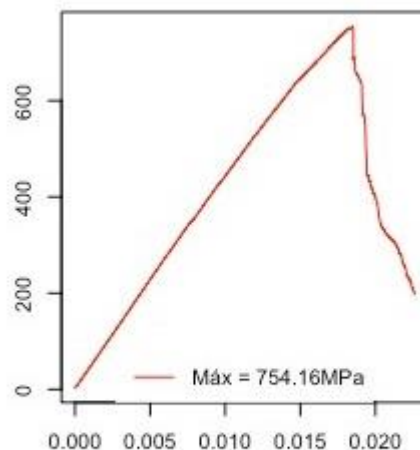
Mód. Elasticidade : 46.27GPa

**Provete D-4**



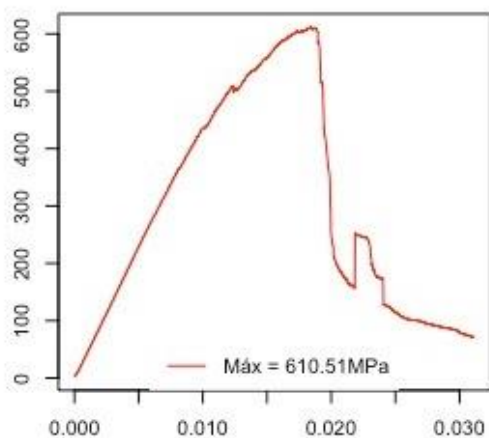
Mód. Elasticidade : 43.19GPa

**Provete D-5**



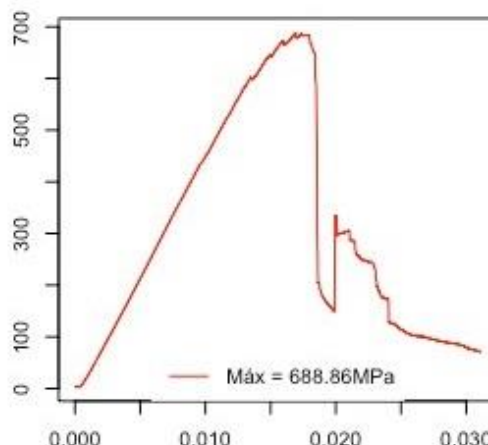
Mód. Elasticidade : 45.15GPa

**Provete 1-1-A**



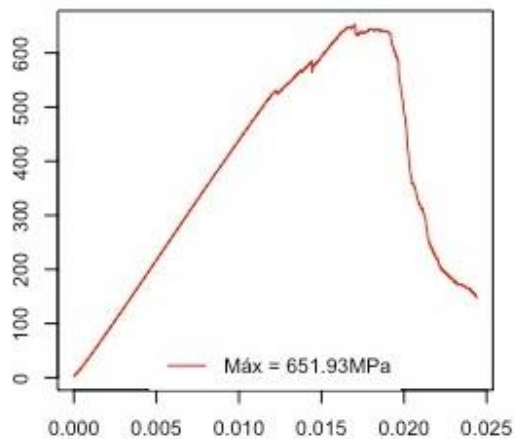
Mód. Elasticidade : 45.77GPa

**Provete 1-2-A**



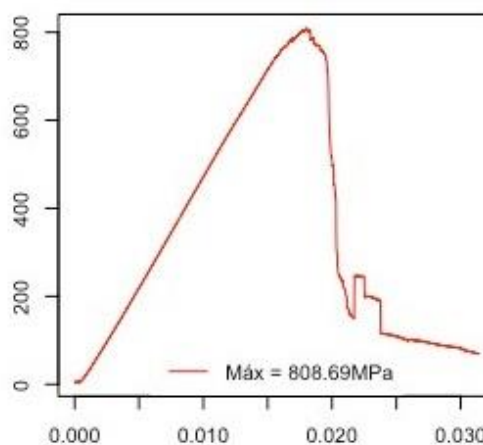
Mód. Elasticidade : 43.95GPa

**Provete 1-3-A**



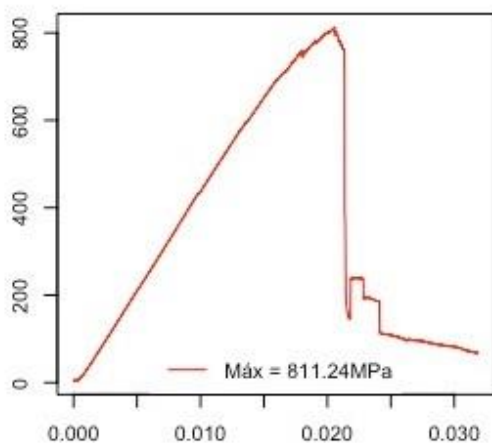
Mód. Elasticidade : 42.84GPa

**Provete 3-1-A**



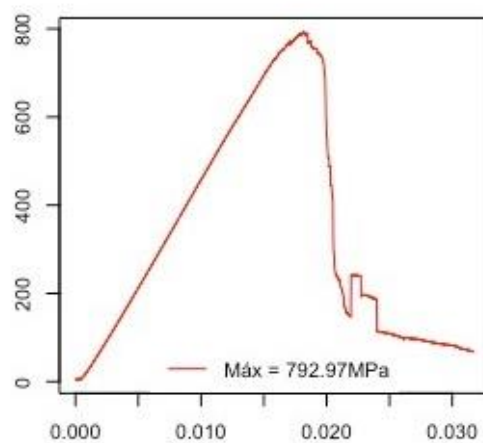
Mód. Elasticidade : 44.39GPa

**Provete 3-2-A**



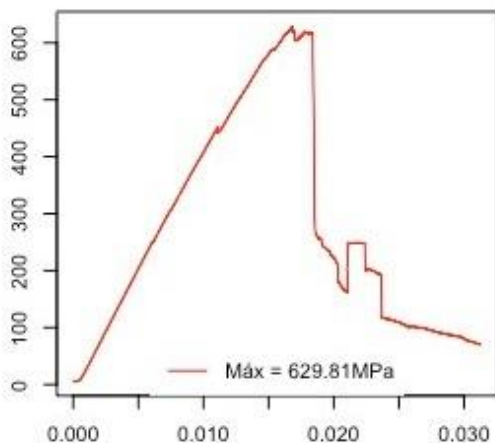
Mód. Elasticidade : 42.77GPa

**Provete 3-3-A**



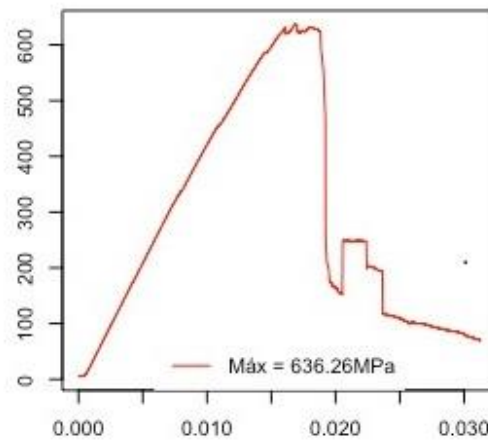
Mód. Elasticidade : 43.08GPa

**Provete 7-1-A**



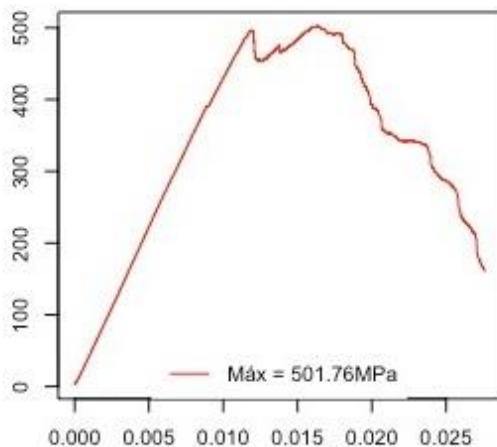
Mód. Elasticidade : 42.70GPa

**Provete 7-2-A**



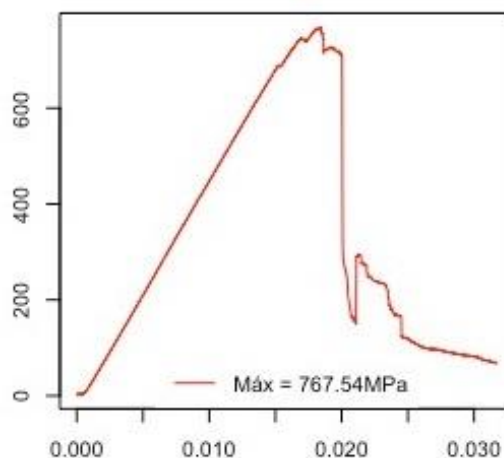
Mód. Elasticidade : 44.30GPa

**Provete 7-3-A**

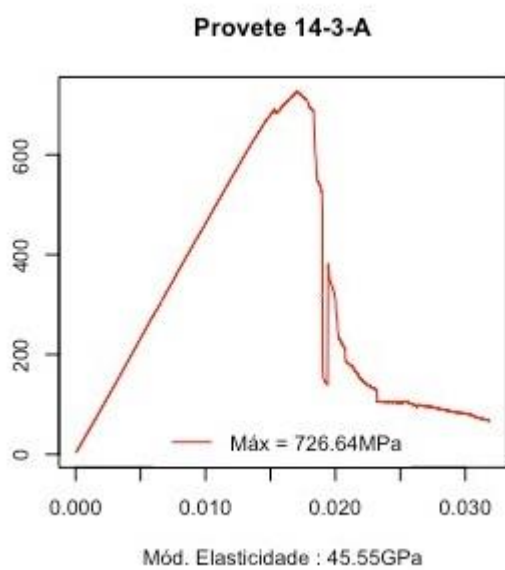
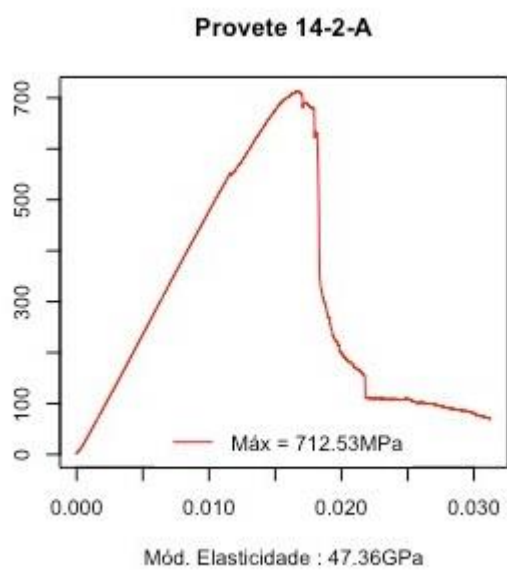


Mód. Elasticidade : 43.82GPa

**Provete 14-1-A**



Mód. Elasticidade : 43.73GPa



## ANEXO C – ENSAIO DE FLEXÃO – RESULTADOS

| Flexão condição 0 - REFERÊNCIA |                  |                    |                          |
|--------------------------------|------------------|--------------------|--------------------------|
