



• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Efeito das soluções cimentícias na resposta ao impacto longitudinal e transversal de laminados vidro/epóxico

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

Effect of cementitious solutions in response to lateral and longitudinal impact of laminated glass/epoxy

Autor

André Filipe Simões Leonardo

Orientadores

Professora Doutora Ana Paula Betencourt Martins Amaro

Professora Doutora Maria Isabel Moita Pinto

Júri

Presidente Professora Doutora Maria Augusta Neto
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

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

Orientador Professora Doutora Maria Isabel Moita Pinto
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Julho, 2016

“Se a minha mente pode conceber e o meu coração pode acreditar, então eu posso alcançar.”

Muhammad Ali

Ao meu avô.

Agradecimentos

Sem o apoio e motivação das pessoas que me rodearam, a realização desta dissertação não seria possível. Como tal, começo por agradecer às minhas orientadoras, Professora Doutora Ana Paula Betencourt Martins Amaro e Professora Doutora Maria Isabel Moita Pinto, pela sua disponibilidade e motivação mesmo durante as alturas mais frustrantes deste trabalho.

O meu agradecimento ao Sr. Fernando Bernardes das oficinas do DEM pelo auxílio na preparação dos provetes de ensaio e na resolução de problemas que tenham surgido no decorrer deste estudo.

Agradeço aos meus amigos e colegas do laboratório de Mecânica Estrutural por toda a ajuda e apoio ao longo deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos por toda a ajuda e bom humor que ao longo dos anos me tem mantido animado e motivado para poder chegar mais longe.

Um agradecimento especial à minha amiga Tatiana Moura por, mesmo à distância, estar sempre disponível para me ajudar e apoiar.

Por fim, agradeço à minha família, em especial aos meus pais, ao meu irmão e à minha tia, por todo o apoio e por todas as oportunidades que me proporcionaram.

Resumo

A presente dissertação tem como objetivo estudar a integridade estrutural de compósitos laminados vidro/epóxico, sujeitos à exposição de soluções cimentícias durante períodos de imersão de diferentes durações.

Para a realização deste estudo utilizaram-se provetes de laminados vidro/epóxico expostos a três soluções: argamassa de cimento, argamassa de cimento em água e argamassa de metacaulino. Após a sua remoção, analisou-se a variação das propriedades mecânicas destes provetes através de medições da sua massa, rugosidade e dureza, bem como por realização de ensaios de flexão em três pontos e de impacto longitudinal e transversal.

Ao serem comparados os resultados das medições e dos ensaios realizados entre as diferentes soluções e períodos de imersão, concluiu-se que a presença de água na argamassa de cimento aumenta o efeito desta solução na degradação dos provetes e que a argamassa de metacaulino é a solução que mais prejudica o desempenho mecânico dos laminados em estudo.

Palavras-chave: Laminados Vidro/epóxico, Soluções Cimentícias, Ensaio de impacto longitudinal, Ensaio de impacto transversal, Flexão em três pontos.

Abstract

This dissertation aims to study the structural integrity of composite laminated glass/epoxy, subjected to exposure of cement solutions for different time periods of immersion.

For this study, laminated glass/epoxy specimens were immersed in three solutions: cement mortar, cement mortar in water and metakaolin mortar. After removal, the variation in the characteristics and mechanical properties of these specimens were analyzed by measuring the mass, surface roughness and hardness, and by performing longitudinal and transversal impact tests and Three-point bending tests.

By comparing the results of measurements and the results of the tests on different solutions and immersion periods, it was concluded that the water of the cement mortar in water enhances the effect of this solution in the degradation of the specimens and that the metakaolin mortar is the solution that most affects the mechanical performance of laminates under study.

Keywords Laminated Glass/epoxy, Cement solution, Longitudinal impact test, Transversal impact test, Three point bending.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTADO DE ARTE.....	3
2.1. Materiais compósitos	3
2.1.1. Matriz	5
2.1.2. Reforço	5
2.2. Impacto em materiais compósitos.....	7
2.3. Degradação de materiais compósitos.....	8
2.3.1. Efeito de ambientes corrosivos em materiais compósitos.....	8
2.3.2. Efeito da humidade em materiais compósitos	9
2.4. Manufatura de materiais compósitos	10
2.4.1. Processo de deposição manual	11
2.4.2. Processo de deposição por spray	12
2.4.3. Processo de moldação por autoclave	12
2.4.1. Processo de moldação por injeção.....	13
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	15
3.1. Materiais e soluções.....	15
3.1.1. Laminados de vidro/epóxico	15
3.1.2. Argamassa de cimento.....	18
3.1.3. Argamassa de metacaulino	19
3.2. Preparação dos ensaios a realizar.....	20
3.2.1. Provetes de ensaio	20
3.2.2. Imersão dos provetes	24
3.3. Ensaios realizados.....	26
3.3.1. Medição da massa.....	26
3.3.2. Medição da rugosidade.....	27
3.3.3. Medição da dureza.....	27
3.3.4. Ensaio de impacto longitudinal	28
3.3.5. Ensaio de impacto transversal	29
3.3.6. Ensaio de flexão em três pontos	31
3.3.7. Morfologia do dano	32
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	33
4.1. Variação de massa	33
4.2. Variação da rugosidade.....	34
4.3. Variação da dureza.....	38

4.4.	Ensaio de impacto longitudinal	41
4.5.	Ensaio de impacto transversal	44
4.6.	Ensaio de flexão em três pontos	49
5.	CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	55
5.1.	Conclusões.....	55
5.2.	Sugestões para trabalhos futuros	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Evolução da importância relativa dos materiais com o tempo [1].....	4
Figura 2.2. Classificação de materiais compósitos quanto ao seu reforço, adaptado de [2].	6
Figura 2.3. Modos de falha por delaminação.	8
Figura 2.4. Esquema de seleção de processos de fabrico de materiais compósitos de matriz polimérica, adaptado de [5].	10
Figura 2.5. Ilustração representativa do processo de deposição manual, adaptado de [18].	11
Figura 2.6. Ilustração representativa do processo de deposição por spray, adaptado de [18].	12
Figura 2.7. Exemplo de um autoclave [18].	13
Figura 2.8. Ilustração representativa do processo de injeção de materiais compósitos, adaptado de [19].....	13
Figura 3.1. Sistema de coordenadas da lâmina [8].	17
Figura 3.2. Ciclo de cura das placas de laminados de vidro/epóxico, adaptado de [8].	18
Figura 3.3. Misturadora utilizada na preparação da argamassa.	19
Figura 3.4. Distribuição dos provetes de ensaio para a solução de argamassa de cimento.	21
Figura 3.5. Esquema representativo da geometria de um provete tipo 2, adaptado de [26].	22
Figura 3.6. Equipamento de CNC utilizado na maquinação dos provetes do ensaio de impacto longitudinal.	22
Figura 3.7. Martelo de impacto e base de suporte em situação de impacto durante um ensaio.	23
Figura 3.8. (a) Serra de disco elétrica; (b) Lixa de água.	23
Figura 3.9. Componentes da caixa de imersão	24
Figura 3.10. (a) Posicionamento dos provetes na caixa de imersão; (b) Caixa de imersão no final do processo de imersão.	25
Figura 3.11. (a) Caixas de argamassa de cimento em água; (b) Remoção dos provetes.	26
Figura 3.12. Equipamento utilizado para a medição da dureza dos provetes.	28
Figura 3.13. Acessórios utilizados no ensaio de impacto longitudinal: (a) Base de apoio; (b) Martelo de impacto.	28
Figura 3.14. (a) Fixação do provete à peça de impacto no equipamento guia; (b) Equipamento preparado para a realização de um ensaio.	29
Figura 3.15. (a) Base de apoio; (b) Martelo de impacto.	30

Figura 3.16. (a) Equipamentos utilizados na realização do ensaio de impacto transversal; (b) Provetes após ter sido sujeito ao ensaio.....	31
Figura 3.17. (a) Equipamentos utilizados na realização do ensaio de flexão em três pontos; (b) Ensaio de flexão em 3 pontos.....	31
Figura 3.18. Equipamentos utilizados para a avaliação visual do dano dos provetes.....	32
Figura 4.1. Variação da massa dos provetes ao longo dos vários períodos de imersão.....	34
Figura 4.2. Rugosidade média dos provetes estudados, Ra , ao longo dos vários períodos de imersão.....	36
Figura 4.3. Evolução da dureza <i>Vickers</i> dos provetes estudados ao longo dos vários períodos de imersão.....	39
Figura 4.4. Comparação das curvas de indentação para o controlo e os provetes imersos 60 dias na solução de argamassa de cimento em água.....	40
Figura 4.5. Variação da resiliência dos provetes submetidos ao ensaio de impacto longitudinal, ao longo dos vários períodos de imersão.....	42
Figura 4.6. Variação da energia absorvida pelos provetes submetidos ao ensaio de impacto longitudinal, ao longo dos vários períodos de imersão.....	42
Figura 4.7. Dano nos provetes imersos durante 90 dias após o ensaio de impacto longitudinal: (a) controlo; (b) argamassa de cimento, (c) argamassa de cimento em água, (d) argamassa de metacaulino.....	43
Figura 4.8. Variação da resiliência dos provetes submetidos ao ensaio de impacto transversal, ao longo dos vários períodos de imersão.....	44
Figura 4.9. Variação da energia absorvida dos provetes submetidos ao ensaio de impacto transversal, ao longo dos vários períodos de imersão.....	45
Figura 4.10. Dano nos provetes imersos em argamassa de cimento após o ensaio de impacto transversal: (a) controlo; (b) 30 dias; (c) 60 dias; (d) 90 dias.....	47
Figura 4.11. Dano nos provetes imersos durante 90 dias após o ensaio de impacto transversal: (a) Controlo; (b) argamassa de cimento; (c) argamassa de cimento em água; (d) argamassa de metacaulino.....	48
Figura 4.12. Variação da tensão de flexão dos provetes imersos durante 30 dias nas diferentes soluções.....	49
Figura 4.13. Variação da tensão de flexão dos provetes imersos em argamassa de cimentos durante os vários períodos de imersão.....	50
Figura 4.14. Dano nos provetes imersos em argamassa de cimento após o ensaio de impacto de flexão em três pontos: (a) controlo, (b) 30 dias, (c) 60 dias, (d) 90 dias.....	51
Figura 4.15. Dano nos provetes imersos durante 60 dias após o ensaio de flexão em três pontos: (a) controlo; (b) argamassa de cimento; (c) argamassa de cimento em água; (d) argamassa de metacaulino.....	53

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Propriedades das resinas de epóxico [8].....	16
Tabela 3.2. Propriedades do laminado vidro/epóxico [8].	17
Tabela 3.3. Concentração dos constituintes utilizados na produção da argamassa de cimento	19
Tabela 3.4. Concentração dos constituintes utilizados na produção da argamassa de metacaulino [25].....	20
Tabela 3.5. Dimensões do provete tipo 2 [26].....	22
Tabela 4.1. Resultados da medição da rugosidade dos provetes.	35
Tabela 4.2. Resultados da avaliação da dureza dos provetes.	38

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

A_c – Área projetada da indentação

b – Largura do provete

E – Módulo de Young

E_1 – Módulo de Young na direção das fibras de reforço

E_2 – Módulo de Young na direção transversal às fibras de reforço

G – Módulo de elasticidade transversal

G_{12} – Módulo de elasticidade transversal no plano da lâmina do compósito

G_{23} – Módulo de elasticidade transversal interlaminar do compósito

h – Espessura do provete

H – Dureza de um material

L – Distância entre apoios do provete

m_f – Valor da massa do provete após a sua imersão nas soluções cimentícias

m_i – Valor da massa do provete antes da sua imersão nas soluções cimentícias

m_r – Percentagem da variação da massa do provete

P – Carga aplicada ao provete

R_a – Rugosidade média de um material

R_q – Rugosidade média quadrática de um material

R_z – Altura média pico a vale da rugosidade de um material

V_f – Fração volúmica das fibras na lâmina do compósito

σ – Tensão normal de um material

ν_{12} – Coeficiente de Poisson no plano da lâmina do compósito

ν – Coeficiente de Poisson

Siglas

CNC – Controlo Numérico Computacional

DECUC – Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra

DEMUC – Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra

SEM – Microscopia eletrónica de varrimento (do inglês: *Scanning Electron
Microscopy*)

1. INTRODUÇÃO

A utilização de materiais compósitos tem séculos de história, tendo sido a sua criação motivada pela necessidade de se obterem estruturas e componentes com propriedades e características superiores às obtidas através do uso dos materiais até então disponíveis. Como exemplo das primeiras criações e utilizações deste tipo de materiais tem-se as velas e cordas fabricadas com materiais compósitos de fibras naturais e os tijolos de barro reforçados com palha usados na antiguidade pelos Egípcios. Nas últimas décadas o interesse e uso deste tipo de materiais tem vindo a crescer exponencialmente devido, sobretudo, ao desenvolvimento de novos processos de fabrico e novas áreas de aplicação.

Uma das principais áreas de aplicação dos materiais compósitos é a engenharia civil, sendo este tipo de materiais já utilizado por exemplo na construção de reservatórios e na requalificação de estruturas degradadas. A maioria dos estudos realizados nesta área e relacionados com os compósitos têm por objetivo a criação de estruturas mais leves e seguras, solucionando os problemas de corrosão dos materiais tradicionalmente utilizados. Assim, a presente dissertação insere-se neste tipo de estudo, e tem como objetivo estudar a aplicabilidade de materiais compósitos na substituição dos materiais tradicionalmente utilizados como reforço em estruturas fabricadas em betão. Como tal, realizaram-se ensaios de impacto transversal e longitudinal, a baixa velocidade, e ensaios de flexão em 3 pontos, de laminados vidro/epóxico de forma a avaliar a integridade estrutural destes materiais, quando expostos a soluções cimentícias durante vários períodos de imersão. No decorrer deste estudo avaliaram-se também as variações de massa, rugosidade e dureza dos laminados.

A presente dissertação é organizada em cinco capítulos, sendo o presente capítulo o primeiro. No segundo capítulo faz-se um breve enquadramento teórico dos materiais compósitos, e apresenta-se uma breve descrição destes, bem como a sua classificação. Neste capítulo são também apresentados os vários modos de falha destes materiais e alguns dos seus processos de fabrico. No terceiro capítulo descreve-se o processo experimental, sendo apresentados os materiais, soluções, procedimentos e equipamentos

utilizados de forma a estudar as propriedades dos materiais em estudo. No quarto capítulo são apresentados e analisados os resultados experimentais obtidos através das medições e ensaios realizados. Por fim, no quinto capítulo apresenta-se uma síntese das conclusões obtidas com a análise de resultados, seguida de algumas propostas para trabalhos futuros.

2. ESTADO DE ARTE

No presente capítulo abordam-se os materiais compósitos, começando por uma breve descrição, onde é feita referência às vantagens e desvantagens dos materiais, bem como a possíveis aplicações. Seguidamente apresenta-se uma classificação destes materiais com base nos seus componentes. Neste capítulo serão também abordados os vários modos de degradação a que os materiais compósitos podem ser sujeitos durante a sua vida útil e o seu modo de fabrico.

2.1. Materiais compósitos

Como demonstrado pela Figura 2.1, o campo de aplicações de materiais compósitos manteve-se restringido a áreas como a construção civil ou a indústria do papel até à segunda metade do século XX. A partir dessa data a utilização dos compósitos passou a aumentar devido, essencialmente, aos desenvolvimentos tecnológicos na área dos polímeros e à criação de fibras sintéticas [1]. Estas fibras possibilitaram a conceção de materiais compósitos com características semelhantes ou superiores aos materiais tradicionais [2]. Na sua generalidade, os materiais compósitos apresentam vantagens como:

- Controlo das propriedades mecânicas segundo direções diferentes;
- Elevada rigidez específica;
- Elevada resistência específica;
- Boa estabilidade térmica;
- Boa resistência à corrosão;
- Facilidade de fabrico;

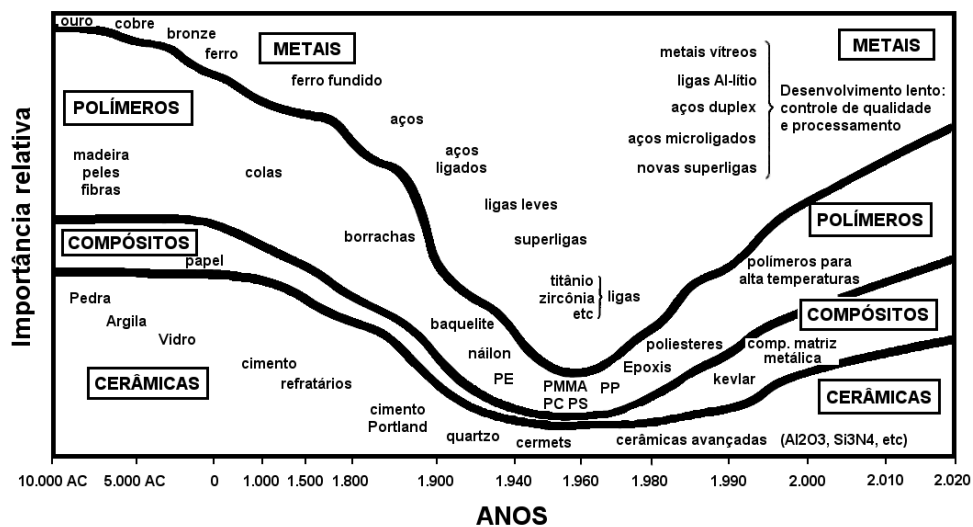


Figura 2.1. Evolução da importância relativa dos materiais com o tempo [1]

As características anteriormente referidas tornam os materiais compósitos atrativos a variadas indústrias como a automóvel, naval e aeroespacial, onde existe uma procura por materiais leves e de fácil moldação, de forma a melhorar o desempenho e a diminuir custos dos componentes produzidos [2]. Também em áreas ligadas à saúde e à construção civil surgiu o interesse e crescente uso deste tipo de materiais, devido à sua boa estabilidade térmica e resistência à corrosão. Por consequência do interesse demonstrado por estas indústrias, a investigação em torno de materiais compósitos tem-se expandido com o objetivo de incorporar materiais base mais diversos, bem como em obter formas de contrariar as desvantagens que estes materiais apresentam, como por exemplo a difícil reparação, o curto tempo de vida, a temperatura de serviço limitada ou os elevados custos de produção [3], [4], [5].

Apesar de serem usados à largos anos, os materiais compósitos continuam a não ter uma definição aceite por todos os autores. De uma forma genérica diz-se que um material compósito resulta da união de dois ou mais constituintes não miscíveis, micro ou macrométricos, que diferem na sua forma e composição química [2], [6], [7]. Como os seus constituintes não são miscíveis, o material formado é composto por duas fases claramente distintas: a matriz e o reforço. A matriz é composta pelos materiais que constituem a fase contínua do compósito e envolve o reforço, que são os materiais que constitui a fase dispersa [2]. Assim, a classificação e as propriedades dos materiais compósitos tem por base as características e natureza dos materiais que constituem as suas fases.

