

• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Degradação mecânica em compósitos de vidro/epóxico sujeitos a soluções cimentícias

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Autor

Renato Resende Moreira Baptista Carvalho

Orientadores

Professora Ana Paula Betencourt Martins Amaro

Professora Maria Isabel Moita Pinto

Júri

Presidente Professor Doutor **Sérgio Manuel Rodrigues Lopes**
Professor Catedrático da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor **Paulo Nobre Balbis dos Reis**
Professor Auxiliar da Universidade da Beira Interior

Orientadora Professora Doutora **Ana Paula Betencourt Martins Amaro**
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2015

Agradecimentos

A realização desta dissertação não seria possível sem o apoio de algumas pessoas às quais não posso deixar de agradecer todo o apoio prestado.

Em primeiro lugar, um profundo agradecimento aos meus orientadores, Professora Doutora Ana Paula Betencourt Martins Amaro e Professora Doutora Maria Isabel Moita Pinto, pela forma como me apoiaram na realização deste trabalho.

Agradeço aos demais professores e amigos que de alguma forma deram o seu contributo no sentido de melhorar este trabalho.

Por último, um agradecimento a todos os que me acompanharam durante o percurso académico, em especial à minha família, ao Alfredo e ao Crispim.

A todos um profundo agradecimento.

Resumo

Na área de engenharia civil, têm sido levadas a cabo investigações relativas ao desenvolvimento de materiais inovadores. Os materiais compósitos têm evidenciado assumir particular ênfase neste setor.

Neste âmbito, há a pretensão de estudar a aplicabilidade dos materiais compósitos em substituição do aço tradicionalmente utilizado nas armaduras em construções civis, que apresenta alguns problemas, tais como os associados à corrosão. Os compósitos exibem, de facto, um excelente potencial enquanto matérias-primas de futuro, em virtude das suas boas propriedades mecânicas, menores custos de produção e reduzidos impactos ambientais.

A investigação alusiva ao comportamento do material no decorrer da sua vida útil é realizada através da imersão de provetes, por diferentes períodos de tempo, em duas soluções de degradação distintas, nomeadamente a argamassa de metacaulino e a argamassa de cimento, sendo esta última analisada em seco e após imersão em água.

Para o estudo da alteração da integridade estrutural dos materiais compósitos, após sujeitos a degradação pelas soluções referidas, recorreu-se a ensaios de flexão em três pontos e de rugosidade.

A imersão nas soluções provoca uma diminuição da tensão máxima de flexão e da rugosidade. As conclusões são obtidas através da comparação com os valores registados para o provete de controlo.

Palavras-chave: Compósito, Flexão em três pontos, Rugosidade, Soluções cimentícias, Vidro/epóxico.

Abstract

In civil engineering, there has been research on the development of innovating materials. Composite materials have shown to be of particular emphasis in this sector.

In this context, there is the intention to study the applications of composite materials as substitutes of the traditional steel used in civil construction, which presents some problems such as those associated with corrosion. Composite materials, on the other hand, show a great potential as future raw materials due to their good mechanical properties, lower production costs and lower environmental impact.

The research of the material behaviour during its lifetime is done by immersing samples, for different periods of time, in two distinct degradation solutions, namely metakaolin mortar and cement mortar, the latter being analysed dried after immersion in water.

For the study of the change in structural integrity of composite materials, after being subjected to the degradation by the aforementioned solutions, the three-point bending flexural test and roughness test were used.

The immersion in the solutions leads to a decrease in the maximum bending stress and also roughness. Conclusions are drawn by comparing against the values obtained for the control sample.

Keywords Cement solutions, Composite, Glass/epoxy, Roughness, Three point bending.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia.....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTADO DE ARTE.....	3
2.1. Materiais Compósitos	3
2.2. Classificação dos Materiais Compósitos	5
2.2.1. Matriz	5
2.2.2. Reforço	8
2.3. Fabrico de materiais compósitos.....	11
2.3.1. Moldação manual	12
2.3.2. Moldação em autoclave.....	13
2.4. Degradação em materiais compósitos.....	14
2.4.1. Temperatura.....	14
2.4.2. Humidade	14
2.4.3. Radiação ultravioleta	15
2.4.4. Meios ácidos/alcalinos.....	16
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	19
3.1. Materiais e soluções.....	19
3.1.1. Laminados de vidro/epóxico	19
3.1.2. Argamassa de cimento	21
3.1.3. Argamassa de metacaulino	22
3.2. Imersão das amostras	24
3.3. Ensaio realizados.....	26
3.3.1. Massa	26
3.3.2. Rugosidade	27
3.3.3. Flexão em três pontos	27
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	31
4.1. Massa	31
4.2. Rugosidade.....	32
4.2.1. Argamassa de Metacaulino.....	32
4.2.2. Argamassa de cimento imersa em água.....	33
4.2.3. Argamassa de cimento.....	34
4.2.4. Comparação de resultados rugosidade	34
4.3. Flexão em 3 pontos	36
4.3.1. Argamassa de metacaulino	37
4.3.2. Argamassa de cimento imersa em água.....	38
4.3.3. Argamassa de cimento	39
4.3.4. Comparação de resultados de flexão em 3 pontos.....	40

5. CONCLUSÕES E SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	43
5.1. Conclusões.....	43
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Formas gerais de reforços exteriores [3].....	4
Figura 2.2. Fases de um compósito [6].....	5
Figura 2.3. Classificação dos materiais compósitos quanto à matriz [5].	6
Figura 2.4. Possíveis orientações do empilhamento do reforço [11].....	9
Figura 2.5. Classificação dos materiais compósitos quanto ao reforço [12].	9
Figura 2.6. Classificação de alguns dos processos de fabrico de um compósito de acordo com o tipo de resina [5].	11
Figura 2.7. Processo de moldação manual [5].....	12
Figura 2.8. Esquema de um saco de vácuo [15].	13
Figura 3.1. Ciclo de cura das placas de vidro/epóxico [7].	19
Figura 3.2. Provetes de vidro/epóxico.....	20
Figura 3.3. (a) Serra de disco; (b) Lixa de água.	20
Figura 3.4. (a) Balança para pesagem dos constituintes; (b) Preparação da argamassa de cimento.	22
Figura 3.5. (a) Metacaulino; (b) Misturadora para preparação da argamassa de metacaulino.	23
Figura 3.6. Caixa para imersão das amostras.	24
Figura 3.7. (a) Imersão em argamassa de cimento; (b) Imersão em argamassa de metacaulino.	24
Figura 3.8. Amostras envolvidas em película plástica.	25
Figura 3.9. Balança.....	26
Figura 3.10. Rugosímetro.....	27
Figura 3.11. Máquina de ensaio de flexão em três pontos.	28
Figura 3.12. (a) Esquema do ensaio de flexão em três pontos; (b) Proвете em ensaio de flexão em três pontos.....	28
Figura 4.1. Variação de massa.....	31
Figura 4.2. Variação de rugosidade média, R_a	35
Figura 4.3. Curva força-deslocamento para provete de controlo.	37
Figura 4.4. Variação da tensão máxima de flexão.....	40
Figura 4.5. Variação da rigidez à flexão.....	42

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Propriedades das resinas epóxicas [8], [9].	8
Tabela 2.2. Propriedades da fibra de vidro do tipo E [5].....	10
Tabela 3.1. Constituintes da argamassa de cimento.	21
Tabela 3.2. Constituintes da argamassa de metacaulino.	23
Tabela 4.1. Resultados do ensaio de rugosidade em termos médios para argamassa de metacaulino.	32
Tabela 4.2. Resultados do ensaio de rugosidade em termos médios para argamassa de cimento imersa em água.	33
Tabela 4.3. Resultados do ensaio de rugosidade em termos médios para argamassa de cimento.	34
Tabela 4.4. Tensão máxima de flexão e Rigidez à flexão, em termos médios para argamassa de metacaulino.	37
Tabela 4.5. Tensão máxima de flexão e Rigidez à flexão, em termos médios para argamassa de cimento imersa em água.....	38
Tabela 4.6. Tensão máxima de flexão e Rigidez à flexão, em termos médios para argamassa de cimento.....	39

SIMBOLOGIA

- b – Largura
 E – Rigidez à flexão
 h – Espessura
 I – Momento de inercia
 L – Distância entre apoios
 m_f – Massa do provete depois de imerso
 m_i – Massa do provete antes de imerso
 m_r – Variação de massa do provete
 P – Carga máxima
 R_a – Rugosidade média
 R_q – Rugosidade média quadrática
 R_z – Altura média pico a vale
 σ – Tensão de flexão
 ΔP – Variação da força
 Δu – Variação da deformação

1. INTRODUÇÃO

A utilização de materiais compósitos tem crescido de forma exponencial em diversas áreas da indústria, onde se pretendem materiais com as melhores propriedades.

A introdução destes materiais na área da construção civil, nomeadamente compósitos de vidro/epóxico, visam eliminar alguns dos problemas associados às armaduras de aço em estruturas de betão. A corrosão, o peso excessivo e as interferências eletromagnéticas são alguns dos problemas que se pretendem suprimir.

Assim, existe cada vez mais necessidade de estudar estes materiais, com o objetivo de perceber quais as alterações que apresentam quando submetidos a solicitações diversas, após o contacto com soluções cimentícias, e de que modo estes fatores alteram a integridade estrutural dos mesmos.

É neste contexto que surge esta dissertação.

Nesse sentido, foram selecionadas as soluções argamassa de cimento e argamassa de metacaulino frequentemente utilizadas na área da construção civil. Os provetes de vidro/epóxico foram submetidos a essas mesmas soluções durante diversos períodos de tempo. A seguir analisou-se a alteração de integridade estrutural ocorrida nesses mesmos provetes promovida pelas referidas soluções.

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, sendo este o primeiro, no qual é apresentada uma abordagem geral/inicial ao tema tratado.

No capítulo dois é feito um enquadramento teórico sobre materiais compósitos em geral, vidro/epóxico em particular e feita referência a estudos realizados na mesma área.

O capítulo três contém o procedimento experimental, que vai desde a preparação dos provetes, passando pela elaboração das soluções e terminando com os ensaios realizados, fazendo-se referência aos equipamentos utilizados.

No capítulo quatro são expostos e discutidos os resultados obtidos durante o procedimento experimental.

As conclusões retiradas dos resultados e sugestões ao que pode ser realizado futuramente neste campo são enunciadas no capítulo cinco.

2. ESTADO DE ARTE

No presente capítulo pretende-se introduzir ao leitor o conceito geral de material compósito, fazendo um enquadramento histórico e apontando correntes aplicações. São ainda abordados pontos que visam dar a compreender como é feita a classificação destes materiais e o comportamento dos mesmos expostos a soluções com tendência a provocar-lhes degradação.

2.1. Materiais Compósitos

De um modo geral, um material diz-se compósito quando é formado por dois ou mais constituintes de composições, propriedades e/ou estruturas distintas e que estão separados por uma interface. Esses constituintes devem ainda ser intrinsecamente insolúveis [1], [2].

A origem dos compósitos remonta às primeiras sociedades, quando estas faziam a junção de materiais de modo a obterem ferramentas e estruturas que melhorassem e facilitassem o estilo de vida na altura. Como exemplo tem-se o fabrico de paredes reforçadas com palha, instrumentos de caça, entre outros [1].

Os compósitos foram perdendo relevância e de certa forma até esquecidos durante séculos, sendo que o verdadeiro reaparecimento destes materiais deu-se na década de 40 quando desempenharam papéis estruturais importantes no campo das engenharias militar, aeroespacial, aeronáutica e automobilística [1], [3]. Nas décadas que se seguiram a crescente exigência das novas tecnologias, sobretudo no que respeita à combinação de propriedades incompatíveis de variados materiais, como é o caso da resistência mecânica com a tenacidade, impulsionou o estudo sobre os compósitos [1].

Atualmente são materiais que se sobressaem apresentando vantagens como elevada rigidez e módulo específico, elevada resistência à corrosão e condutividade térmica, boa fluidez, estabilidade estrutural e fácil moldagem [1]. Todas estas propriedades fazem com que sejam cada vez mais utilizados, nas diversas áreas da engenharia, como substitutos dos materiais convencionais [3].

Destacando a utilização destes materiais na engenharia civil, o que vai de encontro com o presente estudo. Juvandes (2002) [3] faz referência à utilização dos materiais compósitos empregues como armaduras não metálicas em casos de reabilitação de estruturas de betão armado. A Figura 2.1 dá a entender possíveis formas de colocação do reforço exterior conforme o tipo de esforço a suportar.