| Provete                        | E (Gpa)          | Tensão (Mpa)       | $\sigma$ corrigida (Mpa) |
| 0-1                            | 45,03            | 725,30             | 775,58                   |
| 0-2                            | 44,6             | 685,92             | 732,75                   |
| 0-3                            | 47,11            | 824,64             | 892,81                   |
| 0-4                            | 42,5             | 663,62             | 708,65                   |
| 0-5                            | 42,63            | 550,74             | 581,24                   |
| <b>Média</b>                   | <b>44,37</b>     | <b>690,04</b>      | <b>738,20</b>            |
| <b>DesvioP</b>                 | <b>1,7041432</b> | <b>88,85719665</b> | <b>100,8388353</b>       |

| Flexão condição D-14 - ÓLEO DESCOFRANTE |                 |                    |                          |
|---|-----------------|--------------------|--------------------------|
| Provete                                 | E (Gpa)         | Tensão (Mpa)       | $\sigma$ corrigida (Mpa) |
| D-1                                     | 45,93           | 771,07             | 828,06                   |
| D-2                                     | 46,49           | 779,53             | 838,59                   |
| D-3                                     | 46,27           | 785,08             | 841,24                   |
| D-4                                     | 43,19           | 566,40             | 605,51                   |
| D-5                                     | 45,15           | 702,37             | 754,16                   |
| <b>Média</b>                            | <b>45,41</b>    | <b>720,89</b>      | <b>773,51</b>            |
| <b>DesvioP</b>                          | <b>1,197691</b> | <b>82,81057931</b> | <b>89,88779416</b>       |

| Flexão condição 1 |                  |                    |                          |
|-------------------|------------------|--------------------|--------------------------|
| Provete           | E (Gpa)          | Tensão (Mpa)       | $\sigma$ corrigida (Mpa) |
| 1-1               | 42,72            | 824,64             | 753,50                   |
| 1-2               | 43,39            | 725,73             | 774,24                   |
| 1-3               | 43,04            | 658,01             | 704,01                   |
| 1-4               | 43,73            | 716,00             | 767,54                   |
| 1-5               | 43,74            | 672,75             | 711,79                   |
| <b>Média</b>      | <b>43,32</b>     | <b>719,43</b>      | <b>742,22</b>            |
| <b>DesvioP</b>    | <b>0,3969181</b> | <b>58,43178523</b> | <b>28,91111346</b>       |