De seguida apresentam-se, em mais detalhe, estas duas fazes constituintes de um material compósito.

2.1.1. Matriz

A matriz tem a função de assegurar a distribuição uniforme do carregamento, a que o compósito é sujeito, pelo reforço e de proporcionar a este último uma estrutura coesa e proteção do meio envolvente. No caso de compósitos reforçados com fibras, atua também como mecanismo de transferência de carga entre as fibras e assegura o correto empilhamento das camadas. No que toca às propriedades mecânicas, a matriz confere ao compósito resistência à compressão longitudinal, à tração transversal e ao deslizamento interlaminar, devendo no entanto apresentar uma rigidez inferior e uma maior ductilidade que o reforço.

A classificação de um material compósito quanto a sua matriz tem como base o tipo de material de que esta é constituída, podendo ser de origem metálica, polimérica ou cerâmica. Especificando quanto ao caso das matrizes de origem polimérica, dado ser este o tipo de matriz aplicada ao compósito em estudo, estas tomam a forma de resinas que podem ser termoplásticas ou termoendurecíveis. As resinas termoplásticas têm a vantagem de poderem ser reprocessáveis, no entanto, o facto das resinas termoendurecíveis serem geralmente mais resistentes, possuírem uma melhor estabilidade dimensional e o seu processamento ser relativamente mais simples e possível a baixa temperatura e pressão, torna a utilização destas últimas mais atrativa para a indústria [3], [6], [7].

2.1.2. Reforço

O reforço tem o objetivo de conferir as propriedades mecânicas ao material compósito, como tal, estas dependem de fatores como a concentração, tamanho, distribuição, orientação e forma dos constituintes do reforço. A classificação de um compósito quanto ao seu reforço pode ser dividida em dois grandes grupos: os compósitos fibrosos e os compósitos particulados [1], [2]. Na Figura 2.2 apresentam-se, de forma esquematizada, os vários tipos de compósitos possíveis de serem criados com base no seu tipo de reforço.

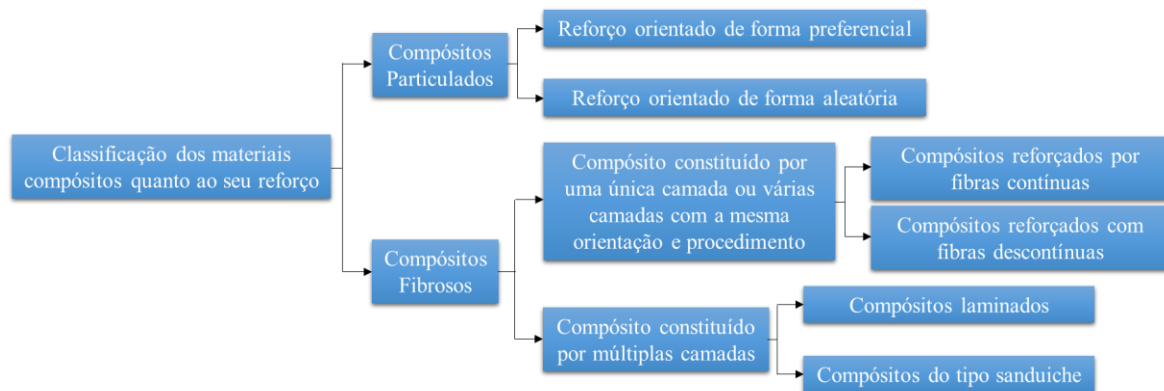


Figura 2.2. Classificação de materiais compósitos quanto ao seu reforço, adaptado de [2].

No caso de materiais compósitos particulados, o reforço toma a forma de partículas que podem ser orientadas de uma forma preferencial ou de forma aleatória [2]. Este tipo de reforço é indicado para melhorar propriedades como a resistência à temperatura, à rigidez e à abrasão, no entanto, a sua eficácia depende do diâmetro das partículas, do espaço inter-partículas e da fração de volume do reforço [1], [3].

Os materiais compósitos fibrosos são aplicados em situações mecanicamente mais exigentes para o material, sendo que o reforço deste compósito toma a forma de fibras. As fibras de reforço podem ser contínuas ou descontínuas [1], [3]. A diferença entre estes dois tipos prende-se com o facto das fibras contínuas apresentarem uma eficiência de reforço superior, enquanto que as descontínuas são mais económicas e com processamento mais simples [2]. Devido ao facto dos materiais compósitos serem anisotrópicos, a escolha da orientação das fibras depende da aplicação e do carregamento a que o material estará sujeito, podendo estas ser dispostas numa só direção, em várias direções definidas ou de forma aleatória. Quanto ao número de camadas, o compósito pode ser do tipo laminado, caso seja constituído por múltiplas camadas de fibras impregnadas numa matriz, sobrepostas segundo diferentes orientações, ou do tipo sanduiche, que consiste em aplicar um material leve com boa resistência à compressão entre duas contraplacas com elevada rigidez [2]. As propriedades finais de um compósito fibroso dependem do comprimento, orientação, forma e número de camadas de fibras neste aplicadas.

2.2. Impacto em materiais compósitos

A integridade estrutural de um compósito pode ser afetada por danos que este material possa apresentar. Muitas das aplicações em que os compósitos são utilizados envolvem o risco deste material sofrer um impacto. Como tal, um dos tipos de dano com maior relevância no estudo dos materiais compósitos são os defeitos provocados por impacto. No caso de o impacto ocorrer a alta velocidade os danos causados são visíveis por inspeção visual, o que permite ao utilizador optar ou não pela utilização do componente danificado. Já no caso dos impactos de baixa velocidade, os utilizados na presente dissertação, o dano é interno, podendo reduzir significativamente a integridade estrutural do compósito. Este tipo de defeitos são de difícil deteção, uma vez que não são visíveis a olho nu, o que pode levar à utilização insuspeita de um componente danificado.

Existem quatro mecanismos principais de falha provocados por impacto a baixa velocidade: a rotura da matriz, a fissuração das fibras, a separação entre fibras e matriz e a delaminação [8]. A rotura da matriz é um tipo de dano que ocorre, geralmente, na zona de impacto do compósito. Este dano não incapacita diretamente o desempenho do compósito, no entanto, pode originar uma exposição das fibras ao meio ambiente e, desta maneira, levar à falha do compósito. A fissuração das fibras pode levar diretamente à falha do compósito, dado serem as fibras as principais responsáveis pelas propriedades mecânicas do elemento. Este tipo de defeito pode levar à separação entre as fibras e a matriz do compósito devido ao aumento das tensões de corte na interface entre estas [8]. A separação entre fibras e matriz deve-se a uma fraca ligação entre as fases do compósito, podendo ocorrer quando é atingido o valor máximo da deformação elástica das fibras em situações de carregamento contínuo com um aumento gradual do valor da carga. A delaminação ocorre, normalmente, devido à propagação da rotura da matriz de uma camada até à camada seguinte, geralmente em compósitos constituídos por várias camadas com orientações ou propriedades distintas [8], [9]. Este tipo de falha pode surgir por abertura de fendas devido a forças de tração, deslizamento de camadas devido a forças de corte no plano ou por arrancamento devido a forças de corte fora do plano [9]. A delaminação só surge após ocorrer rotura da matriz, estando estes dois modos de rotura diretamente interligados. Na Figura 2.3 são esquematizados estes modos de falha por delaminação.



Figura 2.3. Modos de falha por delaminação.

2.3. Degradação de materiais compósitos

Com a diversificação das áreas atraídas pelas características dos materiais compósitos, surgem problemas de degradação nestes materiais, até então pouco conhecidos. Assim, sendo a degradação de compósitos um tópico cada vez mais abordado, mas ainda algo recente, e dado ser este o tema da presente dissertação, de seguida faz-se referência a alguns estudos realizados nesta área, nomeadamente, no que toca ao efeito de ambientes corrosivos e da humidade na integridade estrutural dos compósitos.

2.3.1. Efeito de ambientes corrosivos em materiais compósitos

Como já referido neste capítulo, um dos propósitos da matriz é proteger o reforço do meio em que o compósito está inserido. Assim, de acordo com o subcapítulo **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, a degradação da matriz pode levar à exposição do reforço ao ambiente e, por consequência, à falha do compósito. Especificando para o caso de compósitos de matriz polimérica, como alguns fatores que influenciam negativamente o seu desempenho temos o contacto com, por exemplo, ácidos, bases e combustíveis.

Amaro *et al.* [10] analisaram a influência de soluções ácidas (HCl) e alcalinas (NaOH) em compósitos de fibra de vidro/epóxico. Neste estudo concluíram que as propriedades do material compósito decrescem com a sua exposição a ambas as soluções. Contudo, de entre as duas, a solução alcalina provou ter a maior influência na degradação destes materiais. Estas conclusões são confirmadas pela análise realizada por [11] e por [12].

Em [12], para além do estudo envolvendo soluções ácidas e alcalinas, estudou-se também o efeito de combustíveis e óleo de motor nos compósitos, tendo sido concluído que este efeito é relativamente reduzido.

2.3.2. Efeito da humidade em materiais compósitos

A presença de água em compósitos é um tipo de degradação sobre o qual já existe um número considerável de estudos, particularmente no caso de compósitos de matriz polimérica, através dos quais se concluiu que a humidade pode afetar as propriedades mecânicas e químicas deste tipo de compósitos.

Uma das razões que leva os materiais compósitos de matriz polimérica a sofrerem degradação das suas propriedades pela presença de água no meio em que estão inseridos prende-se com o facto das resinas de origem polimérica serem capazes de absorver cerca de 2% em massa de água. Este é um valor relativamente baixo que, no entanto, é suficiente para reagir com a matriz e, por consequência, provocar alterações nas propriedades do compósito [13]. Esta absorção de água pode provocar dilatações no compósito que, por sua vez, podem originar tensões internas de valor superior as forças de ligação da matriz, que promovem a fissuração da matriz [14]. No caso de compósitos fibrosos, a água é absorvida através das fibras de reforço e da interface fibra/matriz, o que pode provocar a delaminação entre as camadas [15].

Huang e Sun [15] analisaram as propriedades mecânicas de compósitos laminados de fibra de vidro/poliéster após a sua imersão em água. Neste estudo concluíram que a estrutura do compósito tende a plastificar com aumento da duração dos períodos de imersão e que, por consequência, a resistência à flexão deste material tende a aumentar. Por sua vez, ao analisarem o efeito higrotérmico nas propriedades elásticas de um compósito de fibra de vidro/epóxico. Botelho *et al* [16] verificaram que as amostras, expostas a meios com uma elevada concentração de humidade, apresentam um pior desempenho da sua capacidade de resistir à tração e compressão com o aumento do tempo de exposição. Estes autores verificaram que a degradação observada ocorreu devido à plastificação da matriz provocada pela humidade presente no meio a que as amostras foram expostas.

2.4. Manufatura de materiais compósitos

Os diversos métodos de processamento de materiais compósitos podem ser agrupados em dois grupos diferentes: os processos em molde aberto ou os processos em molde fechado. Os processos em molde aberto permitem produzir componentes de grande dimensão e complexidade, no entanto, são geralmente pouco automatizados e produzem um bom acabamento superficial apenas numa das faces do componente produzido. Sendo pouco automatizados, muitas vezes totalmente manuais, a sua cadência de produção e a qualidade do produto final depende da experiência e das qualificações dos operadores deste processo. Outra desvantagem de serem pouco automatizados é o facto dos custos de mão-de-obra e de controlo de qualidade deste processo podem levar ao aumento do seu custo de produção. Por sua vez, os processos em molde fechado são mais automatizados que os anteriores, logo têm também uma cadência de produção bastante superior. Os componentes produzidos nestes processos têm um bom acabamento em toda a sua superfície, mas uma menor complexidade e dimensão. Os custos dos processos em molde fechado estão relacionados com os elevados custos de aquisição dos equipamentos para a sua produção.

No caso de materiais compósitos de matriz polimérica, sabendo o tipo de resina que constitui a matriz (termoendurecível ou termoplástica) e o tamanho e configuração das fibras de reforço, é possível fazer-se uma pré-seleção de processos de fabrico ao seguir-se o esquema da Figura 2.4. Feita a pré-seleção, a escolha do processo de fabrico final é realizada com base no tipo de molde (aberto ou fechado) e no nível de automação que se pretende utilizar [17],[18].

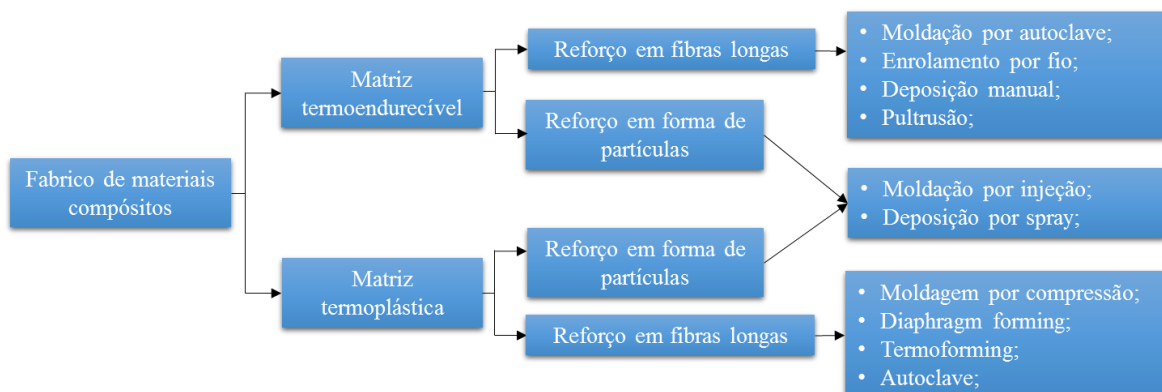


Figura 2.4. Esquema de seleção de processos de fabrico de materiais compósitos de matriz polimérica, adaptado de [5].

Na presente dissertação estudaram-se materiais compósitos de matriz termoendurecível. Como tal, apresentam-se de seguida dois processos de produção deste tipo de compósitos com reforço em forma de partículas, processo de moldação por injeção e deposição por spray, e dois processos de produção de compósitos com reforço de fibras contínuas, processo de deposição manual e processo de moldação por autoclave.

2.4.1. Processo de deposição manual

O processo de deposição manual é realizado inteiramente de forma manual e é utilizado um molde aberto. Apesar das desvantagens inerentes aos processos de molde aberto, a deposição manual continua a ser bastante utilizada em indústrias com produções reduzidas ou no fabrico de componentes de grande dimensão e complexidade.

O processamento destes materiais, esquematizado na Figura 2.5, começa com a aplicação de um revestimento de gel ao molde. Este revestimento é responsável pelo bom acabamento superficial de uma das faces e impede a adesão do componente ao molde, facilitando a sua remoção. Após a aplicação do gel é criada a primeira camada do compósito começando pela colocação do reforço, usualmente sobre a forma de tecido ou manta. De seguida a resina é vazada sobre o reforço e o conjunto é comprimido com a passagem de rolos de forma a evitar a formação de porosidades ou vazios e a promover a correta ligação entre fases. Este processo é repetido até ser obtido o número de camadas desejado, sendo finalizado por um processo de cura à temperatura ambiente [18].

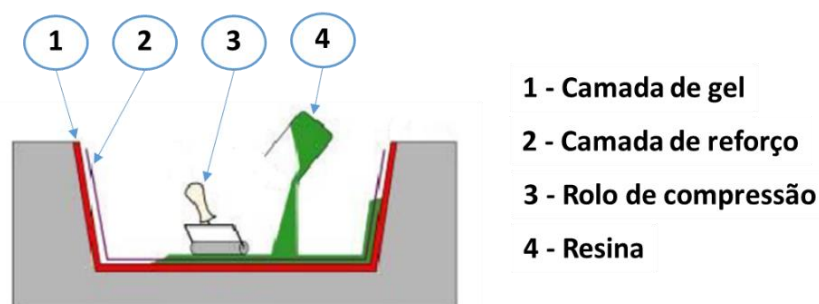


Figura 2.5. Ilustração representativa do processo de deposição manual, adaptado de [18].

Este processo é bastante utilizado na produção de componentes tais como cascos de barcos, depósitos ou coberturas.

2.4.2. Processo de deposição por spray

O processo de deposição por spray é semelhante ao processo de deposição manual, uma vez que ambos os processos se iniciam com o revestimento do molde com gel e finaliza com um processo de cura. No entanto, estes processos diferem na etapa de deposição onde no caso do processo por deposição por spray, a resina e as fibras são aplicadas ao molde simultaneamente com o uso de uma pistola de corte e projeção. Na Figura 2.6 é representado o processo de deposição por spray, com o esquema dos componentes principais: a pistola de corte e projeção e o molde.

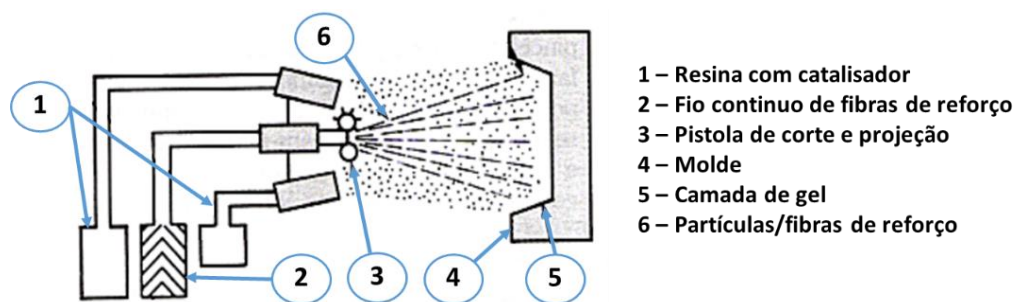


Figura 2.6. Ilustração representativa do processo de deposição por spray, adaptado de [18].

A deposição por spray produz componentes mais homogêneos que os obtidos por deposição manual e tem a possibilidade de ser automatizada. No entanto, este processo é adequado apenas à produção de componente de grande dimensões em pequenas quantidades, tais como cascos de barcos, banheiras ou bases de chuveiros [18].

2.4.3. Processo de moldação por autoclave

A moldação por autoclave é um processo em molde aberto adequado ao fabrico de laminados de elevada qualidade e desempenho mecânico. Neste processo são utilizadas folhas de fibras pré-impregnadas em resina, que são cortadas e empilhadas num molde aberto. De seguida o molde é inserido num saco de vácuo com o objetivo de compactar uniformemente as camadas e proceder à extração de voláteis, solvente e humidade, evitando assim a formação de porosidades ou vazios no material. Depois de inserido no saco de vácuo,

o molde é introduzido num autoclave (Figura 2.7) onde a subida gradual de temperatura, pressão e vácuo ativa as resinas baixando a sua viscosidade e promovendo a mistura das fases. Após a mistura das fases e ainda no autoclave, é feita a cura e consolidação do componente a temperatura e pressão constantes. O processo acaba com a diminuição gradual da temperatura e da pressão, remoção do molde do autoclave e a sua desmoldagem [5].