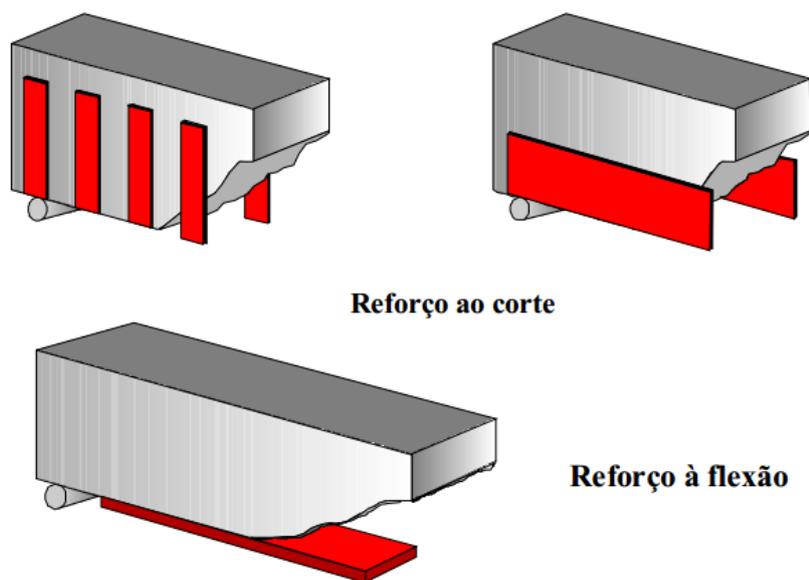


Figura 2.1. Formas gerais de reforços exteriores [3].

Mais recentemente, no seguimento da constante procura de materiais com características apropriadas aos novos projetos de engenharia, visto ser cada vez mais urgente a aplicação de materiais muito resistentes e duráveis, surge a possibilidade substituir a armação metálica do betão, por armação de compósito.

Esta possibilidade trás consigo a necessidade de perceber as alterações na integridade estrutural dos materiais compósitos quando estão em contacto direto com soluções usadas na construção, como o caso da argamassa de cimento ou a argamassa de metacaulino.

2.2. Classificação dos Materiais Compósitos

O fabrico de um material compósito implica a combinação de duas fases, uma contínua designada de matriz e outra descontínua designada de reforço, para formar um material que de certa forma tem um melhor desempenho que os seus constituintes numa situação particular [1], [4].

As propriedades de um compósito estão, assim, obviamente dependentes dos materiais constituintes, bem como da forma em que se encontram dispostos e respetiva interação entre eles. Os materiais compósitos são, por este motivo, passíveis de poderem ser classificados tanto quanto à sua matriz como quanto ao seu reforço [5].

É de salientar que em alguns casos, devido à interação química entre as fases matriz e reforço possa existir uma terceira fase, como mostra a Figura 2.2, à qual se dá o nome de interface. Esta fase, promove uma melhor interação mecânica na superfície de contacto entre a matriz e o reforço, sendo responsável pela transferência de solicitações mecânicas internas da matriz para o reforço [6].

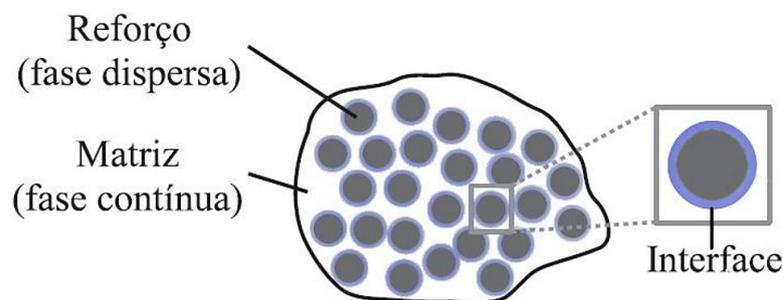


Figura 2.2. Fases de um compósito [6].

2.2.1. Matriz

A classificação de um compósito quanto à sua matriz está representada na Figura 2.3, podendo então ser classificado como de matriz de origem polimérica, metálica ou cerâmica [5]. A matriz tem como principais funções, unir as fibras atuando como meio através do qual as cargas são transmitidas e distribuídas, protegê-las do meio circundante contra danos superficiais como abrasão mecânica ou reações químicas e prevenir a propagação de fendas entre elas [2].

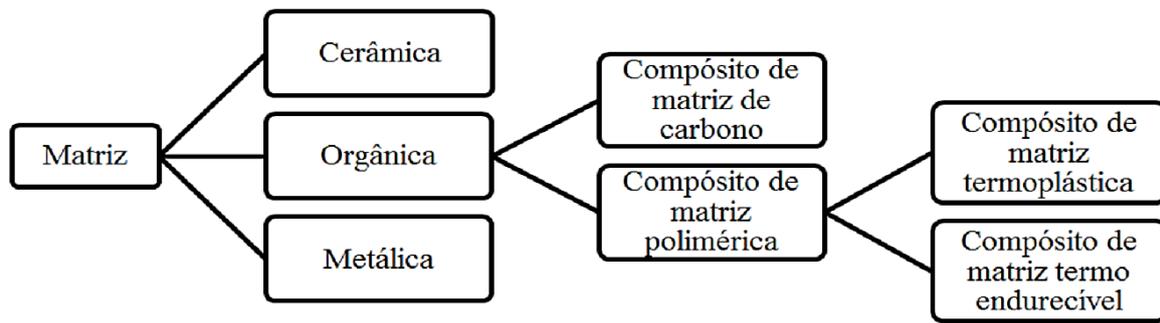


Figura 2.3. Classificação dos materiais compósitos quanto à matriz [5].

Os compósitos de matriz polimérica, matriz do compósito em análise neste trabalho, dividem-se em duas categorias principais, os termoplásticos e os termoendurecíveis [5].

2.2.1.1. Termoplásticos

No grupo das matrizes poliméricas estão os designados plásticos técnicos, que são constituídos por macromoléculas individuais lineares sem qualquer reticulação entre si.

Uma vez o termoplástico aquecido, as ligações entre as moléculas são quebradas temporariamente, permitindo a mobilidade molecular ou seja a reconformação, isto é, a tomada de posições diferentes. Com o arrefecimento posterior, as moléculas permanecerão na posição que tinham tomado quando aquecido [5].

Estes materiais salientam-se por apresentarem maior resistência ao impacto, maior tenacidade e menor custo de transformação quando comparados com os polímeros termoendurecíveis. São facilmente processados por injeção ou por termoformação e podem ser reciclados [5], [7]. O crescimento da utilização dos compósitos de matriz polimérica termoplástica é condicionado pela maior dificuldade de impregnar completamente os reforços [5].

2.2.1.2. Termoendurecíveis

As matrizes termoendurecíveis são constituídas por polímeros em que as moléculas formam estruturas tridimensionais rígidas. Estas matrizes, ao contrário das termoplásticas não podem ser reprocessadas, uma vez que aquecidos, os termoendurecíveis assumem uma forma permanente.

Os termoendurecíveis são também chamados de resinas termoendurecíveis, por serem frequentemente fornecidos para processamento sob a forma de uma mistura de dois

ou de três componentes, a resina, o acelerador e o catalisador. Quando estes componentes são misturados na proporção adequada, dá-se a polimerização e a constituição da estrutura tridimensional, num processo designado por cura [5].

A principal vantagem destas resinas sobre as resinas termoplásticas é a facilidade de impregnação do reforço, por apresentarem uma viscosidade, antes da cura, muito mais baixa. Uma das suas características fundamentais é a temperatura limite de funcionamento [5].

As resinas termoendurecíveis mais utilizadas no fabrico de compósitos são as resinas de poliéster, vinilester, fenólicas e as resinas de epóxidos, sendo estas últimas mais aprofundadas de seguida, por comporem uma das fases do compósito em estudo [5].

2.2.1.2.1. Resinas de epóxido

As resinas de epóxido apresentam grandes variedades de formulações químicas, a maior parte baseados no diglicidil éter de bisfenol. A sua cura é feita adicionando um agente endurecedor apropriado, como aminas alifáticas, aromáticas ou algumas poliamidas.

Apresentam vantagens como, elevada resistência mecânica, resistência à abrasão, resistência química (sobretudo em meios alcalinos), boas propriedades de adesão à fibra. Durante o processo de cura não há libertação de voláteis e tem baixa retração, grande estabilidade dimensional em resultados de funcionamento tipicamente entre 100 °C a 200 °C. O baixo peso molecular das resinas epoxídicas não curadas no estado líquido confere-lhes uma mobilidade molecular elevada durante o processamento. Esta ação de molhagem é importante nas resinas epóxidos utilizadas em materiais reforçados e em adesivos [5].

Como desvantagens destacam-se a necessidade de um processamento cuidado para garantir resistência à humidade, o elevado tempo de cura e ainda o elevado custo [5], [8].

A Tabela 2.1 resume algumas das propriedades mais relevantes da resina de epóxido.

Tabela 2.1. Propriedades das resinas epóxicas [8], [9].

Propriedades	Resinas epóxicas
Resistência à tração [MPa]	55 – 130
Resistência à flexão [MPa]	100 – 150
Módulo de elasticidade [GPa]	2,75 – 4,10
Massa específica [kg/m ³]	1200 – 1300
Temperatura de deflexão térmica [°C]	70 – 170
Retração durante a cura [%]	1 – 5
Absorção H ₂ O durante 24 h [%]	0,08 – 0,15
Coefficiente de expansão térmica linear [10 ⁻⁶ C ⁻¹]	50 – 80
Alongamento até à rotura [%]	2 – 5
Resistência ao corte [MPa]	30 – 50

2.2.2. Reforço

O reforço é o elemento responsável pelo bom desempenho mecânico de um compósito, uma vez que suporta a quase totalidade das cargas aplicadas no material. De uma forma geral a fase descontínua dos compósitos deve ser de elevada resistência mecânica e de elevada rigidez e para além disso, deve ainda aumentar a resistência térmica e a condutividade [5].

O comportamento dos compósitos reforçados com fibras é principalmente avaliada pelo comprimento, forma, orientação e composição das fibras. A Figura 2.4 exemplifica como podem ser orientadas as fibras, sendo que esta orientação, juntamente com a sua concentração e distribuição são os aspetos que mais significativamente influenciam as propriedades mecânicas dos compósitos. Também de extrema importância no desempenho dos compósitos é a interação do reforço com a matriz que o envolve, uma vez que uma boa adesão é crucial para que se processe a correta distribuição dos esforços entre todas as fibras. [5], [10].

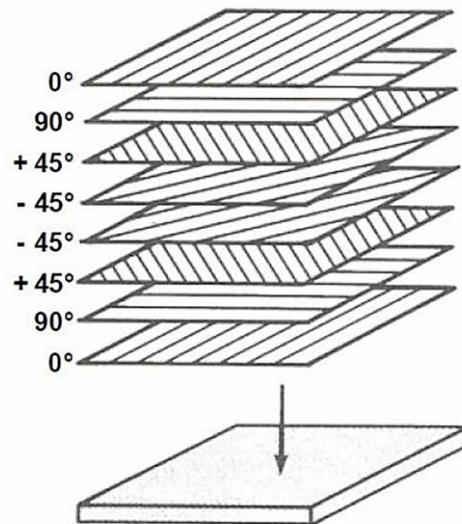


Figura 2.4. Possíveis orientações do empilhamento do reforço [11].

A classificação dos materiais compósitos relativamente ao seu reforço está representada na Figura 2.5.