| Flexão condição 1 - COM ARGAMASSA |                 |                   |                          |
|-----------------------------------|-----------------|-------------------|--------------------------|
| Provete                           | E (Gpa)         | Tensão (Mpa)      | $\sigma$ corrigida (Mpa) |
| 1-1-A                             | 45,77           | 567,85            | 610,51                   |
| 1-2-A                             | 43,95           | 648,11            | 688,86                   |
| 1-3-A                             | 42,84           | 614,78            | 651,93                   |
| <b>Média</b>                      | <b>44,19</b>    | <b>610,24</b>     | <b>650,44</b>            |
| <b>DesvioP</b>                    | <b>1,207817</b> | <b>32,9238602</b> | <b>32,00597214</b>       |

| Flexão condição 3 |                  |                    |                          |
|-------------------|------------------|--------------------|--------------------------|
| Provete           | E (Gpa)          | Tensão (Mpa)       | $\sigma$ corrigida (Mpa) |
| 3-1               | 43,55            | 769,07             | 832,89                   |
| 3-2               | 43,39            | 679,87             | 719,38                   |
| 3-3               | 43,6             | 601,87             | 902,52                   |
| 3-4               | 45,96            | 663,62             | 631,59                   |
| 3-5               | 43,42            | 789,04             | 853,22                   |
| <b>Média</b>      | <b>43,98</b>     | <b>700,69</b>      | <b>787,92</b>            |
| <b>DesvioP</b>    | <b>0,9910923</b> | <b>69,36121121</b> | <b>98,54591863</b>       |

| Flexão condição 3 - COM ARGAMASSA |                 |                    |                          |
|-----------------------------------|-----------------|--------------------|--------------------------|
| Provete                           | E (Gpa)         | Tensão (Mpa)       | $\sigma$ corrigida (Mpa) |
| 3-1-A                             | 44,39           | 755,27             | 808,69                   |
| 3-2-A                             | 42,77           | 744,07             | 811,24                   |
| 3-3-A                             | 43,08           | 740,65             | 792,97                   |
| <b>Média</b>                      | <b>43,41</b>    | <b>746,67</b>      | <b>804,30</b>            |
| <b>DesvioP</b>                    | <b>0,702108</b> | <b>6,244043753</b> | <b>8,079755595</b>       |

| Flexão condição 7 |                  |                    |                          |
|-------------------|------------------|--------------------|--------------------------|
| Provete           | E (Gpa)          | Tensão (Mpa)       | $\sigma$ corrigida (Mpa) |
| 7-1               | 44,42            | 614,78             | 823,94                   |
| 7-2               | 46,24            | 639,36             | 682,71                   |
| 7-3               | 47,09            | 551,33             | 575,01                   |
| 7-4               | 43,24            | 590,28             | 540,09                   |
| 7-5               | 45,22            | 718,54             | 549,89                   |
| <b>Média</b>      | <b>45,24</b>     | <b>622,86</b>      | <b>634,33</b>            |
| <b>DesvioP</b>    | <b>1,3487238</b> | <b>55,98304622</b> | <b>107,5391097</b>       |

| Flexão condição 7 - COM ARGAMASSA |                |                    |                          |
|-----------------------------------|----------------|--------------------|--------------------------|
| Provete                           | E (Gpa)        | Tensão (Mpa)       | $\sigma$ corrigida (Mpa) |
| 7-1-A                             | 42,7           | 593,35             | 629,81                   |
| 7-2-A                             | 44,3           | 599,43             | 636,26                   |
| 7-3-A                             | 43,82          | 483,39             | 501,76                   |
| <b>Média</b>                      | <b>43,61</b>   | <b>558,72</b>      | <b>589,28</b>            |
| <b>DesvioP</b>                    | <b>0,67039</b> | <b>53,32733765</b> | <b>61,93973812</b>       |