Figura 2.7. Exemplo de um autoclave [18].

Este processo é utilizado na produção de componentes de elevado desempenho a serem aplicados em indústrias como a automóvel, aeronáutica e espacial.

2.4.1. Processo de moldação por injeção

A moldação por injeção é um processo em molde fechado utilizado na produção de componentes reforçados com partículas, ou com fibras curtas de orientação aleatória. A mistura da matriz com o reforço faz-se numa câmara de mistura e é depois injetada para o interior da cavidade do molde. Ambas as componentes do molde são mantidas sobre pressão até se dar a cura da resina. Concluída a cura, o molde abre, é removido o componente e o processo recomeça para produção de um novo componente.

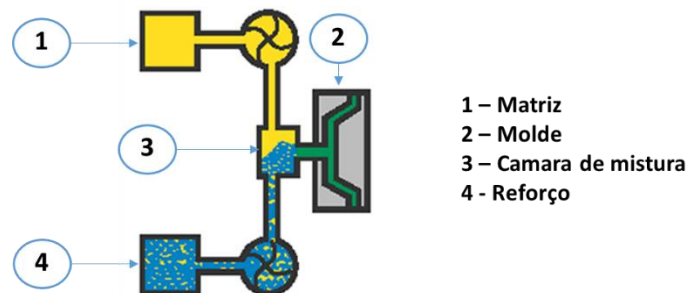


Figura 2.8. Ilustração representativa do processo de injeção de materiais compósitos, adaptado de [19]

Este tipo de processo é utilizado na produção de componentes com dimensões mais reduzidas e menos complexas que os processos anteriores, no entanto, tem a vantagem de permitir uma elevada cadência de produção.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Com o presente capítulo apresentam-se os materiais e soluções usadas no desenvolvimento deste estudo, sendo feita referência às suas características e processo de obtenção. É ainda apresentado todo o processo experimental, bem como as medições e ensaios realizados de forma a estudar as propriedades dos materiais em estudo.

3.1. Materiais e soluções

De acordo com o referido anteriormente, o presente estudo tem por objetivo analisar o efeito de soluções cimentícias na resposta ao impacto longitudinal e transversal e à flexão em três pontos de laminados de vidro/epóxico. Para este efeito foram imersos vários provetes em três soluções cimentícias: argamassa de cimento, argamassa de cimento em água e argamassa de metacaulino, durante diferentes intervalos de tempo. De seguida é feita uma breve descrição destes materiais e soluções.

3.1.1. Laminados de vidro/epóxico

Os laminados vidro/epóxico são compósitos que combinam uma matriz na forma de resina de epóxico, com um reforço em fibras de vidro.

As resinas de epóxico são um material polimérico termoendurecível, conhecidas por apresentarem boas propriedades mecânicas e térmicas, boa resistência química e baixa condutividade elétrica. Outra vantagem deste tipo de resinas prende-se com o facto de apresentarem uma baixa viscosidade antes da cura, o que permite uma mais fácil impregnação e adesão ao reforço [2]. O processo de cura destas resinas é feito por adição de agentes endurecedores, permitindo assim que este processo seja realizado a baixa pressão e temperatura. Como durante o processo de cura não existe libertação de produtos voláteis, as resinas de epóxico apresentam uma grande estabilidade dimensional, podendo algumas destas resinas ser utilizadas até temperaturas de 220°C. Estas resinas têm no entanto algumas desvantagens, tais como o seu elevado custo de transformação, o elevado tempo de cura, o

seu manuseamento ser corrosivo e a necessidade de um processamento cuidado de forma a garantir resistência à humidade [7], [20], [14], [21].

O compósito laminado em estudo é reforçado com fibras contínuas de vidro-E. Estas, apesar de apresentarem um baixo módulo de elasticidade, uma elevada massa específica, boa sensibilidade à abrasão e baixa resistência à fadiga, são bastante utilizadas na indústria pois apresentam vantagens como:

- Baixo custo;
- Boa relação resistência/peso;
- Boa resistência à corrosão;
- Boa estabilidade dimensional;
- Facilidade de fabrico;
- Bom desempenho em isolamento térmico;
- Boas propriedades dielétricas.

O material compósito utilizado no presente estudo é o mesmo material estudado por Luís Ferreira [8], sendo as propriedades dos seus constituintes como o módulo de Young, E , o coeficiente de Poisson, ν , o módulo de elasticidade transversal, G , e a fração volúmica das fibras na lâmina do compósito, V_f , apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Propriedades das resinas de epóxico [8].

Propriedades	Resina de epóxico	Fibra de vidro
E [GPa]	3,45	73,0
G [GPa]	1,33	29,0
ν	0,30	0,22
V_f	44,5 %	

Na Tabela 3.2 são apresentadas as propriedades do compósito laminado vidro/epóxico obtido, sendo E_1 e E_2 o módulo de Young na direção das fibras de reforço e na direção transversal às fibras de reforço, respetivamente, ν_{12} o coeficiente de Poisson no plano da lâmina e G_{12} e G_{23} o módulo de corte no plano da lâmina e o módulo de corte

interlaminar, respetivamente. De forma a facilitar a compreensão das direções e sentidos pelas quais se regem as propriedades anteriores é esquematizado na Figura 3.1 o sistema de coordenadas do laminado [8].

Tabela 3.2. Propriedades do laminado vidro/epóxico [8].

Propriedades do laminado vidro/ epóxico	
E_1 [GPa]	30,57
E_2 [GPa]	6,00
G_{12} [GPa]	2,31
G_{23} [GPa]	2,79
ν_{12}	0,26

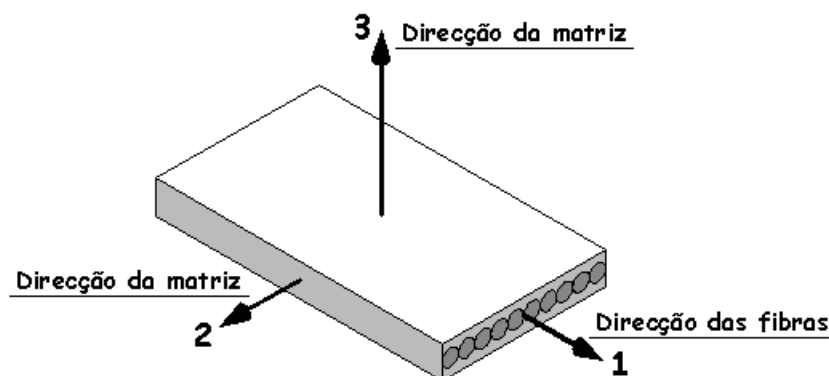


Figura 3.1. Sistema de coordenadas da lâmina [8].

Na presente dissertação utilizaram-se laminados vidro/epóxico fabricados pelo INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, através de um processo de moldação por autoclave. Na Figura 3.2 é ilustrado o ciclo de cura a que os laminados estiveram sujeitos, tendo sido este um ciclo aquecimento-arrefecimento a uma taxa de $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Este ciclo foi realizado a uma pressão constante de 2 bar , com um patamar de cura de 130°C durante 1 hora.

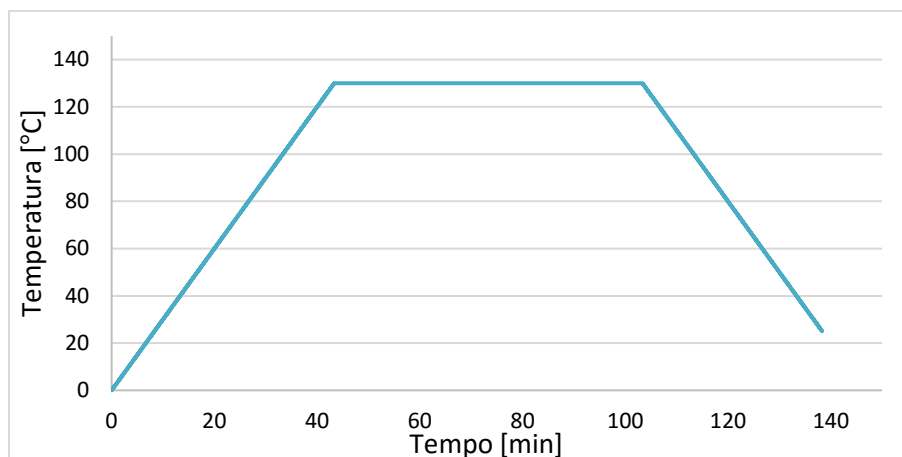


Figura 3.2. Ciclo de cura das placas de laminados de vidro/epóxico, adaptado de [8].

Os laminados foram fabricados com uma sequência de empilhamento $[45_2/90_2/-45_2/0_2]_s$ de 16 camadas, sobre a forma de placas com dimensões de $300 \times 300 \times 2$ [mm].

3.1.2. Argamassa de cimento

Os materiais com maior utilização na indústria da construção civil são a argamassa de cimento e o betão devido à sua elevada resistência à compressão. Estes materiais partilham uma composição semelhante, sendo ambos criados a partir de uma mistura de areia, pó de cimento, água e plastificante. Este plastificante tem como propósito aumentar a fluidez da mistura, reduzindo assim a quantidade de água necessária à mistura que, em grandes quantidades, pode prejudicar as propriedades mecânicas do material final. A diferença entre estes dois materiais deve-se à dimensão dos seus constituintes, tendo estes um tamanho superior no betão pois, para além da areia, cimento, água e plastificante, o betão é também constituído por agregados como a brita (com dimensões na ordem dos 2,5 cm).

Como a presente dissertação tem por objetivo analisar o efeito da degradação provocada pelo ligante, a presença ou não de agregados nas soluções não se torna relevante para o estudo. Assim decidiu-se pelo uso da solução de argamassa de cimento, que foi produzida no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra (DECUC), com as concentrações dos seus constituintes indicadas na Tabela 3.3. No processo de produção da argamassa começou-se por pesar os seus constituintes, sendo a sua mistura

realizada de seguida com o apoio de uma misturadora (Figura 3.3). Esta solução apresenta um pH inicialmente neutro que, com o decorrer da dissolução, pode ir até 12-13 [22].

Tabela 3.3. Concentração dos constituintes utilizados na produção da argamassa de cimento

Constituintes	Concentração [%]
Areia	62,72
Cimento Portland Normal	25,09
Água	12,05
Plastificante	0,14



Figura 3.3. Misturadora utilizada na preparação da argamassa.

3.1.3. Argamassa de metacaulino

O metacaulino é um pó obtido a partir dos caulinos, aluminossilicatos naturais, resultantes de alterações químicas de rochas feldspáticas. A utilização deste material tem vindo a ser estudada pela engenharia civil devido ao facto da sua produção ser menos prejudicial a nível ambiental que a produção de cimento, pois envolve menores emissões de dióxido de carbono e necessita de temperaturas inferiores (de 700°C a 800°C comparativamente aos 1500°C para o cimento) [23], [24].

A argamassa de metacaulino é um geopolímero e tem características mecânicas semelhantes às da argamassa de cimento, sendo, no entanto, constituída por areia, hidróxido

de sódio, pó de metacaulino e silicato de sódio. Esta é uma solução de ativação alcalina, como tal, o seu pH é elevado durante a fase de reação e decresce de seguida até valores abaixo de 14. Esta argamassa produziu-se com um processo análogo ao utilizado na produção da argamassa de cimento, estando as quantidades e a concentração de cada um dos seus constituintes referidas na Tabela 3.4 [25].

Tabela 3.4. Concentração dos constituintes utilizados na produção da argamassa de metacaulino [25].

Constituintes	Concentração [%]
Areia	54,34
Hidróxido de sódio	8,70
Pó de metacaulino	19,57
Silicato de sódio	17,39

3.2. Preparação dos ensaios a realizar

Neste ponto é descrita a preparação necessária aos ensaios experimentais, começando pela maquinação, seguindo-se da secagem e medição da massa, geometria, rugosidade e da dureza dos provetes de ensaio. Por fim, descreve-se o processo de imersão destes provetes.

3.2.1. Provetes de ensaio

Para avaliar as propriedades mecânicas e o comportamento do laminado após a degradação provocada pelas soluções, sujeitou-se este material a ensaios de impacto longitudinal e transversal, e de flexão em três pontos. Cada um destes ensaios exige o cumprimento de normas distintas referentes à geometria do material utilizado. Como tal, as placas de laminado foram seccionadas e maquinadas de forma a obter provetes que satisfaçam estas normas.

Foram maquinados 30 provetes para cada tipo de ensaio. Três destes provetes foram utilizados para efeitos de controlo, sendo os restantes 27 distribuídos pelas soluções (argamassa de cimento, argamassa de cimento em água e argamassa de metacaulino), para cada período de imersão, em grupos de 3. Na Figura 3.4 é esquematizada a distribuição dos provetes para a solução de argamassa de cimento, sendo esta distribuição idêntica no caso das restantes duas soluções.

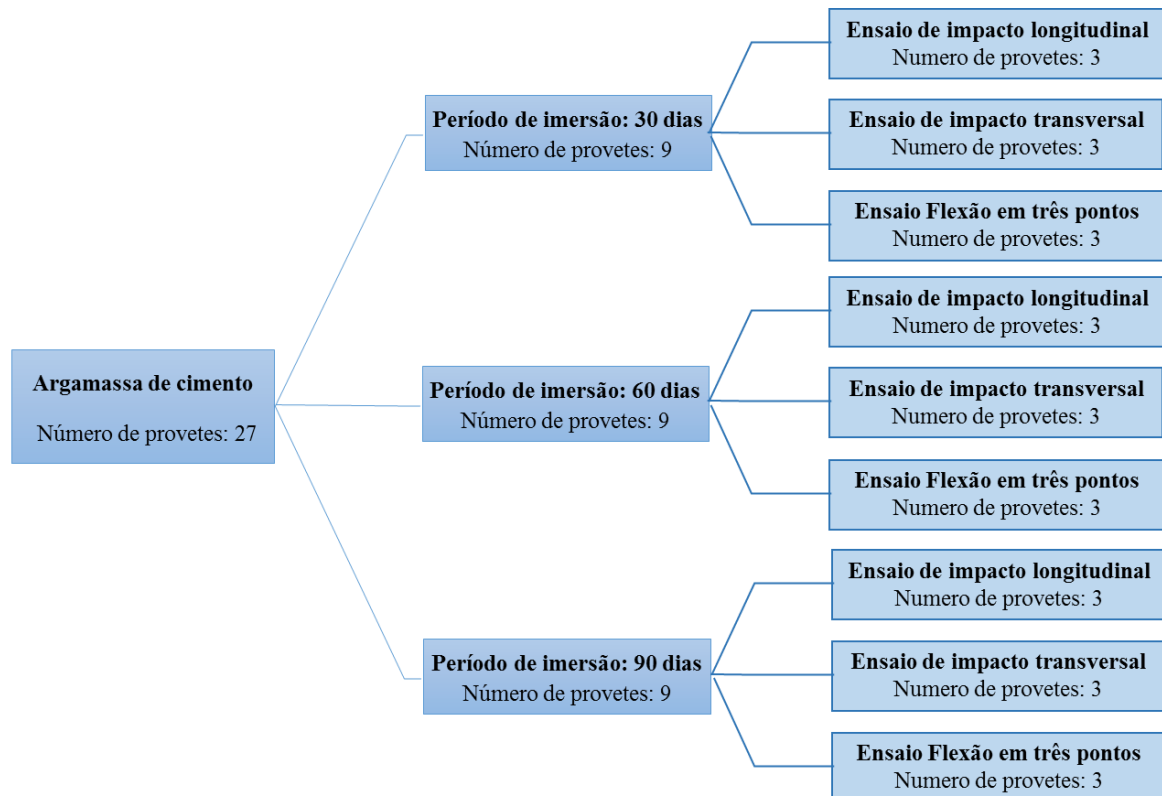


Figura 3.4. Distribuição dos provetes de ensaio para a solução de argamassa de cimento.

De seguida é descrito o processo de obtenção dos provetes de cada ensaio de forma a satisfazer as normas pelas quais estes se regem.

3.2.1.1. Ensaio de impacto longitudinal

De entre os três tipos de ensaios realizados, os provetes utilizados no ensaio de impacto longitudinal são os que apresentam uma geometria com maior complexidade, tendo sido maquinados de acordo com a norma ISO 8256 método A. Para esta norma foi selecionado um provete do tipo 2, sendo a sua geometria e dimensões apresentadas na Figura 3.5 e na Tabela 3.5, respetivamente.

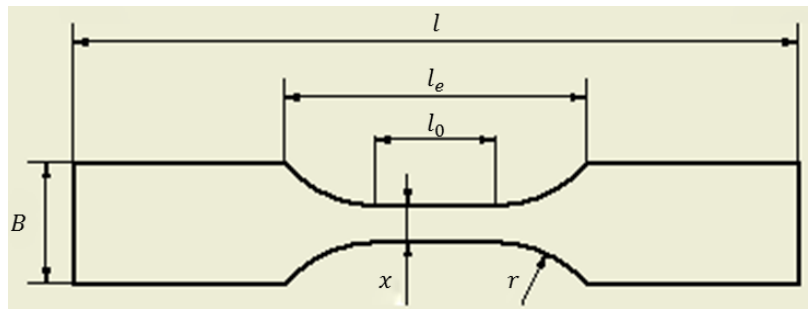


Figura 3.5. Esquema representativo da geometria de um provete tipo 2, adaptado de [26].

Tabela 3.5. Dimensões do provete tipo 2 [26].

Tipo de provete	l [mm]	B [mm]	x [mm]	l_0 [mm]	l_e [mm]	r [mm]
2	60 ± 2	$10 \pm 0,2$	$3 \pm 0,2$	$10 \pm 0,2$	25 ± 2	10 ± 1

Devido à sua forma estes provetes foram maquinados utilizando o equipamento de Controlo Numérico Computorizado (CNC), marca MIKRON modelo VCE500 (Figura 3.6), do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra (DEMUC).



Figura 3.6. Equipamento de CNC utilizado na maquinação dos provetes do ensaio de impacto longitudinal.