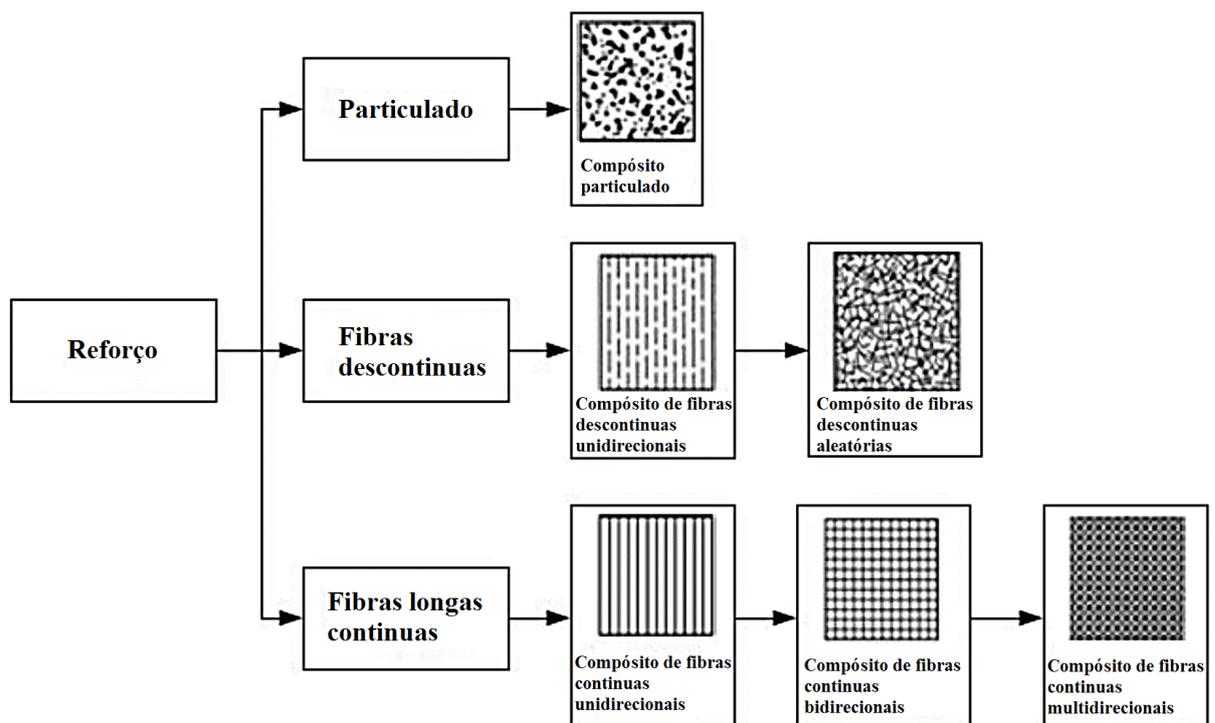


Figura 2.5. Classificação dos materiais compósitos quanto ao reforço [12].

As fibras que são o reforço do compósito utilizado no presente estudo dividem-se em dois grupos, o grupo das fibras naturais e o grupo das fibras sintéticas.

2.2.2.1. Fibras naturais

Estas fibras podem ser de origem vegetal, mineral, e animal. São usadas essencialmente devido à sua baixa densidade, boas propriedades térmicas, baixo preço, durabilidade, sustentabilidade e biodegradabilidade [5]. De origem vegetal são exemplos o algodão orgânico e a fibra de coco. Relativamente às de origem animal tem-se como exemplos a lã orgânica e a seda selvagem. O amianto é exemplo de fibras minerais [13].

2.2.2.2. Fibras sintéticas

São fibras produzidas pelo homem, das quais fazem parte as fibras de aramida, carbono e de vidro [5]. As fibras de carbono e aramida destacam-se pela elevada resistência associada à baixa densidade comparativamente com as de vidro.

2.2.2.2.1. Fibras de vidro

São as mais utilizadas no reforço de compósitos por apresentarem baixo custo, elevada tensão de rotura à tração e grande resistência à corrosão. As suas principais desvantagens resultam do baixo módulo de elasticidade, elevada sensibilidade à abrasão durante o seu manuseamento, resistência à fadiga relativamente baixa e fraca adesão à matriz [10], [14].

As fibras de vidro podem pertencer a vários tipos, cada qual com características particulares. Por exemplo, as do tipo C apresentam uma elevada resistência à corrosão, as do tipo S apresentam por sua vez uma elevada resistência à tenacidade. Contudo, as mais utilizadas de entre os vários tipos são as E por apresentarem uma relação razoável entre propriedades e preço [10]. Na Tabela 2.2 são identificadas algumas das propriedades da fibra de vidro do tipo E, usadas no compósito em análise neste trabalho.

Tabela 2.2. Propriedades da fibra de vidro do tipo E [5].

Propriedades	Fibras de vidro tipo E
Resistência à tração [MPa]	2400
Módulo de elasticidade [GPa]	73
Massa específica [kg/m ³]	2555
Alongamento até à rotura [%]	3

2.3. Fabrico de materiais compósitos

Os diferentes processos para a obtenção de um material compósito podem ser generalizadas em dois tipos: processo em molde aberto ou processo em molde fechado. No caso dos moldes abertos, apenas uma das superfícies tem bom acabamento, limitação que é compensada pela possibilidade de realização de componentes de grandes dimensões e de geometria complexa. Os processos de molde fechados apresentam excelentes acabamentos nas duas superfícies e ótima reprodutibilidade. Outra vantagem é a menor inibição de produtos voláteis, nocivos para a saúde [5].

O processo de manufatura está dependente se o tipo de resina é termoendurecível ou termoplástica, não deixando de existir processos comuns a estes dois tipos de resina, como se pode verificar na Figura 2.6.

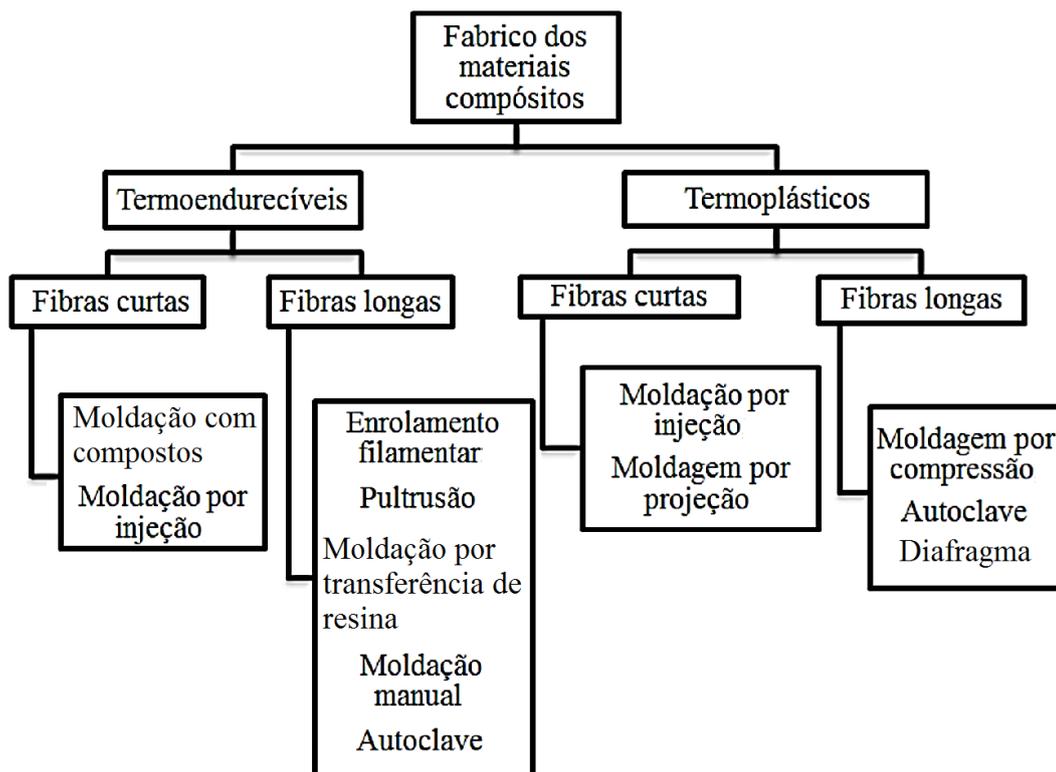


Figura 2.6. Classificação de alguns dos processos de fabrico de um compósito de acordo com o tipo de resina [5].

2.3.1. Moldação manual

A moldação manual, inserida na moldação por contacto, é o método mais económico e mais comum. Trata-se, como o próprio nome suscita, de um método manual. É feito em molde aberto o empilhamento e a impregnação das sucessivas camadas de reforço. Numa fase inicial o molde é revestido com uma resina de poliéster, cuja função é garantir um bom acabamento superficial. Seguidamente coloca-se de forma manual o reforço (normalmente um tecido ou uma manta) e a resina. Com o apoio de um pincel de rolo é possível molhar completamente o reforço [5]. Este processo é repetido camada por camada até se obter o resultado pretendido. A Figura 2.7 mostra um esquema tipo do processo de moldação manual.

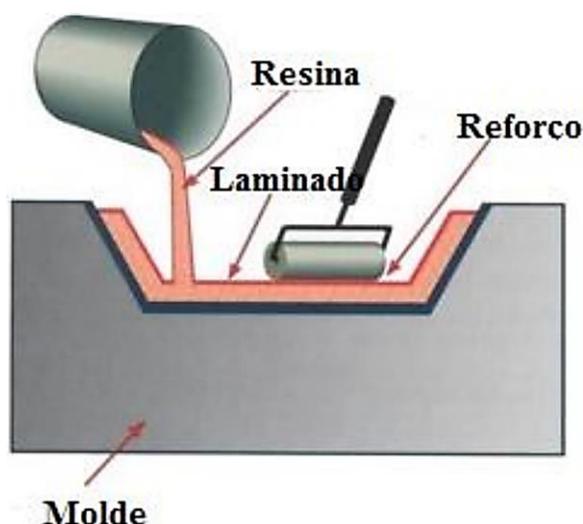


Figura 2.7. Processo de moldação manual [5].

Este processo tem, devido à sua simplicidade, um reduzido investimento inicial e poucas restrições quanto à possível geometria das peças a obter, as suas principais vantagens. Por outro lado apresenta desvantagens quando analisados os custos de mão-de-obra, o facto da qualidade do produto final depender em grande medida do operador, o bom acabamento superficial estar apenas restringido a uma das faces, as necessidades de rebarbagem e acabamento das peças [5].

A moldação manual poderá ser complementada com o processo de laminação a vácuo. Neste caso, a peça, depois de ter sido manualmente fabricada, é selada dentro de uma bolsa de plástico que é ligada a uma bomba de vácuo. O objetivo é retirar o ar, ajudando a compactar a peça e a retirar o excesso de resina [8].

A cura acontece sob condições atmosféricas normais [14]

2.3.2. Moldação em autoclave

É um processo de moldação que garante peças com elevado desempenho e qualidade, como exigido em indústrias como a aeronáutica e o desporto automóvel. Consiste na consolidação de um componente pré-formado através da aplicação simultânea de temperatura, pressão e vácuo. Estes estágios dependem do material a moldar, o que implica uma subida gradual de temperatura, estágio a temperatura constante e posterior diminuição também de uma forma gradual. Na primeira fase, procura-se baixar a viscosidade da resina para a eliminação de voláteis e promover o fluxo de resina, de modo a garantir teores de fibra elevados e homogêneos. A etapa seguinte é a cura e consolidação do componente, na qual a pressão desempenha o papel mais relevante. Este processo de moldação está frequentemente associado a materiais compósitos laminados. Para a obtenção desses laminados, um pré-impregnado é cortado e empilhado sobre o molde, na sequência pretendida e até atingir a espessura desejada, seguidamente o conjunto é inserido num saco de vácuo, Figura 2.8, e sujeito a um ciclo de pressão e temperatura definido, num autoclave. Como desvantagens tem o elevado investimento inicial e o tempo necessário para obtenção das peças, o que faz com que o processo não seja adequado para um grande número de séries [5]. Os materiais em análise neste trabalho foram processados por autoclave.

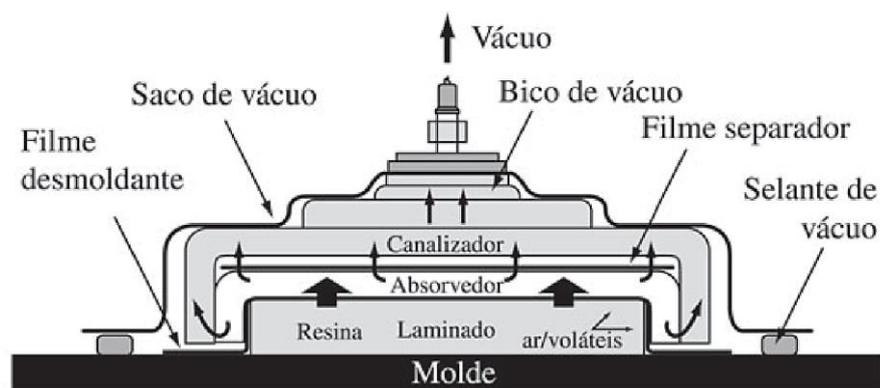


Figura 2.8. Esquema de um saco de vácuo [15].