| Flexão condição 14 |                  |                    |                          |
|--------------------|------------------|--------------------|--------------------------|
| Provete            | E (Gpa)          | Tensão (Mpa)       | $\sigma$ corrigida (Mpa) |
| 14-1               | 42,84            | 614,78             | 651,93                   |
| 14-2               | 45,43            | 598,94             | 651,88                   |
| 14-3               | 47,59            | 706,19             | 748,86                   |
| 14-4               | 44,61            | 590,28             | 620,96                   |
| 14-5               | 47,02            | 718,54             | 766,75                   |
| <b>Média</b>       | <b>45,50</b>     | <b>645,75</b>      | <b>688,08</b>            |
| <b>DesvioP</b>     | <b>1,7059355</b> | <b>55,09767828</b> | <b>58,31867447</b>       |

| Flexão condição 14 - COM ARGAMASSA |                 |                    |                          |
|------------------------------------|-----------------|--------------------|--------------------------|
| Provete                            | E (Gpa)         | Tensão (Mpa)       | $\sigma$ corrigida (Mpa) |
| 14-1-A                             | 45,93           | 685,31             | 767,54                   |
| 14-2-A                             | 47,36           | 672,22             | 712,53                   |
| 14-3-A                             | 45,55           | 685,32             | 726,64                   |
| <b>Média</b>                       | <b>46,28</b>    | <b>680,95</b>      | <b>735,57</b>            |
| <b>DesvioP</b>                     | <b>0,779273</b> | <b>6,174493491</b> | <b>23,32808765</b>       |

## ANEXO D – FICHA TÉCNICA ÓLEO DESCOFRANTE



### Ficha Técnica

## RELAGO 432

*Descofrante universal*

#### CAMPOS DE APLICAÇÃO

RELAGO 432 é aplicável em cofragens absorventes e não absorventes feitas em madeira ou aço. Atua como agente de separação entre o betão e a cofragem através de processos físicos e químicos.

Descofrante de qualidade para uma fácil desmoldagem. Aumenta o tempo de utilização dos moldes, reduz o processo de limpeza dos mesmos evitando a sua oxidação.

Especialmente aconselhado para trabalho em obra.

#### DOSAGEM

Dosagem recomendada, 1 litro para cerca de 30 a 50 m<sup>2</sup> de superfície, dependendo do tipo de cofragem.

#### PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

RELAGO 432, atua pela formação de uma película na superfície da cofragem que atua através de processos químicos e físicos entre esta e o betão.

Com esta película, o processo de descofragem é facilitado.

#### INFORMAÇÃO TÉCNICA

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Homogeneidade              | Homogéneo   |
| Cor                        | Amarelo escuro  |
| Estado                     | Líquido   |
| Massa volúmica (20 °C)     | 0,88 ± 0.02 g/cm <sup>3</sup>   |
| Estabilidade               | Até 60 °C   |
| Trabalhabilidade           | Desde +5 °C   |
| Validade                   | Pelo menos 1 ano desde a data de produção, se armazenado convenientemente                     |
| Condições de armazenamento | Armazenar na embalagem original fechada entre +5 °C e +25 °C. Proteger do gelo e de insolação |



## Ficha Técnica

# RELAGO 432

*Descofrante universal*

### INDICAÇÕES DE PROCESSAMENTO

RELAGO 432 é um descofrante pronto a usar e não deve ser diluído.

O melhor processo de aplicação é a pulverização através de um pulverizador de alta pressão.

Pode também ser aplicado com pincel ou com pistola.

Aplicar uma camada fina e uniforme.

### EMBALAGEM

- 25 l vasilha
- 210 l tambor
- 1000 l contentor IBC
- a granel

### OBSERVAÇÕES

Esta informação descreve as possibilidades de aplicação e processamento de um produto e os seus princípios de operação sob condições normais. Não tendo qualquer influência em mais aplicações e processos, especialmente em conjunto com outros materiais de construção, as indicações dadas não são nem uma garantia no que diz respeito às propriedades do produto nem a sua aptidão para um propósito particular nem a informação do uso completa. Esta informação, qualquer outra recomendação ou aconselhamento verbal não são compulsivos e não inferem nenhuma responsabilidade ou exigência legal.

Devido a desenvolvimento contínuo futuro, a Ficha Técnica mais recente é válida e será fornecida quando requisitada. Todas as encomendas são aceites, sujeitas aos nossos termos e condições gerais.

Edição: 28 Fevereiro 2016 FA

**ADEQUABILIDADE E PRÉ-TESTES SÃO NECESSÁRIOS ANTES DE APLICAR O DESCOFRANTE EM PRODUÇÃO!**