3.2.1.2. Ensaio de impacto transversal

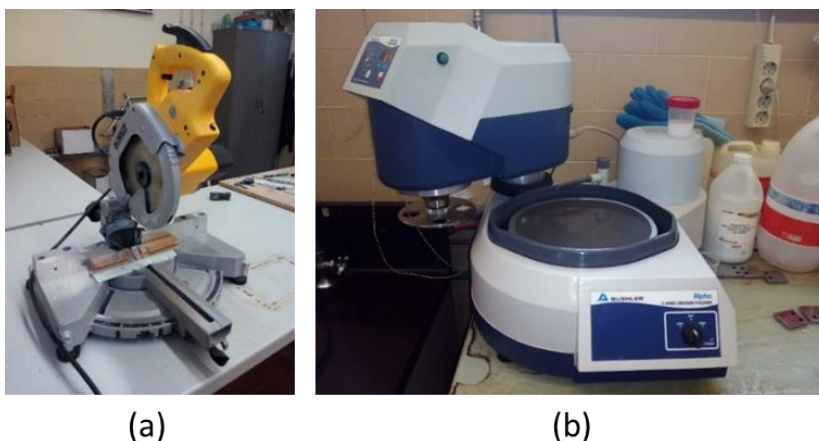
O ensaio de impacto transversal é realizado com recurso a um equipamento especializado, sendo este constituído por uma base de suporte, onde é colocado o provete de ensaio, e por um martelo de impacto (Figura 3.7). A distância entre apoios da base de suporte

é de 60 mm e o martelo tem um impactor de 15 mm de altura, como tal, e segundo a norma ISO 179 que rege este tipo de ensaios, os provetes têm necessariamente um comprimento superior à distância entre apoios da base de suporte (60 mm) e uma largura máxima de 15 mm .



Figura 3.7. Martelo de impacto e base de suporte em situação de impacto durante um ensaio.

Para estes ensaios as placas de laminados foram seccionadas em provetes com 80 mm de comprimento e 10 mm de largura com uso de uma serra de disco elétrica, cumprindo assim as condições anteriormente referidas. De forma a não causar arrancamento de fibras e, por consequência, poder provocar a alteração das propriedades do compósito, foi utilizado na serra de corte um disco com 2 mm de espessura e dentes diamantados. Depois de cortados, os provetes foram retificados com uma lixa de água de 320 mesh com superfície abrasiva fina, de forma a remover rebarbas e imperfeições originadas pelo processo de corte. Na Figura 3.8 apresentam-se a serra de disco elétrica e a lixa de água.



(a)

(b)

Figura 3.8. (a) Serra de disco elétrica; (b) Lixa de água.

3.2.1.3. Ensaio de flexão em três pontos

Os ensaios de flexão em três pontos são realizados de acordo com a norma ASTM D790-2, que dita que o valor da distância entre apoios dos provetes a ensaiar deve ser 16 vezes superior ao valor da sua espessura. Os provetes utilizados neste ensaio obtêm-se de maneira análoga aos provetes utilizados no ensaio de impacto transversal, no entanto, de forma a cumprir a norma referida, foram seccionados com um comprimento de 60 *mm* e uma largura de 10 *mm*.

3.2.2. Imersão dos provetes

Após a maquinação e o corte, os provetes foram numerados de forma a facilitar a sua identificação e submetidos a um processo de secagem com recurso a uma mufla do DEMUC onde foram colocados a 25°C durante três horas. Para efeitos de controlo, antes da imersão nas soluções, fez-se a medição da massa, geometria, rugosidade e dureza dos provetes. Estas medições foram repetidas após se retirar os provetes das soluções.

Em preparação para a imersão dos provetes, construíram-se nove caixas de perpex, com dimensões interiores de 12 × 13 × 1,5 *cm*. Estas caixas têm a função de manter as soluções confinadas e garantir a total imersão dos provetes. Na Figura 3.9 mostram-se os componentes de uma destas caixas, sendo de realçar que os entalhes nas faces laterais têm a função de posicionar os provetes e permitir uma desmoldagem com menores riscos de dano para estes.



Figura 3.9. Componentes da caixa de imersão

Com as caixas de imersão construídas posicionaram-se em cada uma destas três provetes de cada ensaio a realizar (Figura 3.10 (a)). De seguida procedeu-se à imersão dos provetes em cada uma das 3 soluções previamente preparadas. Após a imersão dos provetes, envolveram-se as caixas em película plástica de forma a minimizar as trocas de água com o meio ambiente, reduzindo assim a retração provocada pela desidratação e, consequentemente, melhorando o processo de cura (Figura 3.10 (b)). A utilização desta película é especialmente importante para o caso do metacaulino, visto este material ser bastante sensível ao processo de cura.

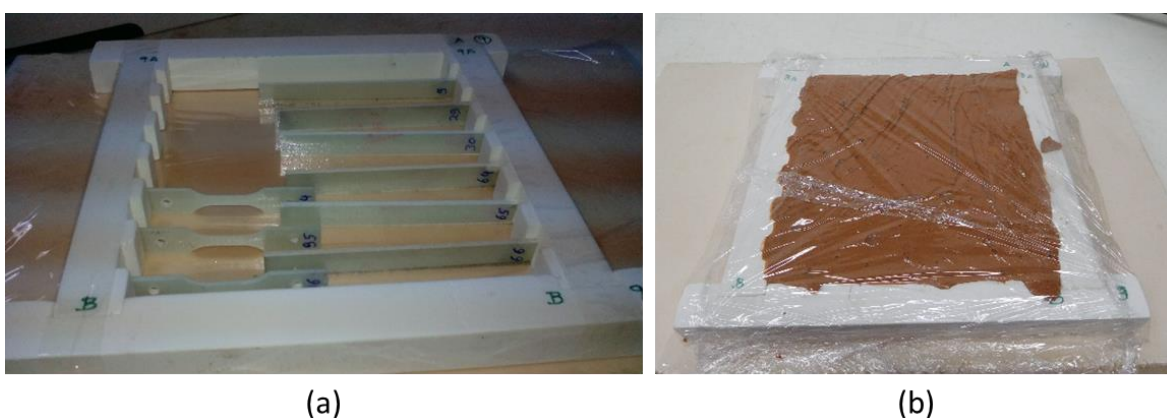


Figura 3.10. (a) Posicionamento dos provetes na caixa de imersão; (b) Caixa de imersão no final do processo de imersão.

Das nove caixas de imersão construídas para estes ensaios, preencheram-se três com argamassa de metacaulino e as restantes seis com argamassa de cimento. Passado um período de espera de vinte e quatro horas, para que as soluções solidificassem o suficiente a permitirem o manuseamento das caixas, colocaram-se três das caixas com argamassa de cimento num recipiente com água (Figura 3.11 (a)), com o objetivo de simular situações onde a argamassa está em contacto com a água durante o seu tempo de vida útil, como são exemplo os pilares de pontes e as barragens. Estas caixas permaneceram mergulhadas em água até ao fim do seu respetivo período de imersão, sendo a água do recipiente mudada a cada 10 dias.

No final de cada período de imersão, removeram-se os provetes partindo a solução em que estes estavam imersos com o auxílio de um martelo e um escopro (Figura 3.11 (b)), sendo de seguida limpos com papel de forma a não alterar as suas propriedades.



Figura 3.11. (a) Caixas de argamassa de cimento em água; (b) Remoção dos provetes.

3.3. Ensaios realizados

No final de cada período de imersão, e após o processo de limpeza, procedeu-se ao estudo das propriedades em análise para cada provete. Este estudo começou pela medição da massa, da rugosidade e da dureza dos provetes, sendo estes de seguida sujeitos aos seus ensaios específicos. Após a realização dos ensaios destrutivos, fotografaram-se os provetes com o objetivo de analisar visualmente a sua zona fraturada. Em conformidade com o referido anteriormente, realizou-se este mesmo estudo nos nove provetes (três para cada tipo de ensaio) não imersos em qualquer solução, para efeitos de controlo.

De seguida são descritos os procedimentos e equipamentos utilizados em cada um dos passos anteriormente referenciados.

3.3.1. Medição da massa

A medição da massa de cada provete realizou-se antes e após a sua imersão, utilizando uma balança com uma precisão ao nível das décimas de miligrama. Após a realização destas medições procedeu-se à análise da variação de massa de cada provete por aplicação da equação (3.1). Nesta equação m_r representa a percentagem da variação da massa do provete e m_i e m_f o valor da massa do provete antes e após a sua imersão, respetivamente.

$$m_r = \frac{m_f - m_i}{m_i}. \quad (3.1)$$

3.3.2. Medição da rugosidade

A medição da rugosidade dos provetes foi possível com a utilização de um rugosímetro. No decorrer do presente estudo fez-se uso do rugosímetro do DEMUC, modelo SJ-500 do fabricante Mitutoyo, com o qual se mediram os valores da rugosidade média, R_a , da rugosidade média quadrática, R_q , e a altura média pico a vale, R_z , de cada provete. Estas medições realizaram-se em múltiplas zonas de cada provete de forma a se obter uma noção global da rugosidade.

3.3.3. Medição da dureza

A dureza de um material pode ser definida como a resistência à deformação plástica que este apresenta. Para se estudar o efeito das soluções nesta propriedade do material em estudo, realizou-se um ensaio de ultra-microdureza, onde se mediu a dureza *Vickers* (HV) de cada provete. Este é um ensaio não destrutivo, onde é aplicado um carregamento ao material, com um indentador, criando neste uma indentação. Assim, sabendo o valor da carga aplicada, P , e da área projetada da indentação, A_c , por esta provocada, obtem-se o valor da dureza, H , pela seguinte equação:

$$H = \frac{P}{A_c}. \quad (3.1)$$

Para realização do ensaio de ultra-microdureza utilizou-se o equipamento FISHERSCOPE H100 (Figura 3.12) constituído por um computador, um indentador, um microscópio de posicionamento e por um sistema de aquisição de dados. A realização deste ensaio começa com a visualização do provete com o microscópio, assegurado assim o correto posicionamento do indentador, sendo de seguida iniciado o processo de carregamento. Os dados obtidos são visualizados no computador conectado ao indentador através do sistema de aquisição de dados.

Com este ensaio pretende-se analisar o efeito das soluções no constituinte mais frágil do compósito, como tal, realizaram-se ensaios de teste, com diferentes valores para o carregamento, de forma a minimizar o efeito das fibras nos valores obtidos. A carga aplicada nos ensaios realizados foi de 150 mN.



Figura 3.12. Equipamento utilizado para a medição da dureza dos provetes.

3.3.4. Ensaio de impacto longitudinal

O ensaio de impacto longitudinal é um método utilizado para avaliar a resistência do material de um provete quando este é sujeito a um impacto na sua direção longitudinal. Este é um ensaio destrutivo e, como tal, possibilita a quantificação da resiliência de um provete e da sua capacidade de absorção de energia até à rotura. Não é um método até agora muito utilizado pelos restantes autores, pelo que os resultados a serem obtidos não podem ser alvo de grandes comparações com outros valores. Por isso, estes resultados serem da extrema importância para a avaliação da integridade estrutural de compósitos submetidos a efeitos ambientais.

Estes ensaios realizaram-se no DEMUC, com recurso ao equipamento CEAST-9050, do fabricante INSTRON, onde foram instalados os acessórios específicos a este tipo de teste. Na Figura 3.13 (a) apresenta-se a base de apoio do provete e na Figura 3.13 (b) o martelo de impacto pendular instalado no equipamento. O martelo utilizado neste ensaio tem uma energia de 25J e código 7600.325.



Figura 3.13. Acessórios utilizados no ensaio de impacto longitudinal: (a) Base de apoio; (b) Martelo de impacto.

Antes da realização deste ensaio o equipamento é calibrado e o provete é fixo à peça de impacto, tendo esta a função de transmitir o movimento do martelo ao provete. De forma a facilitar a fixação do provete à peça de impacto e a garantir o seu correto posicionamento é utilizado o equipamento guia que se mostra na Figura 3.14 (a). Por fim, o conjunto provete/peça de impacto é posicionado na base de apoio sendo inseridos os valores das dimensões do provete no software do equipamento. O martelo é colocado na sua posição de repouso, fazendo um ângulo de 150° com a vertical como demonstrado na Figura 3.14 (b).

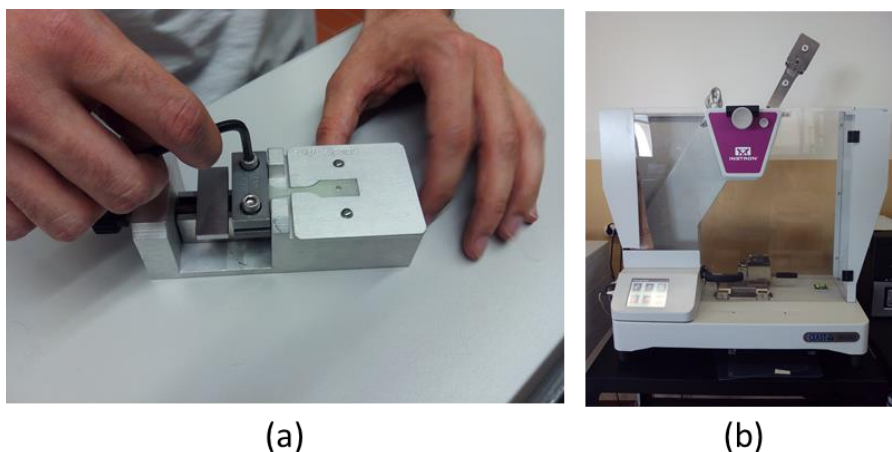


Figura 3.14. (a) Fixação do provete à peça de impacto no equipamento guia; (b) Equipamento preparado para a realização de um ensaio.

O ensaio realiza-se soltando o martelo da sua posição de repouso que de seguida executa um percurso pendular e choca com a peça de impacto, provocando a rotura do provete. Após o ensaio, o software do equipamento fornece os valores da resiliência [kJ/m^2], da energia de impacto [J] e da energia absorvida pelo provete [%].

3.3.5. Ensaio de impacto transversal

Para a realização deste ensaio fez-se uso do mesmo equipamento utilizado no ensaio de impacto longitudinal, substituindo os acessórios para este instalados por acessórios específicos ao ensaio de impacto transversal. Foi necessário a colocação de uma nova base de suporte (Figura 3.15 (a)) e um martelo (Figura 3.15 (b)), de 5J, designado com o código 7601.005.1. Para além destes acessórios utilizou-se também um sistema de aquisição de

dados, modelo CEAST DAS 8000 *Junior* do fabricante INSTRON, que faz a ligação entre o equipamento de ensaio e um computador equipado com um programa onde é possível controlar os parâmetros do ensaio e retirar os dados obtidos. Na Figura 3.16 (a) são apresentados todos os equipamentos e acessórios utilizados na realização deste tipo de ensaio.

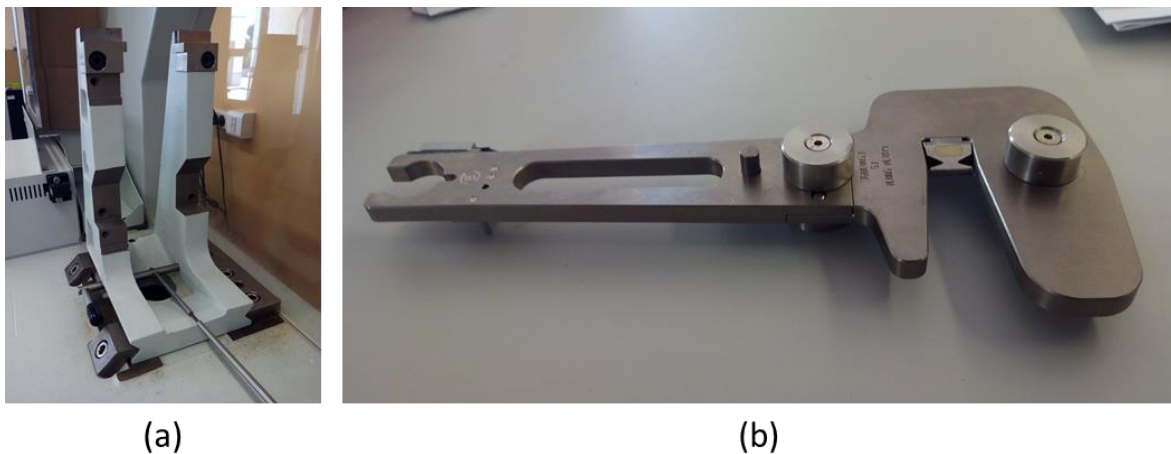


Figura 3.15. (a) Base de apoio; (b) Martelo de impacto.

O ensaio de impacto transversal é um ensaio destrutivo, podendo ocorrer, ou não, rotura total do provete em estudo. No caso do provete ensaiado não sofrer rotura total, significa que este não absorveu a energia necessária para a sua rotura.

À semelhança do ensaio de impacto longitudinal antes do início dos testes o equipamento é calibrado. De seguida posiciona-se o provete na base de apoio e introduz-se o valor das suas dimensões no programa. Por fim, com o sistema preparado, liberta-se o martelo da sua posição de repouso, permitindo que este embata no centro do provete. Na Figura 3.16 (b) apresenta-se um dos provetes que foi sujeito ao ensaio de impacto transversal.



Figura 3.16. (a) Equipamentos utilizados na realização do ensaio de impacto transversal; (b) Provete após ter sido sujeito ao ensaio.

3.3.6. Ensaio de flexão em três pontos

O ensaio de flexão em três pontos realizou-se no DEMUC, utilizando o equipamento SHIMADZU AUTOGRAPH AG-10. Este equipamento tem instalado uma célula de carga de 5kN e é controlado através de um computador com o programa informático TRAPEZIUM. Na Figura 3.17 (a) apresentam-se os equipamentos utilizados neste ensaio.

Para se proceder a este tipo de ensaio o provete é posicionado no equipamento e é introduzido o valor das suas dimensões no programa informático. O suporte do provete (Figura 3.17 (b)) tem uma distância entre apoios com uma dimensão 16 vezes superior ao valor da espessura do provete nele apoiado.

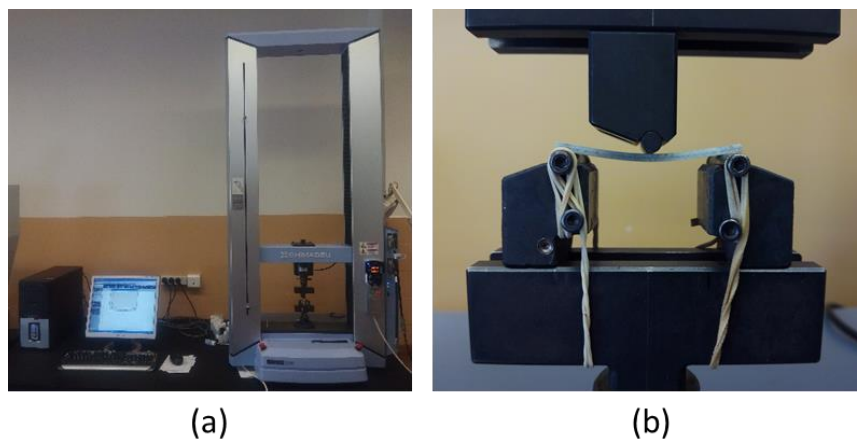


Figura 3.17. (a) Equipamentos utilizados na realização do ensaio de flexão em três pontos; (b) Ensaio de flexão em 3 pontos

Após a realização do ensaio, obtêm-se os valores da carga aplicada ao provete e do deslocamento. Com estes valores calcula-se a tensão normal, σ , através da equação (3.3), onde P é a carga aplicada, L é a distância entre apoios, b é largura do provete e h é a espessura do provete.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}. \quad (3.3)$$

3.3.7. Morfologia do dano

Para se conseguir perceber melhor a dimensão e extensão do dano provocado pelos ensaios realizados, fotografaram-se as zonas afetadas de cada provete utilizando um microscópio estereoscópio trinocular, conectado a uma câmara fotográfica digital. O microscópio utilizado para este efeito é um modelo Stemi 2000-c do fabricante Carl ZEISS, sendo este capaz de uma ampliação de 5x e uma focagem macrométrica ou micrométrica. A câmara fotográfica digital é um modelo POWERSHOT G5 do fabricante CANON, capaz de uma ampliação de 16x. Ligado a esta câmara está um computador equipado com um programa que permite gravar e avaliar a qualidade das fotografias retiradas. Na Figura 3.18 apresentam-se os equipamentos referidos.