2.4. Degradação em materiais compósitos

Qualquer que seja a aplicação de um material compósito o estudo da sua degradação pode tornar-se da máxima importância, uma vez que as suas propriedades mecânicas podem ser significativamente afetadas [10]. Através de simulações das condições de serviço a que possam ficar sujeitos é possível prever o comportamento do material ao longo da sua vida útil [7].

Ao nível de projeto, os problemas surgem, por exemplo, com as gamas de temperatura de trabalho muito apertadas, com a sensibilidade destes materiais à humidade e temperatura em simultâneo, radiação ultravioleta e meios ácidos/alcalinos [10].

Entende-se por degradação qualquer reação destrutiva que possa ser causada por agentes químicos, físicos, mecânicos ou em simultâneo. Desta forma pode ocorrer uma modificação irreversível nas propriedades dos materiais poliméricos, isto é, uma deterioração progressiva das suas propriedades mecânicas [10].

2.4.1. Temperatura

Praticamente todas as aplicações de engenharia são expostas a alterações de temperatura. No caso dos materiais compósitos poliméricos este fenómeno torna-se determinante, pois o seu campo de aplicação encontra-se bem limitado [10].

Uma importante restrição passa logo por estes materiais não poderem ser usados para temperaturas próximas da temperatura de transição vítrea, para as quais os polímeros podem sofrer alterações significativas nas suas propriedades físicas e mecânicas. Normalmente a condutividade ao longo das fibras é maior que ao longo da espessura, levando a um aumento de fluxo de calor para ou a partir dos extremos dos laminados. Verifica-se, assim, com regularidade, que as camadas superficiais são as mais afetadas [10].

Conclui-se que as variações térmicas produzem grandes danos no polímero. Podem surgir tensões entre camadas que conduzem a fissuras em situações limite de resistência mecânica [10].

2.4.2. Humidade

A humidade, na generalidade, é apontada como um dos problemas que mais condiciona os materiais compósitos. Na verdade acaba por afetar a matriz, as fibras e a

interface, podendo mesmo causar perda de aderência entre matriz/fibra, condicionando, assim, a integridade destes materiais [10].

O contacto direto com a água acaba por conduzi-la ao interior do material através das fibras e através da interface, pela natureza hidrófila das matrizes, pelos defeitos ocorridos durante o fabrico, pelos poros existentes na matriz ou pelas fissuras provocadas por fatores ambientais ou de serviço [10].

Ao nível da matriz verifica-se que a temperatura vítrea é fortemente condicionada pela humidade, sendo que um ligeiro aumento da humidade pode provocar uma significativa diminuição da temperatura vítrea. A humidade ao promover dilatações introduz tensões internas que, ao excederem as forças de ligação da matriz, promovem fissuras normalmente na camada exterior. Mais uma vez as propriedades mecânicas são afetadas, sendo criadas condições para uma maior absorção de água [10].

Griffiths e Ball (2000) [16] concluíram que após 3 semanas de imersão em água doce não existe diminuição conclusiva da resistência à flexão, enquanto a exposição também por três semanas mas em água salgada provoca uma diminuição da resistência à flexão em cerca de 20%. Após 7 meses de imersão os mesmos autores verificaram uma diminuição da resistência à flexão em cerca de 20% para as amostras imersas em água doce, enquanto as que foram imersas em água salgada apresentam uma diminuição da resistência à flexão na ordem dos 35%.

Outro estudo, neste caso de Huang e Sun (2007) [17], que analisa as propriedades mecânicas de compósitos de fibra de vidro e matriz poliéster depois de um período de imersão em água, conclui que ao fim de 21 dias de imersão a resistência à flexão diminui cerca de 15%.

2.4.3. Radiação ultravioleta

A grande sensibilidade à radiação ultravioleta (UV) e consequente degradação que os compósitos laminados apresentam, sobretudo ao nível do polímetro da matriz, acaba por os limitar no seu campo de aplicações [10].

Dependendo do tipo de radiação ultra violeta, da intensidade e da quantidade de oxigénio no local da absorção, podem ocorrer rompimentos de ligações na cadeia principal do polímero. Verifica-se que para períodos relativamente curtos de exposição,

apenas são observadas alterações na morfologia da superfície, enquanto exposições prolongadas conduzem a alterações generalizadas no polímero [10].

As mudanças físicas consistem principalmente em descoloração, microfissuras e alterações ao nível da estrutura química. A degradação mecânica leva à fragilidade excessiva e afeta a durabilidade a longo prazo do polímero [10].

Também Griffiths e Ball (2000) [16] concluíram que a exposição à radiação UV durante 8 semanas provoca uma diminuição da resistência à flexão da fibra de vidro em cerca de 24%.

A radiação utilizada tinha um comprimento de onda entre 300nm e 400nm. O mecanismo de degradação/envelhecimento por radiação UV leva a que as cadeias poliméricas da matriz de poliéster sejam quebradas, provocando uma diminuição do brilho, reduzindo a energia necessária para o início da propagação da fenda no material [9].

2.4.4. Meios ácidos/alcalinos

O contacto com soluções ácidas ou alcalinas, ou seja, ambientes de natureza corrosiva pode provocar alterações nas propriedades mecânicas dos compósitos.

Destacando a influência desses meios em compósitos de vidro/epóxico, sobre o qual foi realizado um estudo, Amaro *et al.* (2013) [18], começou por mergulhar provetes em soluções ácida de ácido clorídrico (HCl) e alcalina de hidróxido de sódio (NaOH) e posteriormente submetem esses provetes a ensaios de flexão em 3 pontos, registando valores comparativos entre diferentes tempos de imersão.

Estes autores observam, para ambas as soluções, um decréscimo da resistência à flexão dos provetes imersos quando comparados com os provetes de controlo. Esta diminuição da resistência à flexão acentua-se com o prolongar do tempo de imersão, a maior redução atinge os 22 % ao fim de 36 dias de imersão e ocorre para o caso de imersão na solução alcalina (NaOH).

Os mesmos autores, [18], analisaram ainda a rugosidade dos provetes que foram imersos nas soluções ácida e alcalina tendo constatado que os valores da rugosidade média aritmética (Ra), parâmetro que melhor caracteriza a superfície, sofrem um aumento com o tempo de imersão quando comparados com o provete de controlo. Verificaram, também, que esse aumento da rugosidade média aritmética é mais significativo para solução alcalina (NaOH), e atinge o seu valor mais elevado, 44%, aos 36 dias de imersão.

Também em [16], os autores analisaram a exposição a soluções ácidas e alcalinas a 10%, em semelhante linha com o que foi estudado em [18], mas adicionando o caso de imersão em ácido sulfúrico (H_2SO_4). Verificaram uma redução da resistência à flexão depois de 15 dias de imersão. Essa redução varia entre 18% e 24 % para soluções de ácido sulfúrico (H_2SO_4) e de ácido clorídrico (HCl) respectivamente, chegando aos 38% para o caso da solução alcalina de hidróxido de sódio (NaOH).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão abordados os materiais e equipamentos utilizados no desenvolvimento do estudo. Desde o material em análise, às soluções degradantes a que foi sujeito, fazendo-se referência aos procedimentos seguidos.

3.1. Materiais e soluções

Como já foi referido, o material estudado é um compósito laminado de vidro/epóxico que foi imerso em soluções de argamassa de cimento, argamassa de cimento imersa em água e argamassa de metacaulino. Foram selecionadas estas soluções, por serem das mais utilizadas na construção civil.

O material e soluções serão aprofundados de seguida.

3.1.1. Laminados de vidro/epóxico

Os laminados de vidro/epóxico foram produzidos por autoclave, a partir da sobreposição de várias camadas de pré-impregnados com a sequência de empilhamento $[0_3, 90_3]_{2s}$, a que correspondem 24 camadas, com uma espessura de aproximadamente 0,14 mm por camada. Foram sujeitos a uma pressão de 2 bar e a um ciclo de temperatura de acordo o ilustrado na Figura 3.1.

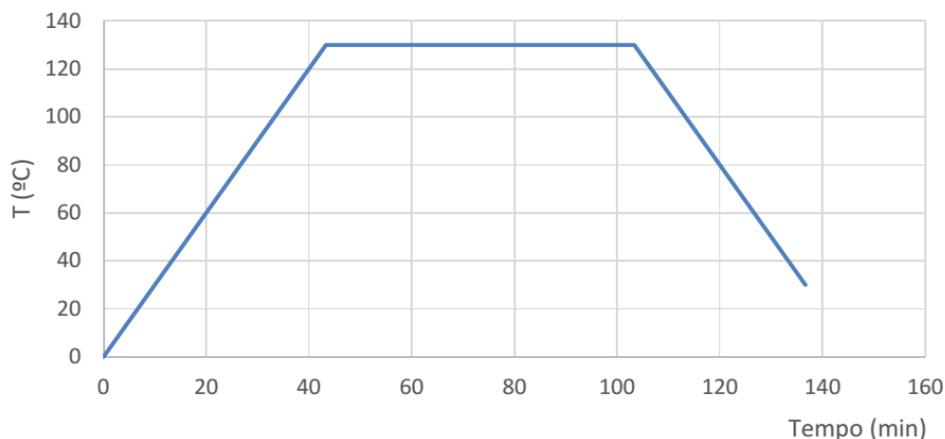


Figura 3.1. Ciclo de cura das placas de vidro/epóxico [7].

As placas de laminado foram depois seccionadas em provetes de secção retangular com 65 mm de comprimento e 10 mm de largura, Figura 3.2, com apoio de uma serra elétrica, Figura 3.3 a), utilizando um disco diamantado de modo a não causar o levantamento de fibras e, por consequência, a alteração das propriedades do material. A seguir os provetes foram retificados, com recurso a uma lixa de água *mesh* 320, Figura 3.3 b), de modo a tornar as suas faces laterais o mais paralelo possível, removendo também ocasionais rebarbas. A espessura das amostras não foi afetada, mantendo-se a espessura original de cerca de 3,4 mm.

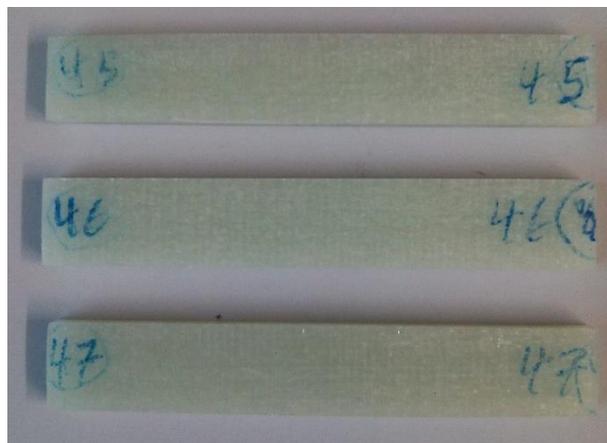


Figura 3.2. Provetes de vidro/epóxico.



(a)



(b)

Figura 3.3. (a) Serra de disco; (b) Lixa de água.

3.1.2. Argamassa de cimento

A argamassa e o betão são materiais usados na construção que têm como características permanecerem moldáveis durante algum tempo, antes de se tornarem sólidos e muito resistentes a esforços de compressão. A diferença entre a argamassa e betão está na composição: nas argamassas os elementos mais grossos são areias enquanto os betões, para além das areias ainda tem agregados (britas, com dimensões na ordem dos centímetros).

Se a ideia é estudar a degradação do ligante e não da areia ou do agregado, a não utilização de agregados não é relevante para as conclusões. Assim, neste estudo foi decidido utilizarem-se as argamassas, as quais simulam o comportamento do betão.

Visto o estudo ser realizado numa escala relativamente pequena, então a argamassa acabou por ser a solução natural, tendo sido utilizada areia com dimensão na ordem dos milímetros. Em linha com o que acontece no betão propriamente dito, também nesta simulação do mesmo foi adicionado plastificante, que tem como único objetivo fluidificar o betão tornando mais fácil a sua aplicação, reduzindo assim a quantidade de água necessária na mistura com efeitos positivos na resistência do betão, visto que quanto mais água tiver menor será a sua resistência [19].

Após a mistura solidificar, metade dos moldes com provetes são colocados dentro de um reservatório com água, para simular situações em que exista contacto direto com a água. A esta variante é dado o nome de argamassa de cimento imersa em água.