Figura 3.18. Equipamentos utilizados para a avaliação visual do dano dos provetes.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

No capítulo que se segue apresentam-se e analisam-se os resultados experimentais obtidos através das medições e dos ensaios realizados. A estrutura deste capítulo segue a ordem cronológica em que foi realizado o procedimento experimental, começando-se pela medição da massa, rugosidade e dureza, seguindo-se os ensaios de impacto longitudinal e transversal. O capítulo termina com a análise dos resultados obtidos através do ensaio de flexão em três pontos.

4.1. Variação de massa

A primeira análise a realizar é a medição da massa de todos os provetes antes e após a imersão nas soluções. Na Figura 4.1 é apresentada a variação de massa dos provetes provocada após imersão nas soluções, em função dos períodos de imersão. Por análise desta figura verifica-se que os provetes imersos nas três soluções registam um aumento no valor da massa entre o provete de controlo e os provetes imersos durante 30 dias. Após os 30 dias, a variação de massa dos provetes imersos em argamassa de cimento e argamassa de metacaulino apresenta um decréscimo até aos 90 dias. No caso dos provetes imersos em argamassa de cimento em água observa-se um aumento da variação de massa até aos 60 dias, diminuindo de seguida entre os 60 e os 90 dias.

A maior variação de massa ocorre no caso da argamassa de cimento em água, que pode ser justificada pela presença de água no interior das amostras, visto que a pesagem foi efetuada logo após as amostras serem retiradas das soluções e limpas.

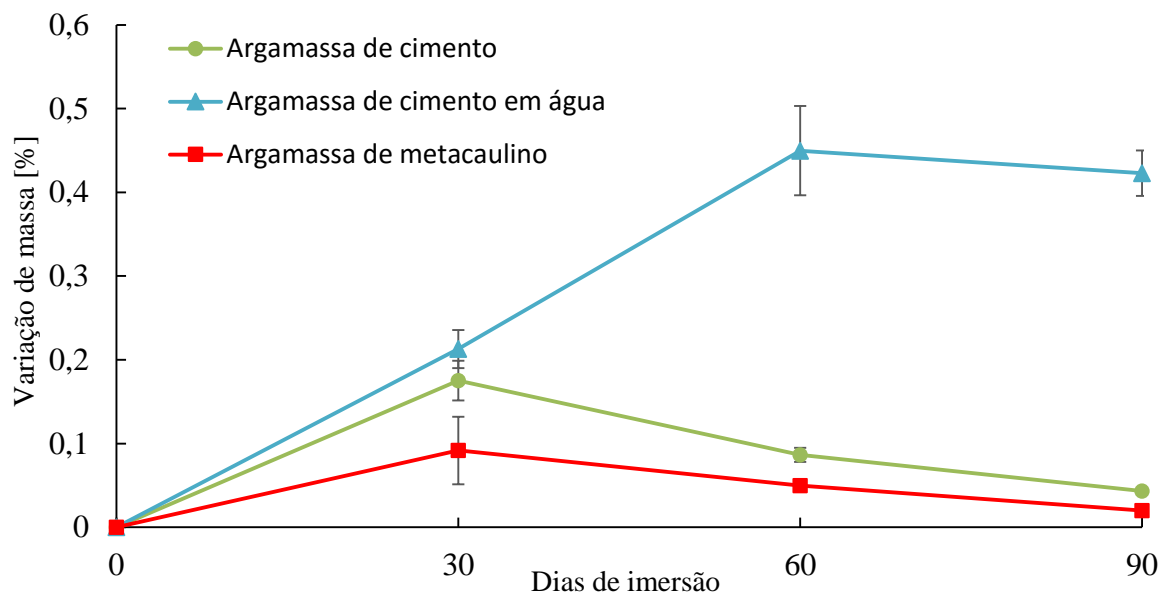


Figura 4.1. Variação da massa dos provetes ao longo dos vários períodos de imersão.

A variação de massa observada para todas as soluções é bastante pequena, não ultrapassando os 0,5 %, à semelhança do que acontece em [6] e em [15], para o caso de imersão em óleo e para o caso da absorção de humidade, respetivamente. Contudo, e apesar de não haver alterações significativas na massa dos provetes após imersos, o contacto das soluções com as amostras pode afetar a integridade estrutural dos mesmos, originando alterações nas suas propriedades mecânicas, tais como dureza, rugosidade e resistência ao impacto, como se irá constatar nos pontos seguintes.

4.2. Variação da rugosidade

Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados em termos de valor médio da medição da rugosidade dos provetes, em função da solução e do período de imersão a que foram sujeitos. Como referido no subcapítulo 3.3.2, os parâmetros de rugosidade em estudo são: a rugosidade média, R_a , a rugosidade média quadrática, R_q , e a altura média entre o pico mais alto e o vale mais baixo, R_z . O parâmetro mais usado por diversos autores na quantificação de variações na rugosidade de materiais é a rugosidade média, como tal, a análise seguinte irá focar mais este parâmetro.

Tabela 4.1. Resultados da medição da rugosidade dos provetes.

Solução	Período	R_a	R_q	R_z
	Controlo	$2,87 \pm 0,36$	$4,00 \pm 0,89$	$14,95 \pm 0,49$
Argamassa de cimento	30 dias	$2,54 \pm 0,14$	$3,08 \pm 0,19$	$13,78 \pm 0,75$
	60 dias	$2,24 \pm 0,16$	$2,64 \pm 0,28$	$12,64 \pm 1,29$
	90 dias	$2,29 \pm 0,11$	$2,61 \pm 0,34$	$12,88 \pm 0,81$
Argamassa de cimento em água	30 dias	$2,44 \pm 0,10$	$3,15 \pm 0,42$	$13,76 \pm 1,71$
	60 dias	$2,03 \pm 0,05$	$2,44 \pm 0,15$	$12,08 \pm 0,49$
	90 dias	$2,15 \pm 0,22$	$2,51 \pm 0,28$	$12,52 \pm 1,26$
Argamassa de metacaulino	30 dias	$3,20 \pm 0,29$	$4,07 \pm 0,26$	$15,96 \pm 0,42$
	60 dias	$2,99 \pm 0,22$	$4,68 \pm 0,44$	$15,44 \pm 1,53$
	90 dias	$3,01 \pm 0,21$	$4,09 \pm 0,47$	$15,02 \pm 1,02$

Por análise dos dados da Tabela 4.1 é possível avaliar o efeito que cada solução provoca nos parâmetros da rugosidade dos provetes.

Nos provetes imersos em argamassa de cimento verifica-se uma redução no valor dos parâmetros de rugosidade ao longo dos vários períodos de imersão. A rugosidade média destes provetes decresce 12% nos primeiros 30 dias de imersão, comparativamente aos valores dos provetes de controlo, e os mesmos 12% entre os 30 e os 60 dias. No último período de imersão (dos 60 aos 90 dias) este valor manteve-se praticamente inalterado. À semelhança da rugosidade média, o valor da rugosidade média quadrática dos provetes decresce ao longo dos dois primeiros períodos de imersão, mantendo-se praticamente constante entre os 60 e os 90 dias.

Os provetes sujeitos à argamassa de cimento, cujas caixas foram imersas em água, exibem uma evolução semelhante à descrita para o caso dos provetes imersos apenas em argamassa de cimento. A rugosidade média decresce 15% entre os provetes de controlo e os provetes imersos 30 dias e entre os 30 e os 60 dias decresce 17%, no entanto, a variação deste parâmetro entre os 60 e os 90 dias cresce cerca de 6%, valor que se encontra na gama do desvio padrão, pelo que se pode considerar que não sofre alteração significativa.

No caso da solução de argamassa de metacaulino, os provetes imersos durante 30 dias sofrem um aumento da sua rugosidade média de 11% e da sua rugosidade média

quadrática de 9%, comparativamente aos provetes de controlo. No período de 30 a 60 dias, verificou-se um decréscimo da rugosidade média de cerca de 7%, mantendo-se praticamente constante entre os 60 e os 90 dias.

Na Figura 4.2 representa-se graficamente os valores da rugosidade média dos provetes em função dos períodos de imersão, sendo desta forma possível analisar e comparar mais facilmente o efeito que cada solução tem neste parâmetro da rugosidade dos provetes.

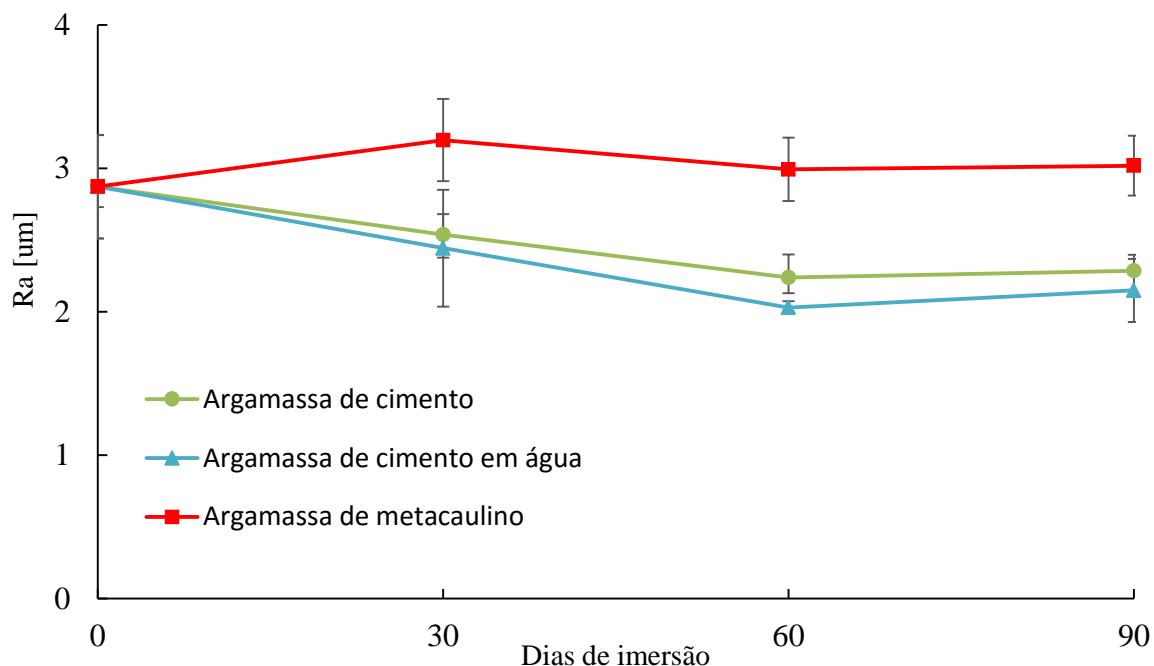


Figura 4.2. Rugosidade média dos provetes estudados, R_a , ao longo dos vários períodos de imersão.

De acordo com a Figura 4.2 pode-se verificar que os valores da rugosidade média dos provetes imersos na solução de argamassa de cimento apresentam uma variação decrescente de 20% entre os 0 e 90 dias. Como foi descrito anteriormente e é possível observar na Figura 4.2, o valor deste parâmetro entre os 60 e os 90 dias mantém-se praticamente inalterado, o que indica que o possível efeito que esta solução provoca nos provetes possa ocorrer durante o seu processo de cura, quando as reações entre os seus reagentes ainda não terminaram. Verificou-se ainda que, a cada período de imersão, o processo de limpeza dos provetes tornou-se mais trabalhoso e complexo, o que leva a crer que a diminuição do valor da rugosidade média destes se possa dever à acumulação de partículas da solução nas porosidades dos provetes, tornando a superfície dos provetes mais

uniforme. Esta possibilidade é fundamentada pelo aumento de massa que se verificou nos provetes (Figura 4.1).

Os provetes submetidos à solução de argamassa de cimento em água apresentam aos 90 dias uma diminuição de 25% do valor da sua rugosidade média comparativamente ao valor dos de controlo. Esta variação e a evolução ao longo dos períodos de imersão é idêntica ao caso da argamassa de cimento, como é possível verificar através da Figura 4.2. A semelhança nestes valores de rugosidade pode ser justificada pelo facto de estas soluções serem compostas pelos mesmos constituintes, diferindo apenas no meio onde se realizou a sua cura. Assim, devido à semelhança de evoluções, conclui-se que a imersão em água não afeta diretamente a rugosidade dos provetes, apenas retarda a cura da solução e promove o transporte de partículas até as porosidades do provete.

O valor da rugosidade média dos provetes imersos em argamassa de metacaulino aumenta cerca de 9% entre o controlo e os 90 dias. Apesar de esta variação ser baixa, por análise da Figura 4.2 e da Tabela 4.1 verifica-se que a rugosidade média dos provetes aumenta cerca de 11% entre o início do estudo e os 30 dias, podendo este aumento dever-se ao facto de esta solução ser constituída por hidróxido de sódio e silicato de sódio, soluções alcalinas que podem afetar a matriz deste tipo de compósitos em estudo, conforme observado por Amaro *et al* [10]. Dos 30 aos 60 dias de imersão verifica-se um pequeno decréscimo de 6%, sendo que no último período de estudo (60 a 90 dias) os valores mantêm-se praticamente constantes. Os provetes imersos nesta solução apresentam os maiores valores de rugosidade, sendo os únicos para os quais se deteta um aumento nos valores de rugosidade quando comparados com os provetes de controlo.

Estas constatações podiam ser avaliadas de forma mais concreta caso tivesse sido possível observar o que se passa no interior da amostra, isto é, de que forma as soluções atacam a matriz e as fibras, por recurso a uma inspeção por Microscopia Eletrónica de Varrimento (SEM), a qual não foi possível realizar durante o período em que decorreu este trabalho.

4.3. Variação da dureza

A Tabela 4.2 apresenta os resultados médios da dureza Vickers (H) da matriz dos provetes, de acordo com a solução em que estes foram imersos e o seu respetivo período de imersão. A medição, pela qual se obtiveram os valores de seguida apresentados, realizou-se através de um ensaio de ultra-microdureza, como referido no capítulo 3.

Tabela 4.2. Resultados da avaliação da dureza dos provetes.

Solução	Período	H [GPa]
	Controlo	0,29
Argamassa de cimento	30 dias	0,35
	60 dias	0,29
	90 dias	0,28
Argamassa de cimento em água	30 dias	0,3
	60 dias	0,29
	90 dias	0,28
Argamassa de metacaulino	30 dias	0,29
	60 dias	0,28
	90 dias	0,23

Através da análise dos dados apresentados na Tabela 4.2 é possível compreender o efeito que as soluções em estudo têm na dureza dos provetes. Para o caso da argamassa de cimento, os provetes imersos durante 30 dias apresentam um aumento do valor da sua dureza de cerca de 21% em relação ao valor registado para os provetes de controlo. Este valor decresce nos períodos seguintes, 17% entre os 30 e os 60 dias e 3% entre os 60 e os 90 dias, ou seja, para este último intervalo de tempo pode-se considerar que a dureza se mantém constante. A variação deste parâmetro entre os provetes de controlo e os provetes imersos durante 30 dias é discrepante, quando comparada com os restantes períodos e soluções, pelo que não se obteve justificação para esta ocorrência. Em termos de procura de resposta para este facto na literatura também não se conseguiu, atendendo que não existem trabalhos

publicados na bibliografia que analisem o efeito de soluções cimentícias na dureza de compósitos de vidro/epóxico. Por sua vez, os provetes imersos em argamassa de cimento em água apresentam uma variação de cerca 3%, dentro da gama de erro, em todos os períodos, aumentando o valor da dureza entre o controle e os 30 dias e decrescendo nos restantes dois períodos. Os provetes imersos em argamassa de metacaulino exibem uma evolução semelhante aos provetes imersos em argamassa de cimento em água apresentando, no entanto, valores inferiores para esta solução em todos os períodos de imersão. A variação mais significativa da dureza nos provetes imersos em argamassa de metacaulino ocorreu no período de 60 a 90 dias, com um valor na ordem dos 18%. Para uma melhor compreensão das variações anteriormente descritas, as mesmas são representadas graficamente na Figura 4.3, em função dos períodos de imersão e das soluções em que os provetes foram imersos.

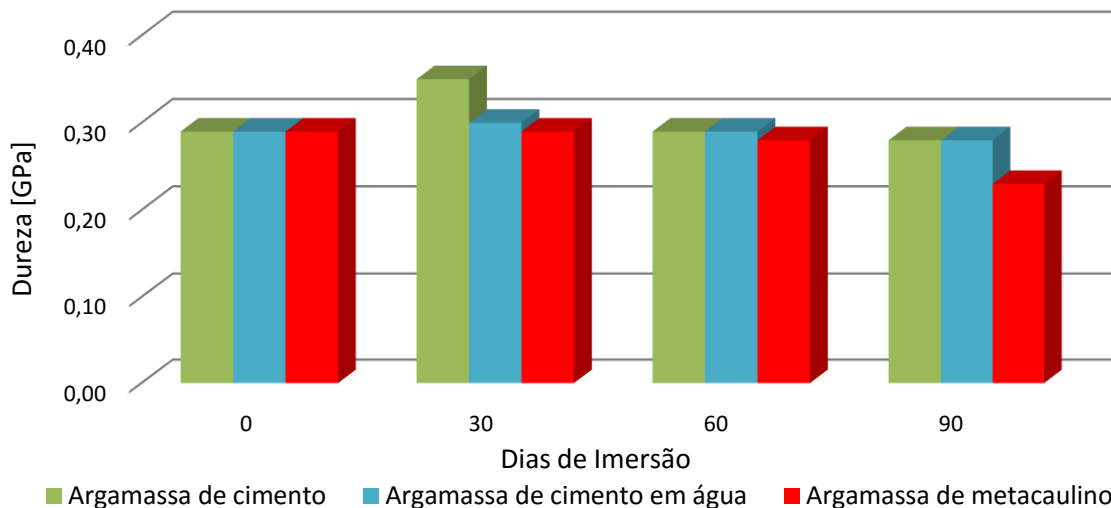


Figura 4.3. Evolução da dureza *Vickers* dos provetes estudados ao longo dos vários períodos de imersão.