Os constituintes da mistura que compõem a argamassa são então a areia, o cimento, a água e o plastificante, nas quantidades e percentagens referidas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Constituintes da argamassa de cimento.

Constituinte	Quantidade [g]	%
Água	317	12,05
Areia	1650	62,72
Cimento	660	25,09
Plastificante	3,8	0,14

Os constituintes da argamassa de cimento foram pesados com apoio de uma balança, Figura 3.4 a), de modo a serem misturadas as quantidades corretas de cada um deles. Foram depois amassados manualmente, tendo para isso sido utilizado um balde e uma colher de trolha como dá a entender a Figura 3.4 b).



(a)



(b)

Figura 3.4. (a) Balança para pesagem dos constituintes; (b) Preparação da argamassa de cimento.

3.1.3. Argamassa de metacaulino

A argamassa metacaulino simula o betão de metacaulino, material ativado alcalinamente com metacaulino. Os betões ou argamassas de metacaulino são também designados por geopolímeros. O metacaulino é um pó, Figura 3.5 a), assim como o cimento. Apresenta-se com uma coloração esbranquiçada, obtido a partir dos caulinos, aluminossilicatos naturais, resultantes de alterações químicas das rochas feldspáticas e que parece ter alguns aspetos de comportamento melhores que o betão tradicional. É menos prejudicial a nível ambiental no que toca à emissão de dióxido de carbono aquando da sua produção, quando comparado com o cimento, sendo por estas razões um material a considerar na procura por ligantes alternativos ao cimento Portland. O metacaulino necessita de passar por fornos a altas temperaturas (700-800°C) mas ainda assim a temperaturas inferiores às necessárias na indústria do cimento (com valores superiores a 1500°C) [20].

Quanto à preparação desta solução alguns autores acreditam que a ordem ideal, e que leva a melhores resultados da mistura para pastas ativadas alcalinamente, é a que mistura primeiro os sólidos e depois o ativador, ou seja a combinação entre o silicato de sódio e o hidróxido de sódio [20].

A mistura da argamassa de metacaulino tem como constituintes, o próprio metacaulino, a areia, o silicato de sódio e o hidróxido de sódio, nas concentrações apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Constituintes da argamassa de metacaulino.

Constituinte	Quantidade [g]	%
Areia	1875	54,34
Hidróxido de sódio (NaOH)	300	8,70
Metacaulino	675	19,57
Silicato de sódio (NaSiO ₄)	600	17,39

Assim, como para a argamassa de cimento, também neste caso foram inicialmente pesados todos os constituintes da mistura de forma a garantir as quantidades corretas. Esta mistura foi conseguida com o apoio de uma misturadora, Figura 3.5 b), visto ser razoavelmente complicado, para este caso, obter uma mistura uniforme de outra forma.



(a)



(b)

Figura 3.5. (a) Metacaulino; (b) Misturadora para preparação da argamassa de metacaulino.

3.2. Imersão das amostras

Posteriormente à preparação das soluções as amostras foram colocadas em caixas preparadas para o efeito, Figura 3.6, e que garantiam o correto posicionamento das mesmas durante todo o processo de imersão e de cura.



Figura 3.6. Caixa para imersão das amostras.

Depois de posicionadas as amostras procedeu-se à imersão das mesmas, Figura 3.7, com as soluções preparadas anteriormente. Após a imersão todas as caixas foram vibradas, tal como acontece na aplicação destes materiais na construção. Isto é, foram colocadas numa plataforma que lhes proporciona um movimento vibratório durante alguns segundos, com a finalidade de melhorar o acondicionamento e compactação, e extrair possíveis bolhas de ar.



(a)



(b)

Figura 3.7. (a) Imersão em argamassa de cimento; (b) Imersão em argamassa de metacaulino.

Por fim, e antes de colocar as caixas em lugar apropriado para o processo de cura, as mesmas foram envolvidas em película plástica, Figura 3.8, com o objetivo de minimizar as trocas de água com o meio ambiente. Assim reduz-se a retração devido à desidratação e, conseqüentemente melhora-se esse mesmo processo de cura. Este aspeto é mais importante particularmente no geopolímero de metacaulino, uma vez que os materiais obtidos por ativação alcalina são muito sensíveis às condições de cura, que não sendo estas severas ou difíceis de garantir, devem assim ser respeitadas com bastante rigor [20].



Figura 3.8. Amostras envolvidas em película plástica.

De notar, como referido anteriormente, que durante o processo de cura, e assim que se atingiu a consistência necessária da solução, a película foi retirada. Algumas caixas contendo a solução argamassa de cimento foram colocadas dentro de um recipiente com água, tendo aí permanecido durante o resto do tempo de imersão. O processo de cura aconteceu à temperatura ambiente.

Quantos aos tempos de imersão, e depois de terem sido realizados ensaios preliminares de análise de perda da integridade estrutural deste tipo de materiais sujeito às soluções em estudo, concluiu-se que 30, 60 e 90 dias eram razoáveis e permitiriam resultados fiáveis.

Por último resta salientar que para todos os casos em estudo foram imersos 3 provetes por cada tempo, 30, 60 e 90 dias, mais 3 provetes de controlo, num total de 30 provetes.

3.3. Ensaaios realizados

No final de cada tempo de imersão, as amostras foram retiradas manualmente das argamassas e limpas de modo a remover pequenos pedaços. Depois do processo de limpeza todos os provetes foram alvos de registo de massa, tendo sido seguidamente submetidos a testes de rugosidade e ensaios de flexão em 3 pontos.

3.3.1. Massa

A massa de cada provete foi registada antes e após os mesmos serem imersos nas soluções.

A massa foi determinada na balança identificada na Figura 3.9, com capacidade de efetuar medições até à décima de micrograma.

Após o registo das massas, e aplicando a equação (3.1), onde m_r representa a variação de massa em percentagem, m_f a massa do provete depois de imerso na solução e m_i a massa do provete antes de imerso na solução, obtém-se a variação de massa sofrida por cada provete [18].

$$m_r[\%] = \frac{m_f - m_i}{m_i} \quad (3.1)$$



Figura 3.9. Balança.

3.3.2. Rugosidade

Assim, como em estudos semelhantes em compósito de vidro/epóxico também a rugosidade foi registada e comparada com os provetes de controlo.

Para tal medição foi utilizado o equipamento Mitutoyo, modelo SJ-500, representado na Figura 3.10. Foram efetuadas inúmeras medições em diversas zonas de todos provetes com o objetivo de obter parâmetros de rugosidade. Registaram-se os valores da rugosidade média, R_a , da rugosidade média quadrática, R_q , e da altura média pico a vale, R_z . [21].

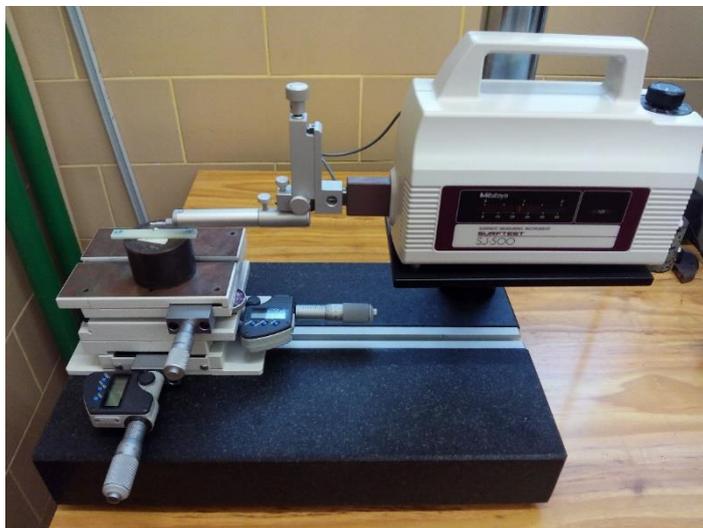


Figura 3.10. Rugosímetro.

3.3.3. Flexão em três pontos

Foram efetuados ensaios de flexão em três pontos em todos os provetes com vista à determinação da rigidez à flexão, E , e da tensão de flexão, σ .

Para a realização destes testes foi utilizado o equipamento SHIMADZU AG-10, Figura 3.11, equipado com uma célula de carga de 5kN. O *software* utilizado foi o TRAPEZIUM. Foi utilizada uma velocidade de avanço do travessão de 5 mm/min tendo o ensaio terminado assim que existia uma variação de carga superior a 10% da carga máxima suportada.

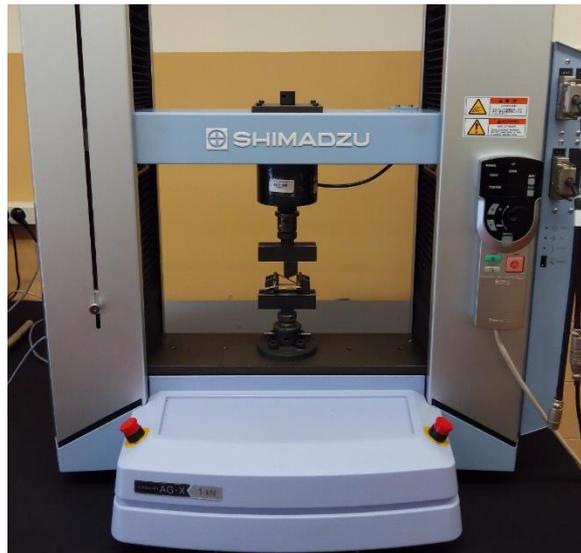
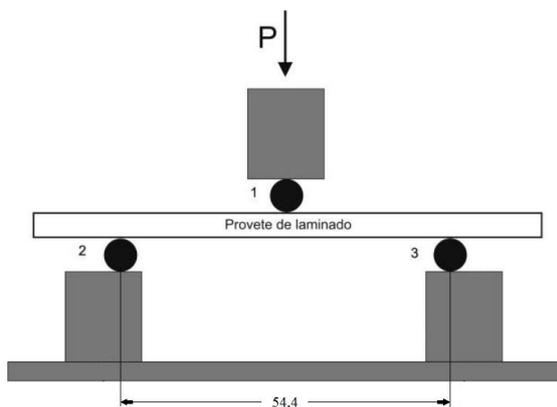
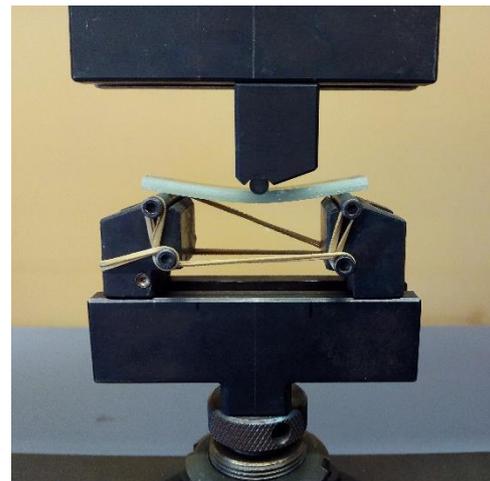


Figura 3.11. Máquina de ensaio de flexão em três pontos.

Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM D790-2. A distância entre os pontos de apoio, 2 e 3, foi assim de 54,4 mm, calculada com base na espessura dos provetes, ou seja, 3,40 mm, e sendo a carga P [N] aplicada em 1, como mostra o esquema da Figura 3.12 a). Na Figura 3.12 b) apresenta-se um provete a ser sujeito a flexão em três pontos.



(a)



(b)

Figura 3.12. (a) Esquema do ensaio de flexão em três pontos; (b) Provete em ensaio de flexão em três pontos.

A resistência à flexão foi determinada por meio da tensão de flexão na secção transversal, σ , utilizando o valor máximo da carga aplicada, P . Sendo que a tensão de flexão foi calculada através da equação (3.2) [18].

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (3.2)$$

Onde P é a carga máxima, como já referido, L a distância entre os pontos 2 e 3, ou seja os apoios da amostra, b a largura do provete e h a espessura do provete.

Foi também avaliada a rigidez à flexão, E , propriedade que permite compreender a capacidade de deformação dos materiais em regime elástico, com apoio da expressão (3.3) [18].

$$E = \frac{\Delta P \times L^3}{48\Delta u \times I} \quad (3.3)$$

Onde L volta a ser a distância entre apoios, I a momento de inércia da secção do provete, e ΔP e Δu a variação de força e a variação de deformação, respetivamente.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo são analisados e discutidos os resultados obtidos.

A análise é feita, dividindo os estudos pela ordem que foram realizados, ou seja, primeiro apresenta-se a variação da massa, seguidamente analisa-se a alteração da rugosidade e por fim as alterações sofridas pelas propriedades do material em termos de flexão em três pontos.

4.1. Massa

A variação de massa percentual foi obtida, sabendo-se a massa inicial de cada provete e a massa após o respetivo tempo de imersão, aplicando a equação (3.1). Essa variação, por solução e tempo de imersão, é apresentada na Figura 4.1.

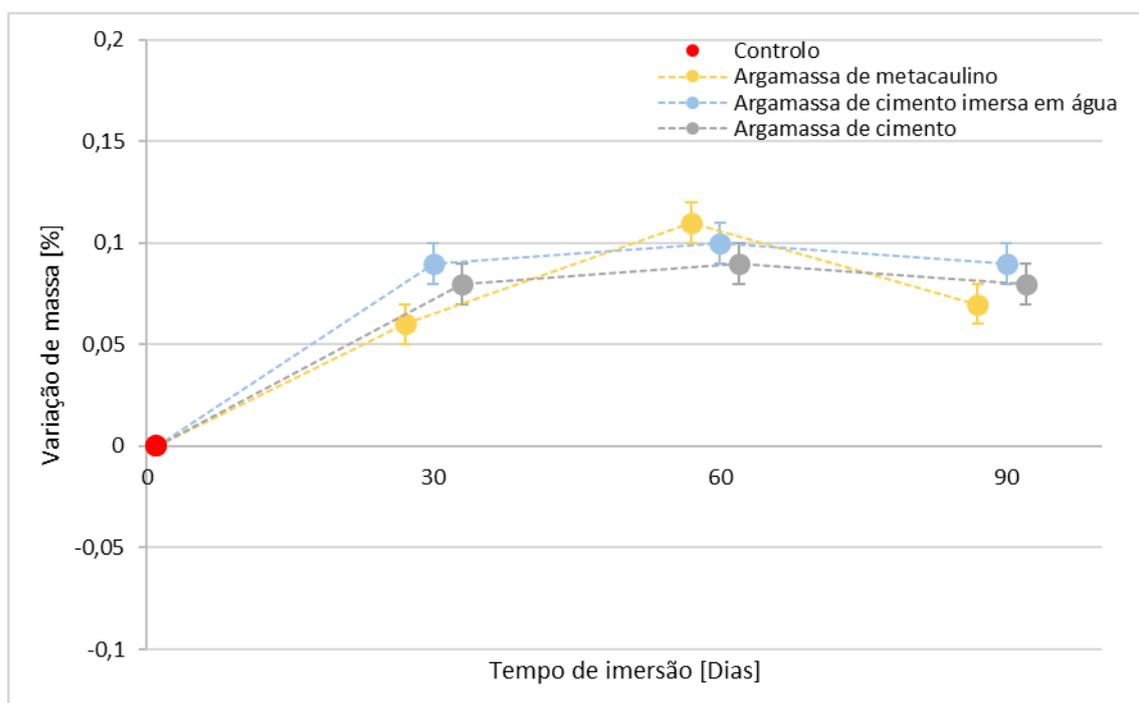


Figura 4.1. Variação de massa.

Em todos os casos se verificou um aumento da massa, tal como em [18], mas em percentagens que não se consideram significativas. Este aumento pode ser explicado com o preenchimento, por parte das soluções, de pequenos espaços vazios, isto é, eventuais porosidades existentes na matriz dos provetes.

A diferença de massa é mais expressiva para o caso de 60 dias com imersão em argamassa de metacaulino. A diferença mais significativa em qualquer das soluções acontece para 60 dias de imersão, sendo que se verifica uma diminuição, em todos os casos, quando se considera os 90 dias de imersão.

A redução de massa que se segue após esse pico poderá estar relacionada com perda de material motivada pela possível destruição da matriz com o prolongar do período de imersão, situação que também se verifica em [9].

Como referido as variações na massa são demasiado baixas, podendo ser consideradas na gama de erro do processo. Estas podem ter sido induzidas por diferenças inevitáveis no processo de limpeza dos provetes, após imersão, antes da medição da massa.

4.2. Rugosidade

4.2.1. Argamassa de Metacaulino

Os valores obtidos para os parâmetros de rugosidade medidos, nos provetes imersos em argamassa de metacaulino são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Resultados do ensaio de rugosidade em termos médios para argamassa de metacaulino.

Valores estatísticos [μm]	Amostras/Tempo de exposição			
	Controlo	Argamassa de metacaulino		
		30 dias	60 dias	90 dias
R_a	2,93±0,10	2,20±0,08	2,33±0,19	2,35±0,14
R_q	4,69±0,32	2,81±0,07	3,63±0,45	4,26±0,32
R_z	20,44±2,05	11,28±0,93	15,11±1,71	17,49±2,29

Observando a Tabela 4.1 percebe-se que a imersão dos provetes em argamassa de metacaulino determina uma redução dos parâmetros medidos para todos os tempos de imersão, quando comparados com o provete de controlo.

A rugosidade média, R_a , apresenta o seu menor valor para imersão durante 30 dias. Entre os 30 e os 60 dias de imersão verifica-se um aumento na ordem dos 6 %. De 60 dias de imersão para 90 dias de imersão a diferença é apenas de 1%, valor residual e que não deve ser considerado na análise dos resultados.

Conclui-se que a rugosidade tende a estabilizar com o prolongar do tempo de imersão.

4.2.2. Argamassa de cimento imersa em água

Na Tabela 4.2 estão expostos os resultados obtidos para os parâmetros de rugosidade medidos nos provetes que foram imersos em argamassa de cimento e que foram ainda imersos em água.

Tabela 4.2. Resultados do ensaio de rugosidade em termos médios para argamassa de cimento imersa em água.

Valores estatísticos [μm]	Amostras/Tempo de exposição			
	Argamassa de cimento imersa em água			
	Controlo	30 dias	60 dias	90 dias
R_a	2,93 \pm 0,10	2,20 \pm 0,11	2,43 \pm 0,19	2,65 \pm 0,18
R_q	4,69 \pm 0,32	2,97 \pm 0,11	3,70 \pm 0,65	3,50 \pm 0,25
R_z	20,44 \pm 2,05	13,44 \pm 1,68	13,88 \pm 1,80	13,75 \pm 2,09

A Tabela 4.2 mostra que a imersão dos provetes em argamassa de cimento imersa em água tende a diminuir a rugosidade de um modo geral.

Aos 30 dias de imersão a rugosidade média, R_a , atinge o seu menor valor. Entre os 30 dias de imersão e os 60 dias de imersão regista-se um aumento na ordem dos 10 %. Dos 60 dias de imersão aos 90 dias de imersão volta a registar-se um aumento de 10%.

É possível perceber, com estes resultados, a existência de uma possível desintegração da matriz dos provetes ao longo do tempo de imersão com tendência a manter-se o que poderá ser resultado da presença e renovação da água.

4.2.3. Argamassa de cimento

A Tabela 4.3 apresenta os valores experimentais dos parâmetros de rugosidade medidos para o caso de imersão dos provetes em argamassa de cimento.

Tabela 4.3. Resultados do ensaio de rugosidade em termos médios para argamassa de cimento.

Valores estatísticos [μm]	Amostras/Tempo de exposição			
	Argamassa de cimento			
	Controlo	30 dias	60 dias	90 dias
R_a	2,93 \pm 0,10	2,23 \pm 0,09	2,44 \pm 0,06	2,56 \pm 0,10
R_q	4,69 \pm 0,32	3,44 \pm 0,25	2,94 \pm 0,23	3,92 \pm 0,45
R_z	20,44 \pm 2,05	14,99 \pm 1,89	12,75 \pm 0,38	17,32 \pm 2,13

A análise da Tabela 4.3 permite concluir que a imersão em argamassa de cimento provoca, nos provetes, uma diminuição da totalidade dos parâmetros de rugosidade mensurados.

O valor mais reduzido da rugosidade média é registado para o primeiro período de imersão, ou seja 30 dias. Entre os 30 dias de imersão e os 60 dias de imersão regista-se um aumento na ordem dos 10 %. Dos 60 dias de imersão para o último período, 90 dias, o aumento reduz-se para 5%.

Os valores obtidos indicam um aumento da rugosidade média a partir do primeiro período de imersão, mas que se torna menos expressivo com o prolongar do tempo.

4.2.4. Comparação de resultados rugosidade

O parâmetro escolhido para a comparação dos resultados obtidos para a rugosidade dos provetes foi o da rugosidade média, R_a , parâmetro mais utilizado por parte dos investigadores da área para a caracterização da rugosidade das superfícies. Este parâmetro traduz a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média. A Figura 4.2 mostra as

variações na rugosidade média dos provetes submetidos às soluções em análise durante os diversos tempos de imersão.

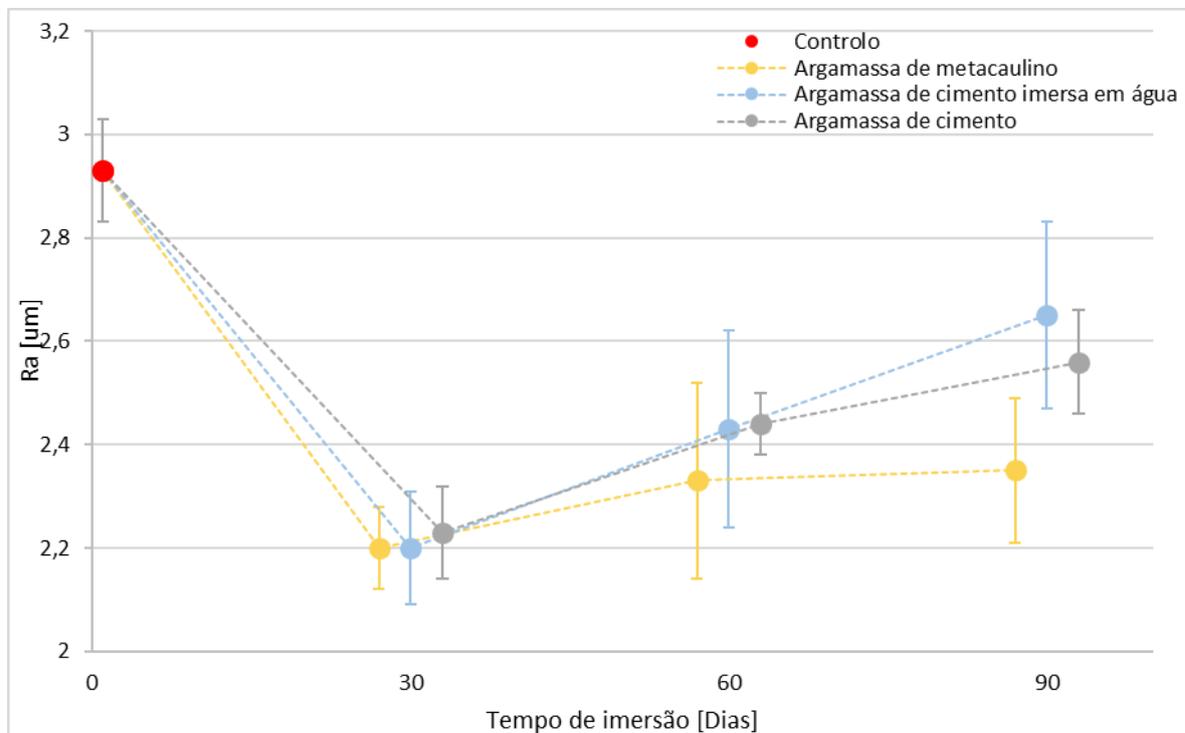


Figura 4.2. Variação de rugosidade média, R_a .

Por análise da Figura 4.2 verifica-se uma redução da rugosidade média na casa dos 24% entre o provete de controlo e os provetes sujeitos a de 30 dias de imersão em qualquer uma das soluções. A principal explicação desta redução inicial da rugosidade poderá estar relacionada com o já referido preenchimento, por parte das soluções, das porosidades existentes na matriz dos provetes. Tal acontecimento poderá tornar a superfície do provete mais uniforme, atenuando possíveis microfissuras existentes inicialmente.

O prolongar do período de imersão mostra que a rugosidade média atinge o seu mínimo no primeiro tempo de imersão, existindo a partir daí um contínuo aumento, para todos os casos, até ao último período de imersão.