Por análise da Figura 4.3 verifica-se que, de entre as três soluções utilizadas neste estudo, a argamassa de cimento em água é a solução que aparenta exercer menor influência nos valores da dureza do laminado ao longo dos períodos de imersão. Contudo, as variações obtidas para a propriedade em estudo não são significativas, verificando-se que a dureza da matriz do compósito mantém-se aproximadamente igual a 0,29 *GPa* ao longo dos períodos de imersão.

Como o valor da dureza dos provetes é idêntico entre as soluções e ao longo dos vários períodos de imersão, as curvas típicas de indentação destes provetes também são semelhantes. Assim, apresenta-se na Figura 4.4 apenas a curva típica de indentação dos

provetes imersos em argamassa de cimento em água e, de forma a possibilitar uma análise comparativa, a curva dos provetes de controlo. Nestas curvas a carga aplicada no provete é dada em função da profundidade da indentação, por esta provocada.

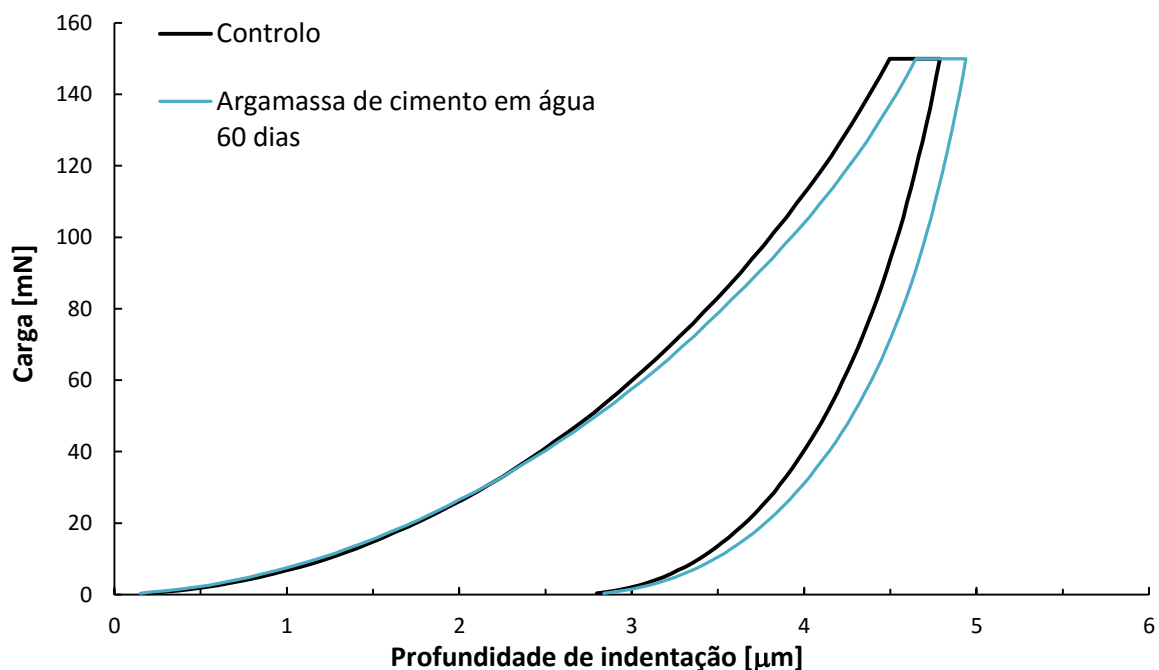


Figura 4.4. Comparação das curvas de indentação para o controlo e os provetes imersos 60 dias na solução de argamassa de cimento em água.

A análise da Figura 4.4 permite concluir que, admitindo que não foi indentada nenhuma fibra durante os ensaios, a presença de água na argamassa de cimento não provoca variações na dureza da matriz do compósito.

É importante referir que durante a realização dos ensaios detetaram-se zonas dos provetes muito duras, em oposição ao efeito das soluções de argamassa de metacaulino e de argamassa de cimento, principalmente para os tempos de 30 e 60 dias. Estas zonas podem refletir a resposta do reforço no material compósito o que, assim sendo, pode significar que houve uma degradação da matriz do laminado em determinadas áreas.

Conforme referido no ponto anterior, por limitações de tempo os provetes não foram analisados por SEM. Tal permitiria extrair informações da morfologia dos provetes no tempo e nas várias soluções de ataque, quer em secção transversal quer em superfície que poderia ajudar na explicação das alterações observadas na sua resposta mecânica.

4.4. Ensaio de impacto longitudinal

Através da realização do ensaio de impacto longitudinal é possível descrever a evolução das propriedades mecânicas do material em estudo quando sujeito a um impacto na sua direção longitudinal. As propriedades analisadas no presente estudo foram a resiliência e a energia absorvida, sendo as suas variações apresentadas na Figura 4.5 e na Figura 4.6, respetivamente. A resiliência de um material caracteriza a capacidade que este têm em absorver energia mecânica, enquanto que a energia absorvida é a percentagem de energia que o provete absorve durante o ensaio, sendo dada pela diferença entre a energia total aplicada ao provete pelo martelo e a energia dissipada (ou energia elástica). Dado o material não ter capacidade de retomar a sua forma original, a percentagem de energia absorvida pelo provete está diretamente relacionada com o dano que o material apresenta quando é sujeito ao impacto. Assim, quanto maior for a percentagem de energia absorvida pelo provete maior será o dano que o mesmo apresenta.

Durante os primeiros 30 dias verificou-se que, independentemente da solução, a resiliência dos provetes diminuiu, sendo o maior decréscimo observado para os provetes imersos na solução de metacaulino, cerca de 34%, quando comparados com os provetes de controlo. Para a argamassa de cimento e argamassa de cimento em água, a variação deste parâmetro é de 16% e 24%, respetivamente. Estas variações podem ser justificadas pela reação entre os provetes e os constituintes das argamassas, bem como devido à humidade a que estes são sujeitos durante o processo de cura das soluções. Entre os 30 e os 60 dias, a resiliência dos provetes imersos em argamassa de cimento e em argamassa de metacaulino continua a diminuir, apresentando uma variação de 21% e 6%, respetivamente. Quanto à argamassa de cimento em água, não se verifica qualquer variação no valor da resiliência. No último período do estudo (entre os 60 e os 90 dias), a resiliência dos provetes imersos em argamassa de cimento em água e argamassa de metacaulino volta a decrescer em relação ao período anterior cerca de 18% e 10%, respetivamente. No caso da argamassa de cimento, o valor da resiliência dos provetes mantém-se aproximadamente constante, com uma variação de apenas 3% em relação ao período anterior.

Comparando o comportamento que os provetes apresentam em termos de resiliência e o valor da energia por estes absorvida, verifica-se que estas propriedades apresentam variações opostas ao longo dos períodos de imersão. Tal seria de esperar pois,

quanto menor a energia absorvida, menor será o dano provocado nos provetes, logo menos efeito será observado na diminuição da integridade estrutural dos provetes.

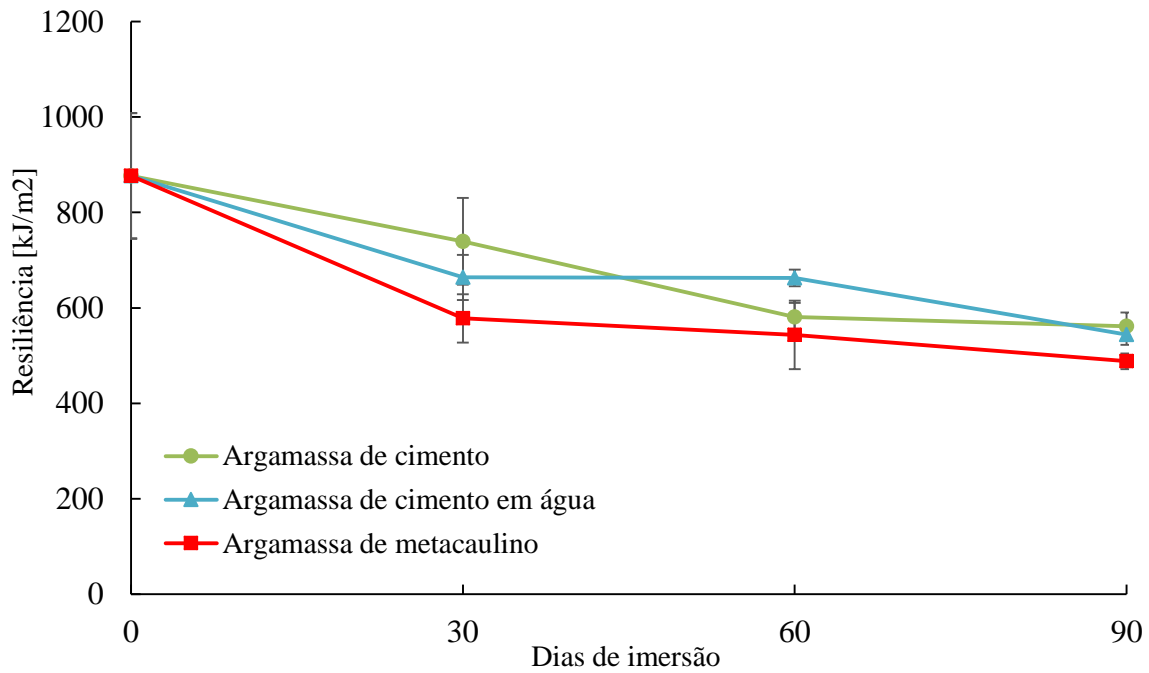


Figura 4.5. Variação da resiliência dos provetes submetidos ao ensaio de impacto longitudinal, ao longo dos vários períodos de imersão.

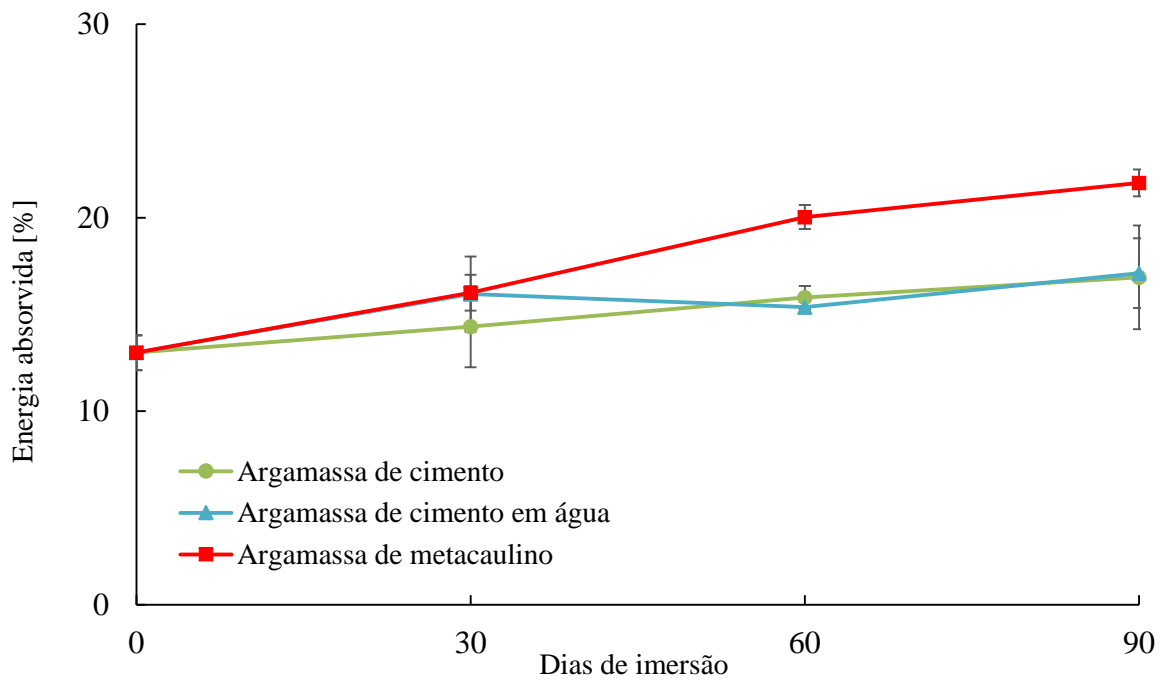


Figura 4.6. Variação da energia absorvida pelos provetes submetidos ao ensaio de impacto longitudinal, ao longo dos vários períodos de imersão.

As variações observadas nas figuras anteriores podem ser justificadas pela degradação da matriz e do reforço do compósito, conforme ilustrado na Figura 4.7, onde é feita a comparação entre o dano visualizado nos provetes imersos durante 90 dias nas diferentes soluções.

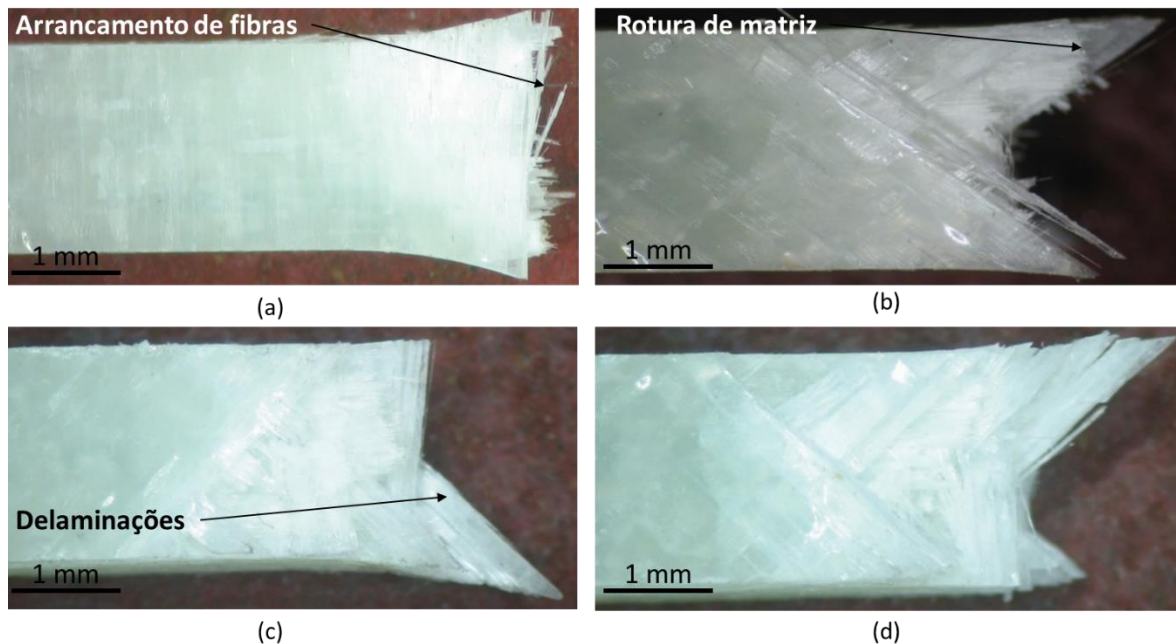


Figura 4.7. Dano nos provetes imersos durante 90 dias após o ensaio de impacto longitudinal: (a) controlo; (b) argamassa de cimento, (c) argamassa de cimento em água, (d) argamassa de metacaulino.

Da Figura 4.7 é possível observar-se que o maior dano ocorreu nos provetes imersos em argamassa de metacaulino, onde é claramente visível a rotura de matriz, arrancamento de fibras e delaminações, quando comparados com as outras 3 figuras (Figura 4.7 (a), (b) e (c)). Os defeitos apresentados pelos provetes imersos em argamassa e em argamassa com água são praticamente idênticos, sendo no entanto superiores ao dano dos provetes de controlo. Assim, será de esperar que o valor de resiliência seja superior no caso dos provetes de controlo e que o menor valor seja observado para o caso dos provetes imersos em metacaulino durante 90 dias, o que é confirmado pelos resultados apresentados na Figura 4.5. Tal como referido anteriormente, quanto maior o dano maior é o valor de energia absorvida, o que se pode confirmar pelos resultados apresentados na Figura 4.6. O mesmo comportamento é observado por os restante provetes analisados.

Através da análise dos resultados obtidos pela realização deste ensaio, pode concluir-se que:

- A presença de água na argamassa de cimento aumenta o efeito desta solução na degradação dos provetes e, por consequência, diminui o desempenho do compósito quando sujeito a um impacto na direção longitudinal do seu empilhamento;
- A argamassa de metacaulino é a solução que mais afeta a integridade estrutural do compósito em estudo, pois os provetes nesta imersos apresentam uma maior variação de resiliência e de energia absorvida que os provetes imersos nas restantes soluções.

4.5. Ensaio de impacto transversal

À semelhança do ensaio anterior, com a realização do ensaio de impacto transversal é possível obter o valor da resiliência do material em teste. A Figura 4.8 apresenta graficamente a variação desta propriedade ao longo dos períodos de imersão das várias soluções.

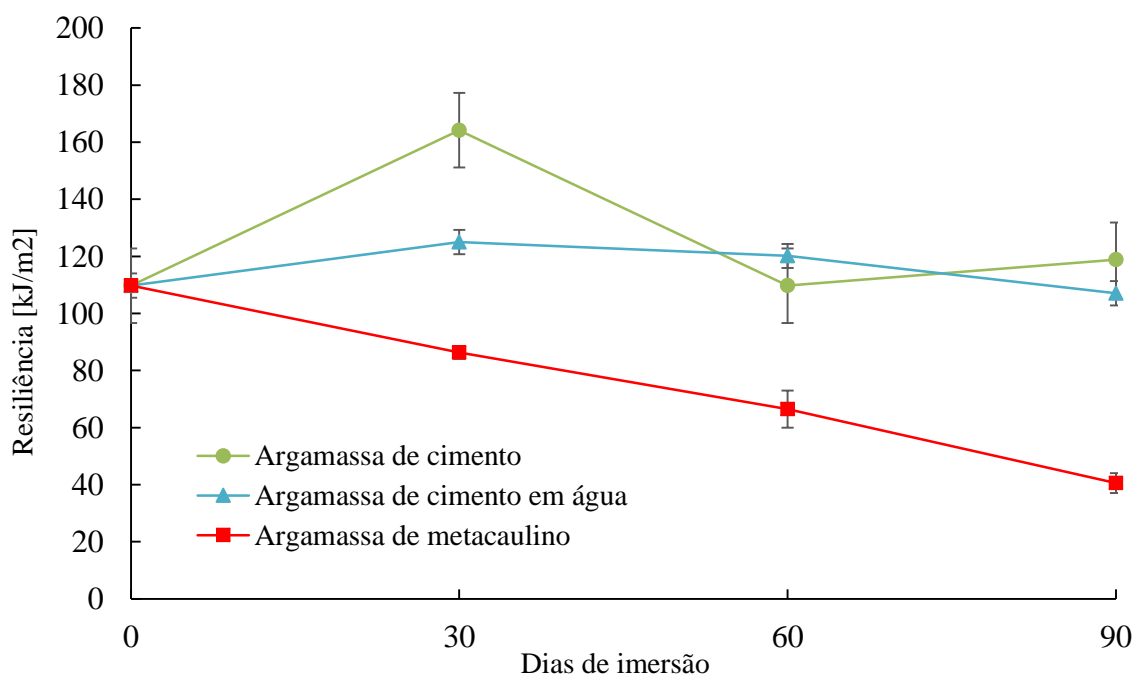


Figura 4.8. Variação da resiliência dos provetes submetidos ao ensaio de impacto transversal, ao longo dos vários períodos de imersão.