A degradação da matriz mostra-se mais ativa, e não dá sinais de abrandamento para provetes sujeitos a argamassa de cimento imersa em água, isto é, após a já referida redução inicial na ordem dos 24%, no último período de imersão essa redução é apenas de 9% para o provete de controlo, o que estará motivado por dois fatores. Primeiro pelo facto

do ambiente ser altamente alcalino [22], sendo este tipo de ambiente bastante corrosivos para compósito de vidro/epóxico, como concluído em [18], e segundo pela presença de água, que também se mostra como prejudicial para a estrutura do compósito de vidro/epóxico, como indicam os estudos [16] e [17].

Em sentido contrário, isto é, em que o aumento da rugosidade, a partir do primeiro período de imersão, não é tão expressivo, estão as soluções de argamassa de cimento e argamassa de metacaulino. Apesar serem também ambientes altamente alcalinos e de para ambos os casos se verificar um aumento da rugosidade média a partir dos 30 dias de imersão, este aumento tende a reduzir-se. Para a argamassa de cimento, a rugosidade média ao fim de 90 dias de imersão toma valores inferiores em 13% ao provete de controlo. Já os provetes que foram imersos em argamassa de metacaulino, aos 90 dias de imersão registam uma rugosidade média inferior à do provete de controlo em, ainda, 20%.

É possível, então, concluir-se que apesar de o valor da rugosidade média para os provetes imersos ser sempre inferior ao provete de teste nos tempos analisados, e mesmo sofrendo inicialmente uma redução significativa, o seu valor aumenta consecutivamente com o tempo de imersão, da mesma forma que em [18]. A argamassa de cimento imersa em água sobressai como a solução que mais afeta a rugosidade do compósito em estudo o que faz com que a presença de água seja considerado um fator preponderante para alteração da rugosidade.

4.3. Flexão em 3 pontos

O ensaio de flexão em 3 pontos teve como objetivo perceber a variação na integridade estrutural do material em estudo, sujeito a degradação exterior, pela análise de valores referentes à tensão máxima de flexão e rigidez à flexão.

Para o cálculo da tensão máxima de flexão recorreu-se à equação (3.2). A rigidez à flexão foi determinada com o apoio da equação (3.3), onde a razão entre ΔP e Δu corresponde ao declive da parte linear da curva Força/Deslocamento. Na Figura 4.3 está distinguida, a traço contínuo, a parte da curva Força/Deslocamento considerada como linear. A razão ΔP e Δu tomará para este caso, ou seja, para o provete de controlo o valor de 571,37, valor retirado da equação da reta.

Para o provete de controlo foi determinada uma tensão máxima de flexão de aproximadamente 887 MPa, tendo em consideração a força máxima e a área de secção do provete.

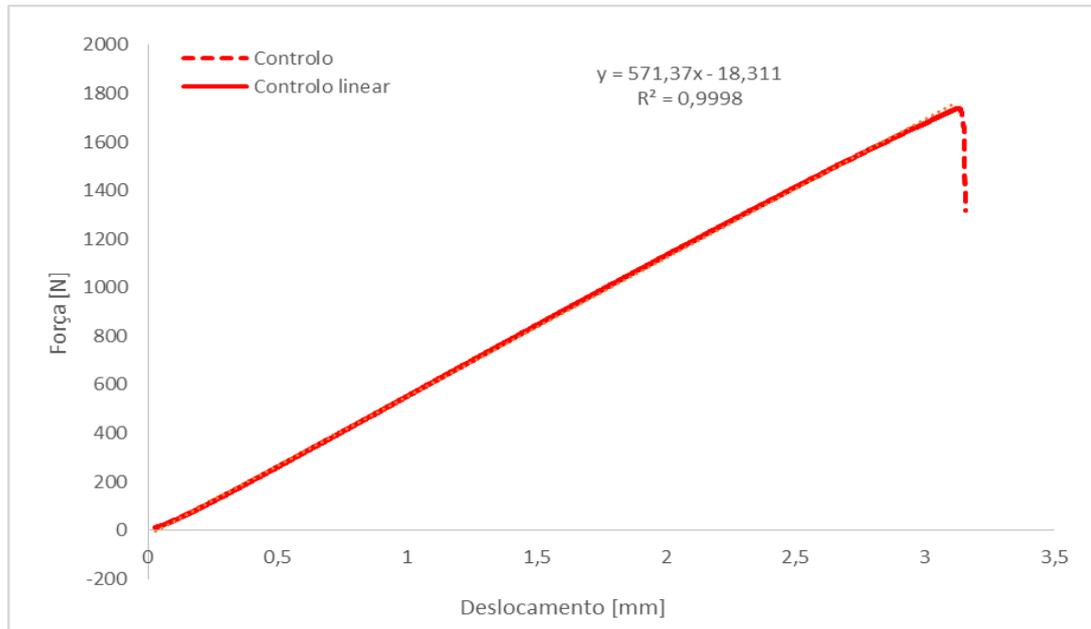


Figura 4.3. Curva força-deslocamento para provete de controlo.

4.3.1. Argamassa de metacaulino

Os valores médios e desvios padrão da tensão máxima de flexão e da rigidez à flexão, resultantes do ensaio de flexão em 3 pontos em provetes imersos em argamassa de metacaulino durante os períodos de 30, 60 e 90 dias são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Tensão máxima de flexão e Rigidez à flexão, em termos médios para argamassa de metacaulino.

Valores estatísticos [μm]	Amostras/Tempo de exposição			
	Argamassa de metacaulino			
	Controlo	30 dias	60 dias	90 dias
Tensão máxima de flexão [MPa]	887,2 \pm 0,9	882,5 \pm 43,1	860,6 \pm 14,8	836,3 \pm 28,8
Rigidez à flexão [GPa]	42,8 \pm 0,4	43,6 \pm 0,6	43,1 \pm 0,2	43,3 \pm 0,0

A solução argamassa de metacaulino provoca uma diminuição da tensão máxima de flexão, que se acentua com o prolongar do tempo de imersão. O decréscimo inicialmente registado para a tensão máxima de flexão é praticamente nulo e está enquadrado no desvio padrão, não sendo, por isso, significativo. A diminuição da tensão máxima de flexão entre os 30 dias de imersão e os 60 dias de imersão aproxima-se dos 2,5%, valor ligeiramente inferior ao valor registado entre os 60 e os 90 dias que ronda os 3%.

Poderá dizer-se em conclusão que a argamassa de metacaulino provoca uma diminuição da tensão máxima de flexão, diminuição essa que aumenta ligeiramente com o tempo de imersão, mas em valores não considerados significativos.

Ao nível do módulo de rigidez é registado um ligeiro aumento em comparação com o provete de controlo, mas perfeitamente enquadrado no desvio padrão e por isso sem significado prático.

4.3.2. Argamassa de cimento imersa em água

Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados médios e os desvios padrão obtidos com o ensaio de flexão em três pontos, para os provetes de controlo e para o caso de provetes imersos em solução argamassa de cimento imersa em água durante os referidos períodos de tempo.

Tabela 4.5. Tensão máxima de flexão e Rigidez à flexão, em termos médios para argamassa de cimento imersa em água.

Valores estatísticos [μm]	Amostras/Tempo de exposição			
	Controlo	Argamassa de cimento imersa em água		
		30 dias	60 dias	90 dias
Tensão máxima de flexão [MPa]	887,2 \pm 0,9	869,3 \pm 12,9	830,5 \pm 35,6	785,6 \pm 14,9
Rigidez à flexão [GPa]	42,8 \pm 0,4	43,3 \pm 0,3	43,4 \pm 0,6	43,5 \pm 0,4

Da comparação dos valores da tensão máxima de flexão entre o provete de controlo e os provetes sujeitos a argamassa de cimento imersa em água conclui-se que inicialmente, isto é, aos 30 dias de imersão, existe uma diminuição na ordem de 2%. Entre

os 30 dias e os 60 dias de imersão a diminuição aproxima-se de 4,5% e entre os 60 e os 90 dias a diminuição é cerca de 5,5%.

Constata-se, com base nos resultados obtidos, que a argamassa de cimento imersa em água provoca uma diminuição da tensão máxima de flexão que tem um aumento progressivo com o prolongar do tempo de imersão.

Em termos de módulo de rigidez, denota-se um ligeiro aumento do provete de controlo para os provetes imersos durante os demais períodos de tempo, mas do mesmo modo que no ponto anterior, este aumento não é considerado significativo.

4.3.3. Argamassa de cimento

Os valores médios da tensão máxima de flexão e do módulo de rigidez, assim como os respetivos desvios padrão estão registados na Tabela 4.6

Tabela 4.6. Tensão máxima de flexão e Rigidez à flexão, em termos médios para argamassa de cimento.

Valores estatísticos [μm]	Amostras/Tempo de exposição			
	Controlo	Argamassa de cimento		
		30 dias	60 dias	90 dias
Tensão máxima de flexão [MPa]	887,2 \pm 0,9	865,0 \pm 10,8	860,5 \pm 0,6	858,3 \pm 13,9
Rigidez à flexão [GPa]	42,8 \pm 0,4	43,5 \pm 0,3	43,0 \pm 0,8	43,4 \pm 0,5

Os valores mostram que a imersão em solução argamassa de cimento provoca uma redução da tensão máxima de flexão na ordem dos 2,5% ao fim de 30 dias. Entre os 30 e os 60 dias de imersão a redução é apenas 0,5%. Dos 60 dias de imersão até aos 90 dias de imersão a redução é inferior a 0,5%. Os valores da evolução da tensão para este caso não são, no geral, significativos.

O valor do módulo de rigidez, pode ser considerado constante para todas as situações em estudo, e por isso não tem significado.

4.3.4. Comparação de resultados de flexão em 3 pontos

A perda de integridade estrutural dos provetes em função do tempo de imersão, avaliada pelo ensaio de flexão em três pontos, está representada na Figura 4.4 por meio da variação da tensão máxima de flexão, entre tempos e soluções.

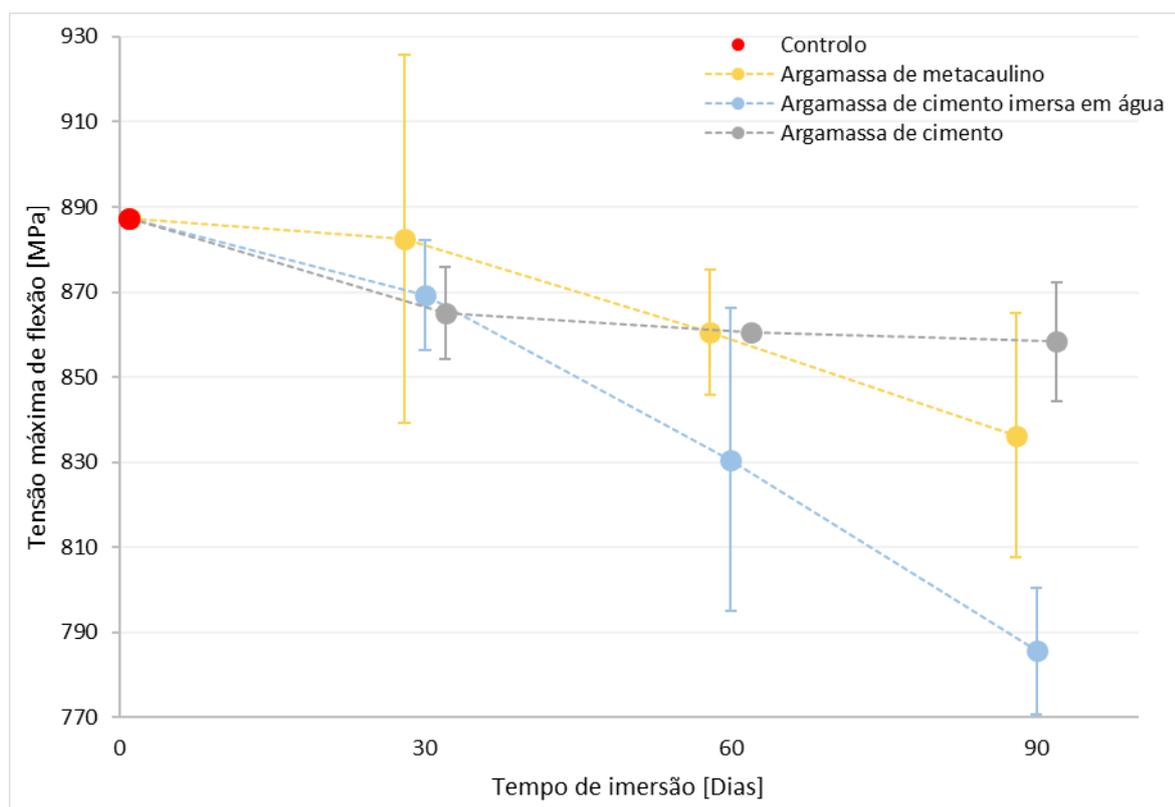


Figura 4.4. Variação da tensão máxima de flexão.