Por análise da figura anterior verifica-se que as soluções provocam diferentes efeitos na capacidade do material compósito responder à solicitação por impacto na direção transversal. Os provetes imersos em argamassa de cimento apresentam no final do último período de estudo (entre o controlo e os 90 dias de imersão) um aumento da sua resiliência na ordem dos 8%. O valor desta propriedade aos 30 dias é muito superior ao registado nos restantes períodos, não existindo aparente explicação para tal. No entanto, o facto de se observar um decréscimo do valor da energia absorvida (Figura 4.9) e de se verificar que a dureza apresenta uma tendência semelhante, pode justificar o valor obtido para esta propriedade. No caso da argamassa de cimento em água, a variação do valor da resiliência dos provetes é relativamente baixa ao longo dos períodos de imersão, apresentando aos 90 dias um decréscimo de cerca de 2%, comparativamente ao valor do provete de controlo. Os provetes imersos em argamassa de metacaulino apresentam um decréscimo do valor da sua resiliência ao longo de todos os períodos de imersão, verificando-se aos 90 dias uma variação na ordem dos 63% em relação ao controlo.

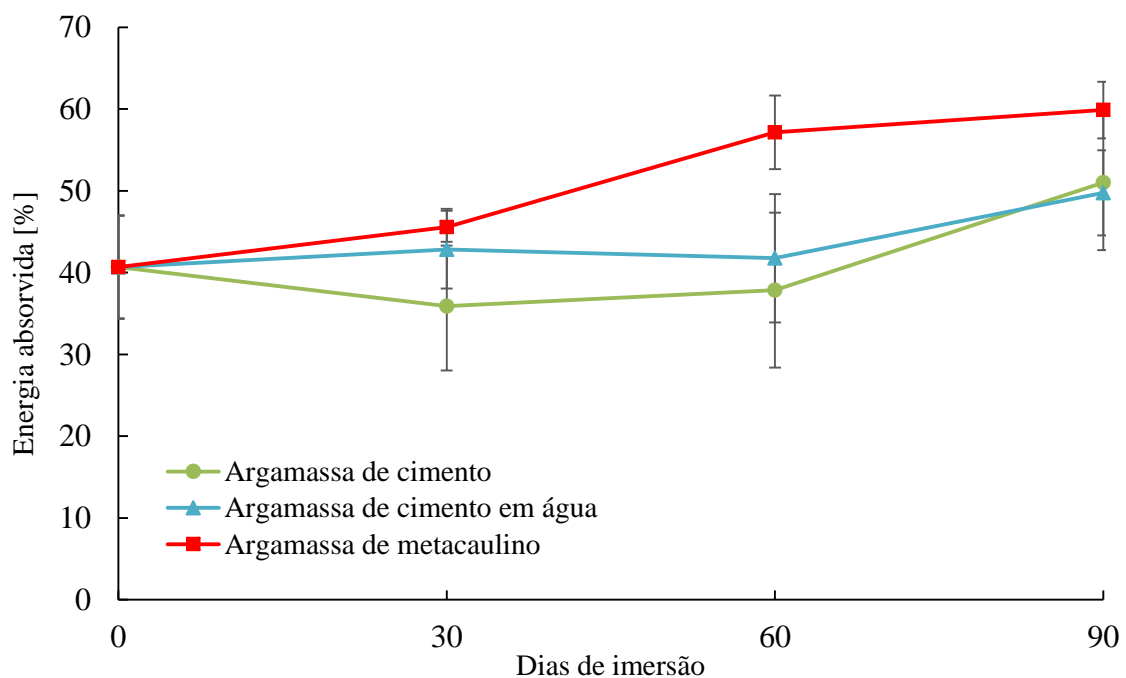


Figura 4.9. Variação da energia absorvida dos provetes submetidos ao ensaio de impacto transversal, ao longo dos vários períodos de imersão.

As variações descritas anteriormente podem ser justificadas através da análise visual da morfologia do dano dos provetes, como tal, na Figura 4.10 apresenta-se o dano

provocado por este ensaio nos provetes de controlo e nos provetes imersos em argamassa de cimento ao longo dos vários períodos de imersão. Analisando o dano associado ao provete de controlo (Figura 4.10 (a)), verifica-se a ocorrência de rotura no interior da matriz, fissuração das fibras e delaminação entre camadas. O provete imerso durante 30 dias (Figura 4.10 (b)) apresenta um dano relativamente inferior quando comparado com o provete de controlo, o que está em conformidade com o aumento do valor da resiliência e a diminuição da quantidade de energia absorvida verificado nas figuras anteriores. Em relação ao provete imerso durante 30 dias, o provete imerso durante 60 dias (Figura 4.10 (c)) apresenta um dano superior, apresentando semelhanças ao dano verificado no provete de controlo. Como tal, esta pode ser a justificação para a semelhança entre o valor das propriedades do provete imerso 60 dias e o provete de controlo. No caso do provete imerso 90 dias (Figura 4.10 (d)) verifica-se que a variação do dano ocorrido é pouco significativa, comparativamente ao provete imerso 60 dias, daí a variação da resiliência e da energia absorvida entre estes dois períodos não ser elevada.

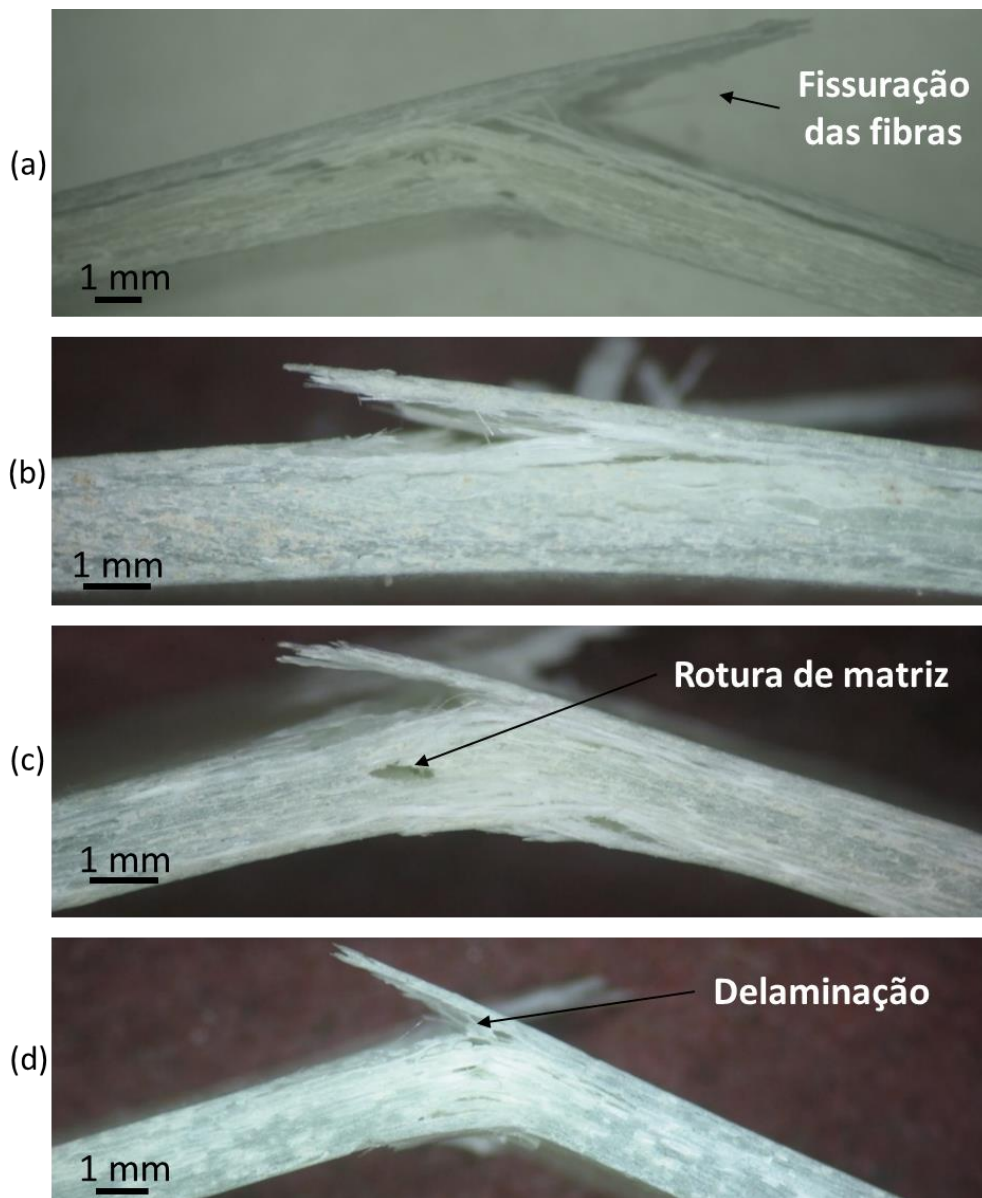


Figura 4.10. Dano nos provetes imersos em argamassa de cimento após o ensaio de impacto transversal: (a) controle; (b) 30 dias; (c) 60 dias; (d) 90 dias.

A Figura 4.11 apresenta o dano nos provetes imersos durante 90 dias nas diferentes soluções. Para a argamassa de cimento em água verifica-se que os provetes apresentam rotura no interior da matriz e fissuração das fibras, bem como alguma delaminação. Este tipo de dano é idêntico na argamassa de cimento, o que pode justificar a proximidade entre os valores da resiliência e energia absorvida dos provetes imersos nestas soluções. Como no caso das soluções anteriores, os provetes imersos em argamassa de metacaulino apresentam rotura de matriz e fissuração das fibras, contudo, verifica-se

também a ocorrência de propagação de fenda ao longo do provete, e uma extensa zona delaminada. Este tipo de dano promove a diminuição da capacidade do provete responder à solicitação exterior, como tal, o valor da resiliência dos provetes deve diminuir, o que se verifica na Figura 4.8.

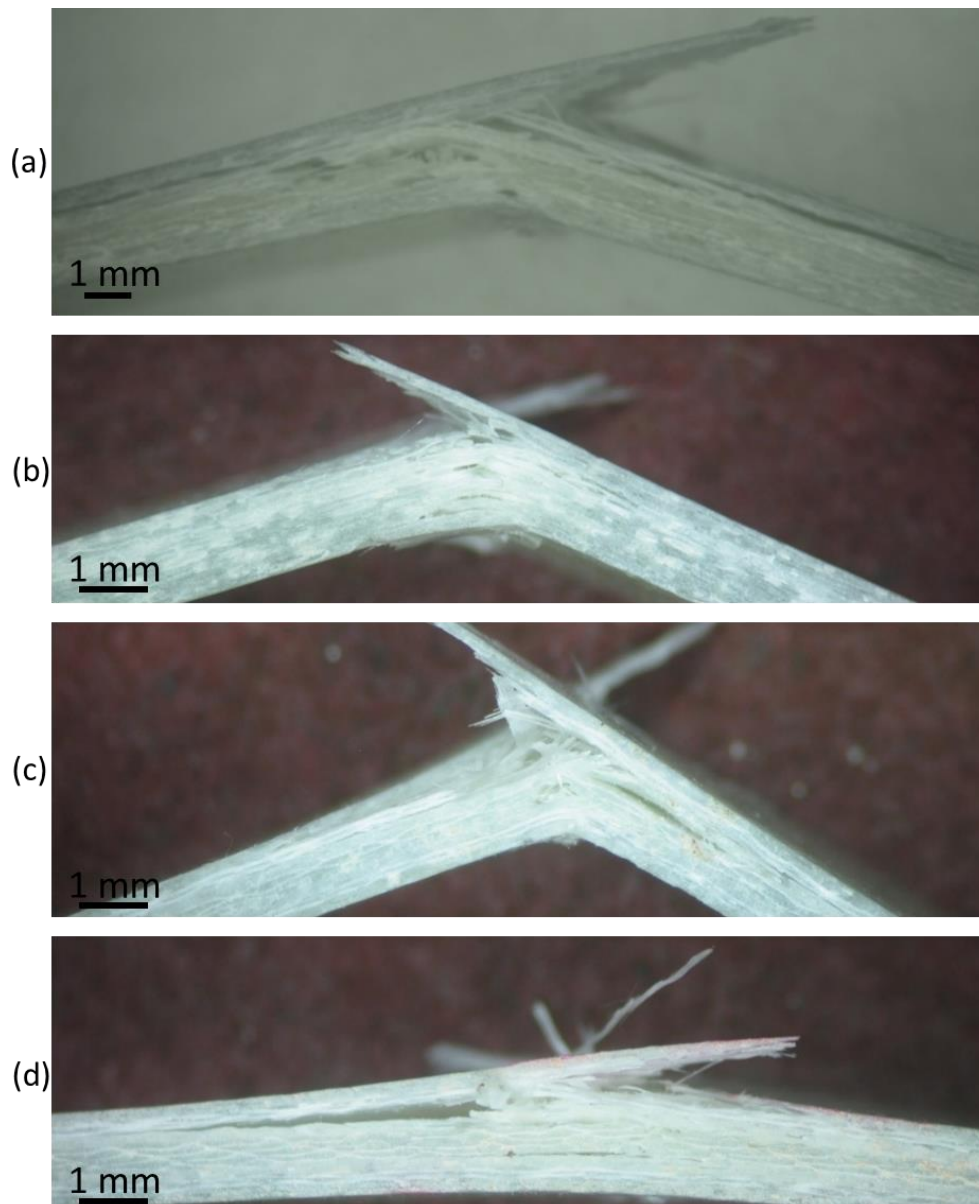


Figura 4.11. Dano nos provetes imersos durante 90 dias após o ensaio de impacto transversal: (a) Controlo; (b) argamassa de cimento; (c) argamassa de cimento em água; (d) argamassa de metacaulino.

Com a realização do ensaio de impacto transversal pode concluir-se que:

- A degradação motivada pela presença de água na argamassa de cimento não provoca alterações significativas no desempenho do compósito em estudo, quando sujeito a impacto;
- A argamassa de metacaulino é a solução mais agressiva para o compósito, ocorrendo nestes provetes a maior variação de resiliência e energia absorvida registada.

4.6. Ensaio de flexão em três pontos

O ensaio de flexão em três pontos é um dos testes mais sensíveis a variações provocadas nos provetes por condições de degradação externa, sendo por esta razão muito utilizado pelos diversos investigadores. Com a realização deste ensaio obtém-se o valor da tensão de flexão em cada um dos casos em análise, de acordo com a equação (3.3).

Na Figura 4.12 apresenta-se a variação da tensão em função do deslocamento para o caso dos provetes imersos nas diferentes soluções durante 30 dias, sendo ilustrativa do que se verifica nos restantes tempos de imersão.

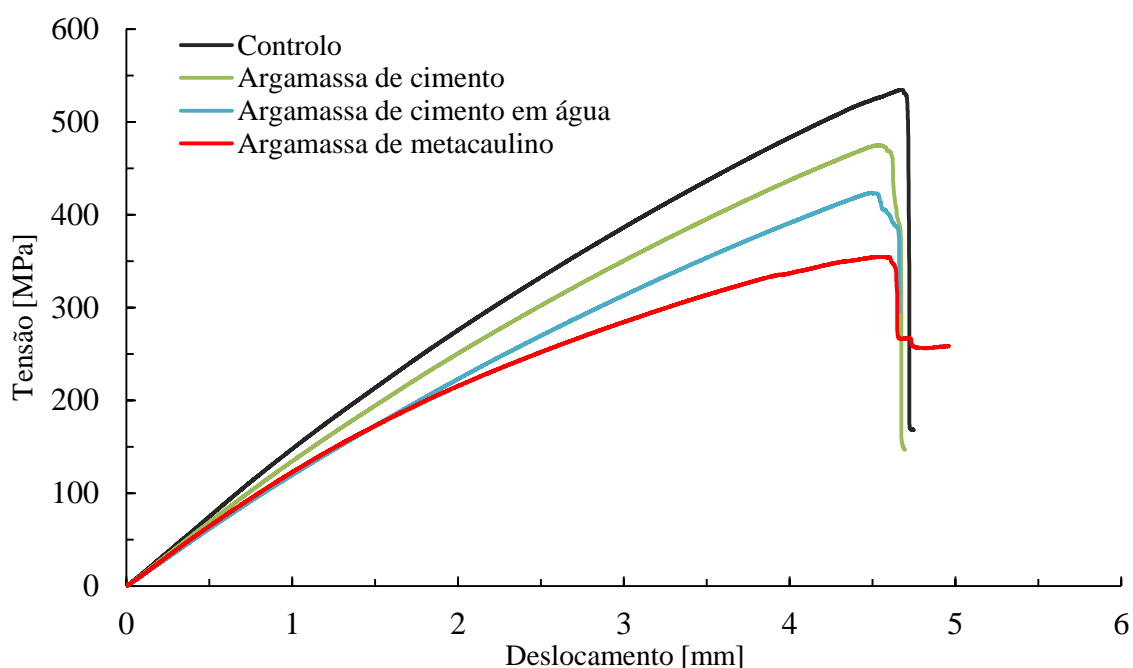


Figura 4.12. Variação da tensão de flexão dos provetes imersos durante 30 dias nas diferentes soluções.

Como se pode observar da Figura 4.12, o maior valor da tensão foi obtido no provete de controlo, apresentando todos os provetes imersos em soluções um decréscimo do valor da tensão em relação ao controlo. A maior variação do valor da tensão em relação ao controlo ocorre nos provetes imersos em argamassa de metacaulino, com um decréscimo de cerca de 47 %. Por análise desta figura constata-se ainda que, para um período de imersão de 30 dias, todos os provetes apresentam curvas com a mesma forma, verificando-se uma variação linear até a ocorrência de rotura.

Apresenta-se na Figura 4.13 a variação da tensão em função do deslocamento sofrida pelos provetes imersos em argamassa de cimento, ao longo dos vários períodos de imersão. Através desta figura é possível analisar o efeito das soluções ao longo dos vários períodos de imersão, comparativamente aos provetes de controlo.