Da Figura 4.4, constata-se que a solução que promove uma maior redução na tensão máxima de flexão dos provetes é a argamassa de cimento imersa água, essa perda é tanto maior quanto mais longo o período de imersão, indo desde os 2% aos 30 dias, valor enquadrado no desvio padrão e por isso não significativo, até uma redução na casa dos 11% da tensão máxima de flexão aos 90 dias de imersão em comparação com o provete de controlo. Este abaixamento pode ser explicado pelo comportamento de perda de integridade que o vidro/epóxico apresenta quando sujeito a ambientes alcalinos, [22], da mesma forma que o concluído em [16], [18], agravada pela presença contínua de água (renovada em intervalos de 10 dias), também em linha com [17] e [16], onde se comprova uma redução significativa da resistência à flexão com a exposição à água doce. Em Amaro

et al. (2013) [18] são referidos estudos que defendem o ataque da matriz e do reforço pelo efeito de difusão provocado pela água, e a influência que isso tem na interação entre a matriz e o reforço, ou seja, na interface, motivando uma diminuição da capacidade de transmissão de carga da matriz para o reforço, e consecutivamente a diminuição da resistência a tensões por parte do compósito.

Quanto à argamassa de metacaulino, esta apresenta uma redução da tensão máxima de flexão intermédia quando analisado o conjunto das soluções em causa. Como já referido a variação na tensão máxima de flexão para 30 dias de imersão não é significativa. Aos 60 dias é registada uma redução de 3% e no último tempo de imersão essa redução aproxima-se dos 6%. O facto de o metacaulino apresentar uma alcalinidade elevada e a já referida sensibilidade do vidro/epóxico a ambientes alcalinos de acordo com [16] e [18], poderá estar na base desta diminuição, que acaba por não ser tão significativa como no caso da argamassa de cimento imersa em água. No entanto, é de realçar que todas estas variações são baixas o que pode levantar a dúvida se, para uma melhor avaliação do efeito da argamassa de metacaulino na integridade estrutural dos provetes em análise, não se devia considerar tempos de imersão superiores, assim como para os restantes casos estudados.

Por último, a argamassa de cimento apresenta-se como a solução que menos faz variar a tensão de flexão máxima. Inicialmente a imersão de 30 dias, até é a solução que mais reduz a tensão de flexão, 2,5%, mas com o aumento do tempo de imersão essa redução tende a estabilizar sendo pouco superior a 3% aos 90 dias de imersão. Apesar de ser um ambiente também alcalino, a argamassa de cimento acaba por si só não ser tão prejudicial quanto a mesma com presença de água, para além daquela que é necessária para a sua produção, e quanto a argamassa de metacaulino que possui hidróxido de sódio que ataca o vidro/epóxico, [16], [18]. Assim, a presença de água é tida como um fator de peso na redução da tensão máxima flexão, sendo que na sua ausência essa redução é bastante menor e tende a estabilizar.

A perda de integridade estrutural dos provetes em função do tempo de imersão, avaliada também pelo ensaio de flexão em três pontos, está representada por meio da rigidez à flexão na Figura 4.5.

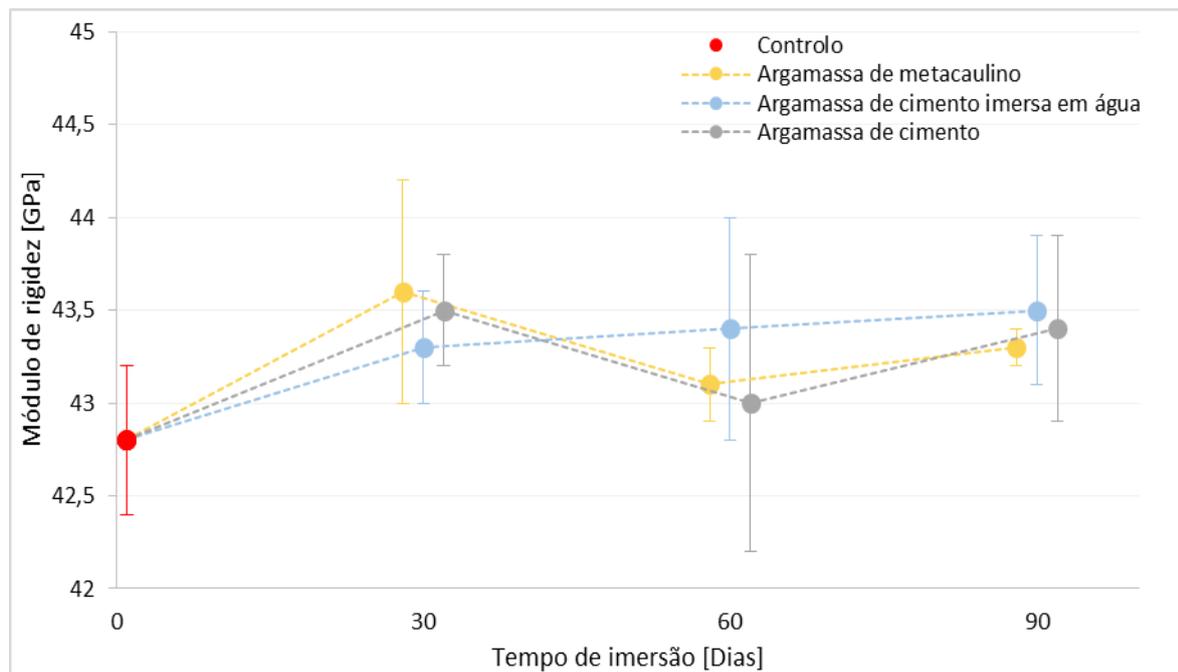


Figura 4.5. Variação da rigidez à flexão.

A avaliação da integridade estrutural por meio da variação da rigidez à flexão mostra um ligeiro aumento dos valores relativos aos provetes imersos nas demais soluções comparativamente com o provete de controlo. Apesar do aumento registado não é possível delinear uma tendência. A variação registada está compreendida entre 1 e 2%, valor que está contido no desvio padrão, não sendo por isso conclusiva.

Conclui-se então que a argamassa de cimento com imersão em água é a solução que mais prejudica o compósito de vidro/epóxico em termos de resistência mecânica, seguida da solução argamassa de metacaulino e deixando argamassa de cimento como a solução que menos altera a integridade estrutural do compósito.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões que se consideram mais relevantes do estudo realizado.

Serão ainda apresentadas sugestões para trabalhos a executar futuramente.

5.1. Conclusões

Assim, as conclusões mais relevantes deste trabalho podem ser resumidas da seguinte forma:

1. A massa não apresenta variação significativa com a imersão nas soluções, nem com o tempo de imersão.
2. A exposição a ambientes agressivos afeta a integridade estrutural do compósito de vidro/epóxico.
3. O tempo de exposição aos ambientes agressivos foi decisivo na degradação das propriedades mecânicas, que foram avaliadas por meio do ensaio de flexão em três pontos, com maior influência na tensão máxima de flexão.
4. A evolução da rugosidade dá a entender a existência de uma desintegração da matriz de epóxico após imersão nas soluções degradantes.
5. A exposição à solução de argamassa de cimento com imersão em água mostrou-se ser a mais agressiva para o compósito de vidro/epóxico, provocando uma redução mais acentuada na tensão máxima de flexão.
6. A solução de argamassa de cimento é a que provoca menor perda de integridade estrutural no compósito em estudo.
7. A rigidez à flexão apresenta um ligeiro aumento, mas sem significado para os tempos de imersão estudados.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

O estudo realizado colocou em evidência aspectos que merecem ser tidos em consideração em abordagens futuras:

1. Aumentar os tempos de imersão consideravelmente, para melhor perceber o efeito destas soluções a longo prazo.
2. Efetuar estudos com um maior número de provetes de modo a mitigar erros de medida, diminuindo o desvio padrão e melhorando as conclusões obtidas.
3. Analisar compósitos de vidro/epóxico com maior espessura, de modo a perceber a influência da espessura na alteração do seu comportamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Ventura, “Os Compósitos ea sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas” *Ciência Tecnol. dos Mater.*, vol. 21, pp. 10–19, 2009.
- [2] W. D. Callister, *Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução*, 7ª Ed. 2007.
- [3] L. F. Pereira Juvandes, “Materiais compósitos reforçados com fibras, frp” Tese de Mestrado, FEUP, 2002.
- [4] D. Dias, “Comportamento ao Impacto a baixa velocidade de laminados de epóxico / fibra de vidro, com camadas de cortiça” Tese de Mestrado, FCTUC, 2009.
- [5] N. Veiga, “Comportamento à fratura em modo I de compósitos de matriz polimérica , reforçados com fibras de juta”, Tese de Mestrado, FEUP 2014.
- [6] J. Santos, “Compósitos laminados têxteis de vidro e carbono em matriz epóxi reforçada com micro e nano sílica”, Tese de Mestrado, UFSJ, 2013.
- [7] J. Costa, “O efeito abrasivo na resistência ao impacto de materiais compósitos”, Tese de Mestrado, FCTUC, 2014.
- [8] T. Nogueira, “Estudo da influência do efeito do meio ambiente na resistência ao impacto de laminados de vidro epóxico”, Tese de Mestrado, FCTUC, 2013.
- [9] R. Reis, “Avaliação da influência do meio ambiente na integridade estrutural de placas de vidro epóxico submetidas a impacto”, Tese de Mestrado, FCTUC, 2013.
- [10] A. Campos, “Estudo dos Efeitos Ambientais no Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos”, Tese de Mestrado, UBI, 2012.
- [11] V. Silva, “Avaliação Experimental dos Deslocamentos e das Cargas Críticas de ‘Bending-Buckling’ em Placas Compósitas”, Tese de Mestrado, FCTUC, 2012.
- [12] G. Elísio, “Estudo da degradação das propriedades mecânicas de materiais compósitos pelo efeito da esterilização por autoclave”, Tese de Mestrado, UBI, 2013.
- [13] S. Jesus, “A sustentabilidade das fibras sintéticas”, Tese de Mestrado, FAUL, 2011.
- [14] H. Silva, “Comportamento Mecânico de compósitos de fibra de vidro/epóxico

- nonoreforçados”, Tese de Mestrado, FCTUC, 2014.
- [15] M. Geraldo, C. Mirabel, S. Paulo, and S. Mayer, “Influência do Condicionamento Ambiental na Resistência à Tração de Compósitos de Carbono / Epóxi Reparados,” vol. 13, pp. 147–153, 2003.
- [16] R. Griffiths and A. Ball, “An assessment of the properties and degradation behaviour of glass-fibre-reinforced polyester polymer concrete,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 60, no. 14, pp. 2747–2753, 2000.
- [17] G. Huang and H. Sun, “Effect of water absorption on the mechanical properties of glass/polyester composites,” *Mater. Des.*, vol. 28, no. 5, pp. 1647–1650, 2007.
- [18] A. M. Amaro, P. N. B. Reis, M. a. Neto, and C. Louro, “Effects of alkaline and acid solutions on glass/epoxy composites,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 98, no. 4, pp. 853–862, 2013.
- [19] L. Almeida, “Concreto”, UEC, 2002.
- [20] M. Oliveira, “Caracterização do Comportamento Mecânico de Sistemas Ligantes Obtidos por Activação Alcalina ; Evolução Temporal e Composição de Activador”, Tese de Mestrado, FCTUC, 2014.
- [21] M. Esteves, “Melhoria da resistência ao desgaste e da eficiência de correntes de transmissão para bicicleta por aplicação de revestimentos pvd”, Tese de Mestrado, FCTUC, 2011.
- [22] M. P. Paschoalino, A. A. Da Silva Alfaya, M. J. Santos Yabe, and S. M. Nobre Gimenez, “Incorporação de CuSO₄ residual em argamassa, como método de disposição final,” *Quim. Nova*, vol. 29, no. 4, pp. 699–703, 2006.