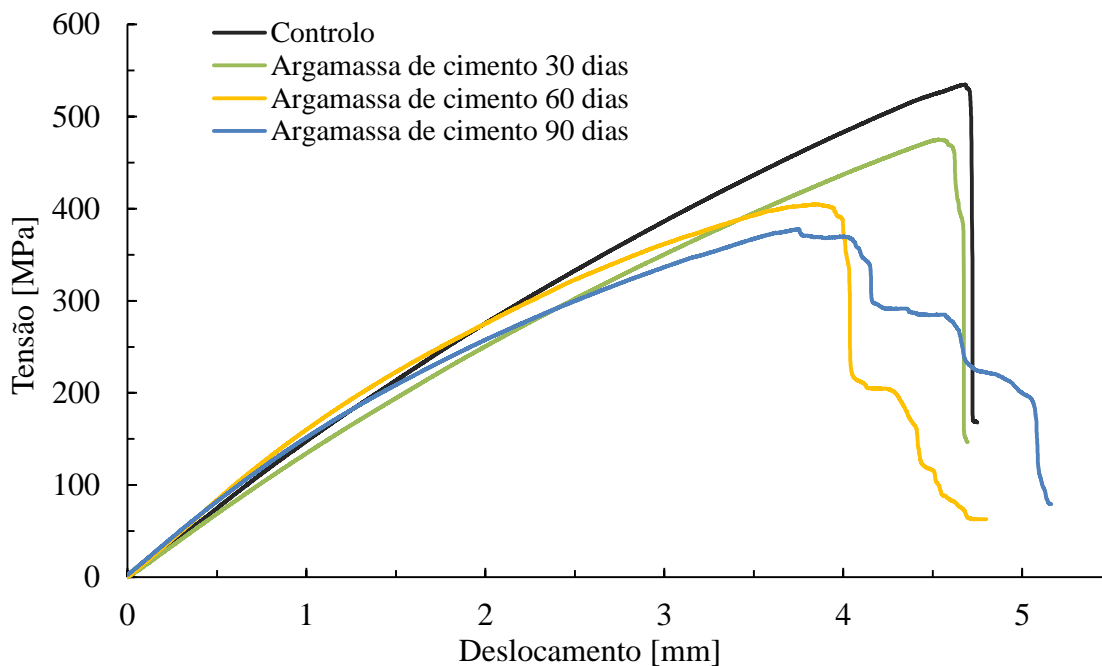


Figura 4.13. Variação da tensão de flexão dos provetes imersos em argamassa de cimentos durante os vários períodos de imersão.

Pela observação da Figura 4.13 constata-se que o comportamento até à rotura dos provetes é bastante semelhante. Os provetes imersos durante 60 e 90 dias apresentam um comportamento diferente dos provetes de outros períodos após a ocorrência de rotura,

verificando-se oscilações na curva da tensão-deslocamento. Este comportamento pode ser justificado pelo tipo de dano observado nos provetes, Figura 4.14.

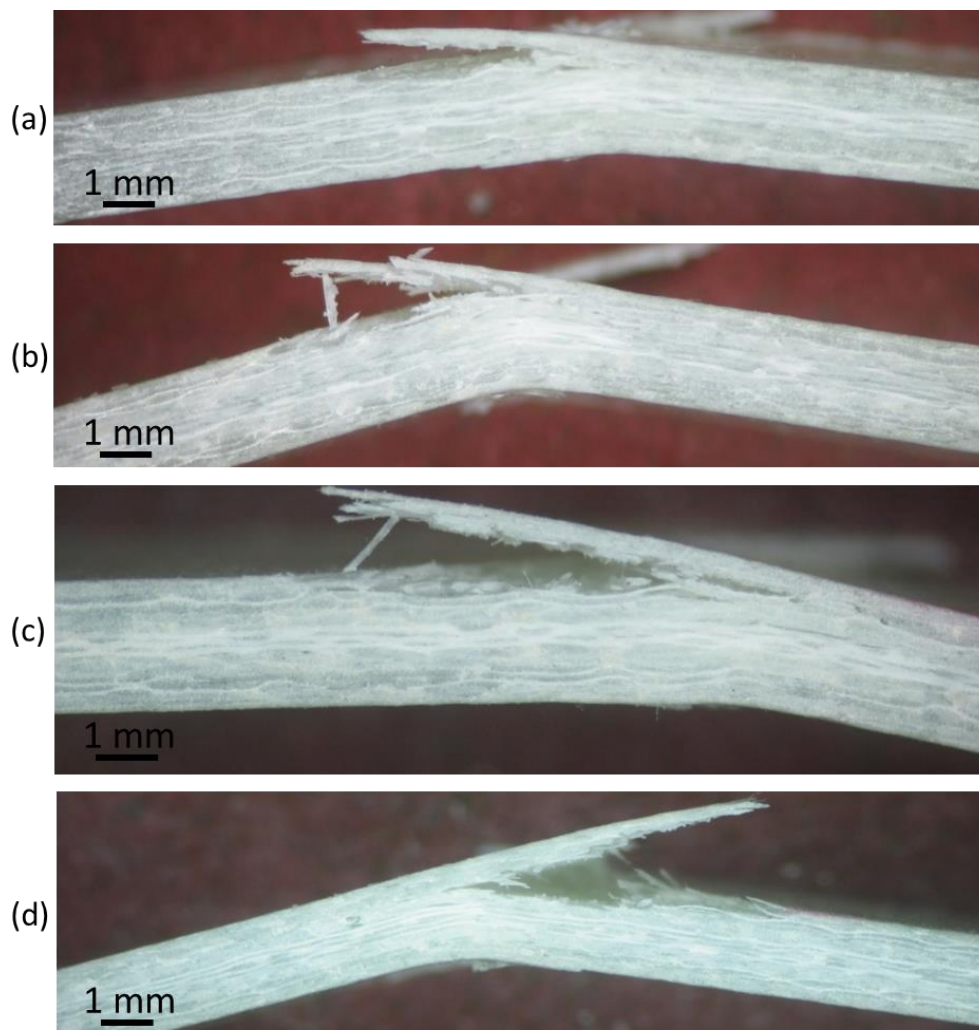


Figura 4.14. Dano nos provetes imersos em argamassa de cimento após o ensaio de impacto de flexão em três pontos: (a) controle, (b) 30 dias, (c) 60 dias, (d) 90 dias

Comparando os provetes de controle (Figura 4.14 (a)) com os provetes imersos em argamassa de cimento durante 30 dias (Figura 4.14 (b)) é possível constatar que o tipo de dano que ocorre nestes provetes é bastante semelhante. Contudo, no caso da imersão durante 30 dias, o dano é mais significativo, sendo possível detetar arrancamento de fibras. Nas Figura 4.14 (c) e (d) além da ocorrência de rotura de matriz e arrancamento de fibras, observa-se também a existência de propagação de delaminação ao longo do provete. Este tipo de dano pode justificar a oscilação na curva da Figura 4.13, uma vez que os ensaios não

foram terminados logo após a ocorrência da rotura. O comportamento observado para a solução de argamassa de cimento é ilustrativo das restantes condições de ensaio.

Em termos de comparação do dano em função da solução, os resultados apresentados na Figura 4.15, para o caso de imersão durante 60 dias, vêm confirmar que a ação da argamassa de metacaulino sobre os provetes é mais agressiva, promovendo maior dano, logo diminuindo o valor da tensão. De facto, quantifica-se uma diminuição de cerca de 33,5 % no valor da tensão dos provetes imersos em argamassa de metacaulino durante 90 dias em relação aos provetes de teste. Para o caso dos provetes imersos em argamassa de cimento esta redução é de aproximadamente 22 % e para a solução de argamassa de cimento com água de 25%, considerando o mesmo tempo de imersão. O decréscimo no valor da tensão nos provetes imersos em soluções cimentícias, alcalinas, era espectável devido ao efeito destas sobre a matriz e as fibras, e já tinha sido verificado em [10],[11] e [12]. A presença da água na solução vai potenciar a degradação devido à interação que se observa entre as moléculas constituintes da água e a matriz epóxida, conforme observado em [27] e [28].

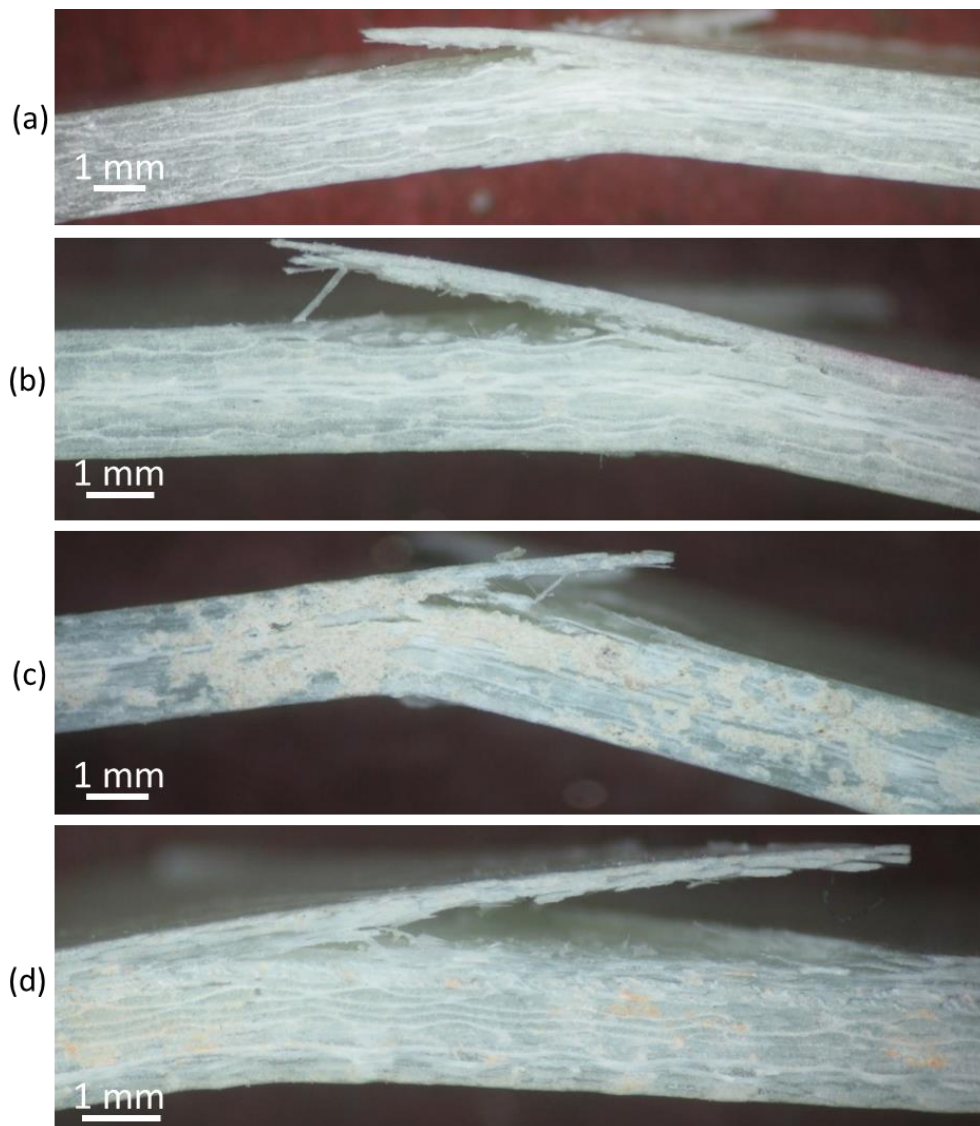


Figura 4.15. Dano nos provetes imersos durante 60 dias após o ensaio de flexão em três pontos: (a) controle; (b) argamassa de cimento; (c) argamassa de cimento em água; (d) argamassa de metacaulino.

Do estudo da flexão em três pontos pode-se retirar as seguintes conclusões:

- A presença de água na argamassa de cimento aumenta o efeito da degradação desta solução na capacidade do provete resistir a este tipo de carregamento, verificando-se um decréscimo no valor da tensão de flexão e um dano semelhante, mas superior, ao registado no caso da argamassa de cimento sem adição de água.
- A argamassa de metacaulino continua a ser a solução que origina maior perda de integridade estrutural do compósito, com a promoção de maior dano no provete.

5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo apresenta-se uma síntese das conclusões obtidas após a análise de resultados, seguida de algumas propostas para trabalhos a realizar, dentro da mesma área de estudo em que se engloba a presente dissertação.

5.1. Conclusões

Com a análise dos resultados obtidos com as medições e ensaios realizados, pode concluir-se quanto ao efeito das soluções no compósito em estudo, o seguinte:

1. A variação de massa do laminado vidro/epóxico sujeito às soluções estudadas é insignificativa, no entanto verifica-se que a maior variação ocorre para o caso de imersão em argamassa de cimento em água.
2. Com ou sem a presença de água, a argamassa de cimento aparenta provocar uma diminuição do valor da rugosidade dos provetes, enquanto que no caso da argamassa de metacaulino verifica-se um aumento.
3. Os provetes imersos na solução de argamassa de metacaulino apresentam uma diminuição do valor da sua dureza, enquanto que os provetes imersos nas soluções de argamassa de cimento apresentam uma variação deste valor relativamente reduzida no final do estudo.
4. A argamassa de cimento promove a diminuição da resistência mecânica do laminado, afetando seu desempenho quando este é sujeito à flexão e ao impacto na direção longitudinal.
5. A presença de água na argamassa de cimento aumenta a degradação provocada por esta solução nos laminados, verificando-se um pior desempenho quanto à flexão e ao impacto longitudinal, quando comparado com os laminados imersos apenas em argamassa de cimento.

6. A resistência mecânica ao impacto transversal, não sofre alterações significativas após a sua imersão em argamassa de cimento e argamassa de cimento em água.
7. A argamassa de metacaulino é a solução que mais afeta a integridade estrutural do compósito em estudo, sendo para este caso que se verificou o maior decréscimo na integridade estrutural dos compósitos quando sujeitos ao impacto longitudinal, transversal e à flexão.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Como forma de dar seguimento ao estudo do efeito das soluções cimentícias em materiais compósitos, propõe-se o seguinte:

1. Realização de um estudo semelhante ao que se conclui utilizando provetes de bordas moldadas, provetes cujas faces laterais estão também cobertas com uma camada de resina.
2. Realização de um estudo focado no impacto transversal, utilizando um maior numero de amostras e laminados com diferentes empilhamentos imersos em soluções cimentícias.
3. Avaliar o efeito de soluções cimentícias na matriz e fibras de laminados vidro/epóxico com recurso a uma inspeção por Microscopia Eletrónica de Varrimento (SEM).
4. Estudar o efeito das soluções cimentícias em diferentes compósitos, como por exemplo laminados fibra de carbono/epóxico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. Pavanati, “Introdução à Tecnologia dos Materiais,” 2010.
- [2] A. Ventura, “Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas,” *Ciência Tecnol. dos Mater.*, vol. 21, pp. 10–19, 2009.
- [3] R. Nascimento, “Produção e Caracterização de Compósitos Inteligentes,” Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2009.
- [4] Albano Cavaleiro, “Apontamentos da disciplina de Ciências e Engenharia de Materiais II,” *DEMUC*, 2013.
- [5] N. Veiga, “Comportamento à fratura em modo I de compósitos de matriz polimérica, reforçados com fibras de juta,” Dissertação de Mestrado, DEM-FEUP, 2014.
- [6] R. Reis, “Avaliação da influência do meio ambiente na integridade estrutural de placas de vidro epóxico submetidas a impacto,” Dissertação de Mestrado, DEM-UC, 2013.
- [7] E. Farto, “Estudo da degradação de materiais compósitos sujeitos a descargas elétricas,” Dissertação de Mestrado, DEM-UC, 2014.
- [8] L. Ferreira, “Avaliação do dano em compósitos laminados devido a impactos de baixa velocidade,” Tese de Doutoramento, DEM-UC, 2006.
- [9] D. Dias, “Comportamento ao Impacto a baixa velocidade de laminados de epóxico/fibra de vidro, com camadas de cortiça,” Dissertação de Mestrado, DEM-FEUP, 2009.
- [10] 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. Stability*, 98, pp. 853–862, 2013.
- [11] A. Hammami and N. Al-Ghuilani, “Durability and Environmental Degradation of Glass-Vinylester Composites,” *Polym. Compos.*, vol. 25, no. 6, pp. 609–616, 2004.
- [12] R. Griffiths and A. Ball, “An assessment of the properties and degradation behaviour of glass-fibre-reinforced polyester polymer concrete,” *Compos. Sci.*

- Technol.* 60, pp. 2747–2753, 2000.
- [13] J. A. P. Cunha and M. C. Rezende, “Influência de Diferentes Condições Higrotérmicas na Resistência à Tração de Compósitos de Fibra de Carbono/Epóxi Modificada,” *Polímeros Ciência e Tecnol.*, vol. 16, pp. 193–201, 2006.
- [14] R. Carvalho, “Degradação mecânica em compósitos de vidro / epóxico sujeitos a soluções cimentícias,” Dissertação de Mestrado, DEM-UC, 2015.
- [15] G. Huang and H. Sun, “Effect of water absorption on the mechanical properties of glass/polyester composites,” *Mater. Des.* 28, pp. 1647–1650, 2007.
- [16] E. Botelho, M. L. Costa, L. C. Pardini, and M. C. Rezende, “Efeito do Condicionamento Higrotérmico nas Propriedades Elásticas de um Compósito de Fibra de Vidro/Epóxi,” pp. 1051–1052.
- [17] T. Nogueira, “Estudo da influência do efeito do meio ambiente na resistência ao impacto de laminados de vidro epóxico,” Dissertação de Mestrado, DEM-UC, 2013.
- [18] M. T. F. Vieira, “Apontamentos da disciplina de Ciências e Engenharia de Materiais II,” *DEMUC*, 2011.
- [19] “AV PLASTICS.” [Online]. Available: <http://www.avplastics.co.uk>. [Accessed: 29-Jun-2016].
- [20] A. Campos, “Estudo dos Efeitos Ambientais no Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos,” Dissertação de Mestrado, UBI, 2012.
- [21] J. J. Costa, “O efeito abrasivo da resistência ao impacto de materiais compósitos,” Dissertação de Mestrado, DEM-UC, 2014.
- [22] F. P. Torgal and S. Jalali, *Ligantes obtidos por Activação Alcalina*. 2009.
- [23] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, and J. S. J. van Deventer, “Geopolymer technology : the current state of the art,” *Adv. Geopolymer Sci. Technol.*, no. 4, pp. 2917–2933, 2007.
- [24] M. Oliveira, “Caracterização do Comportamento Mecânico de Sistemas Obtidos por Activação Alcalina ; Evolução Temporal e Composição de Activador,” Dissertação de Mestrado, FCTUC, 2014.
- [25] J. G. Rapazote and C. Laginhas, “Development of Building Materials through Alkaline Activation of Construction and Demolition Waste (CDW) – Resistance to High Temperatures,” pp. 1–8, 2011.
- [26] “Instructions for Use and Maintenance - CEAST 9000 Series, Pendulum Impact
-

Systems.”

- [27] C. T. Herakovich, *The what and the why of fibrous composites, Mechanics of fibrous composites*. 1998.
- [28] D. Hull, “Fractography observing, measuring and interpreting fracture surface topography,” *Cambridge Univ. Press.*, 1999.

