



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

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

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

Autor

Luís Fernando Teixeira Neves

Orientadores

Professora Ana Paula Betencourt Martins Amaro

Professora Maria Isabel Moita Pinto

Júri

Presidente Professora Doutora Cristina Maria Gonçalves dos Santos
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, Setembro, 2015

O sucesso consiste em ir de derrota em derrota sem perder o entusiasmo.

Sir Winston Churchill

Agradecimentos

Às minhas orientadoras, Professoras Doutora Ana Paula Betencourt Martins Amaro e Doutora Maria Isabel Moita Pinto pela disponibilidade, simpatia e dedicação com que me auxiliaram ao longo do desenvolvimento desta dissertação, assim como por todos os conhecimentos académicos que me transmitiram.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas que me ajudaram e apoiaram ao longo da minha vida académica.

Por último, um agradecimento especial à minha mãe.

Resumo

No âmbito da investigação relativa ao desenvolvimento de materiais inovadores na área da engenharia civil, os materiais compósitos têm assumido particular destaque.

Neste sentido, foram desenvolvidos estudos da aplicabilidade dos materiais compósitos com vista á substituição do aço tradicionalmente utilizado nas armaduras em construções civis, muito porque estes apresentem problemas associados à corrosão. Entre outros estes materiais compósitos apresentam, de facto, um excelente potencial enquanto matérias-primas de futuro, graças às suas propriedades mecânicas, reduzidos custos de produção e impactos ambientais.

A investigação relativa ao comportamento do material no decorrer da sua vida foi através da imersão de provetes em duas soluções de degradação distintas, nomeadamente o metacaulino e a argamassa. O estudo foi realizado através de ensaios de dureza e ensaios de impacto (*Charpy*) após diferentes períodos de imersão dos provetes.

A determinação da dureza do material, isto é, a sua resistência à deformação plástica, foi determinada através da realização do ensaio de *Vickers*, com recurso a um material com uma resistência à deformação plástica (dureza) superior à do material a analisar.

Neste âmbito, o ensaio de *Charpy* também assume particular importância, na medida em que permite medir a capacidade de absorção de energia pelo provete até à fratura.

As soluções mostraram-se agressivas para o compósito vidro/epóxico aumentando a sua degradação, isto é, diminuindo o seu módulo de elasticidade e aumentando a sua dureza.

Palavras-chave: Compósito, Dureza, Ensaio de *Charpy*; Soluções Cimentícias, Vidro/epóxico.

Abstract

The development of innovative materials in the field of civil engineering, composite materials have assumed particular interest.

In this regard, studies were conducted concerning the applicability of composite materials in traditionally steel replacement used in reinforcement in civil engineering, which presents problems associated with corrosion.

These composite materials have, in fact, a great potential as raw materials in future due their mechanical properties, reduced production costs and environmental impacts. Research on the behavior of the material during its service life was carried out by immersing samples in two distinct degradation solutions, namely metakaolin mortar and cement mortar. The study was based on a laboratory study with hardness test and also energy teste (Charpy) on samples after different immersing periods.

The hardness of the material, it is resistance to plastic deformation was determined by conducting the *Vickers* test, using a material with a plastic deformation resistance (hardness) higher than the material to be analyzed.

The Charpy test have particularly importance, in measure of the capacity of energy absorption by the specimen until the fracture

The solutions proved to be aggressive for the composite glass / epoxy as they increase its hardness while decreases its modulus of elasticity.

Keywords

Composite, Hardness, *Charpy* test, Cement solutions, Glass/epoxy.

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. Aplicação dos materiais compósitos.....	4
2.2. Elementos constituintes dos compósitos.....	4
2.2.1. Matriz	5
2.2.2. Reforço	7
2.3. Métodos de produção dos compósitos	8
2.3.1. Deposição manual.....	9
2.3.2. Moldação por autoclave.....	9
2.4. Agentes de degradação dos compósitos.....	10
2.4.1. Condições higrométricas variáveis.....	11
2.4.2. Meios ácidos e alcalinos	11
2.5. Impacto em materiais compósitos.....	12
2.5.1. Rotura de materiais compósitos.....	12
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	15
3.1. Provetes de vidro/epóxido	15
3.2. Soluções de degradação	17
3.2.1. Argamassa de Metacaulino.....	17
3.2.2. Argamassa de cimento.....	19
3.3. Imersão dos provetes	21
3.4. Tempo de imersão.....	22
3.5. Variação da massa	23
3.6. Ensaio de microdureza.....	24
3.7. Ensaio de impacto <i>Charpy</i>	26
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	29
4.1. Massa	29
4.2. Ensaio de microdureza.....	30
4.2.1. Argamassa de metacaulino	30
4.2.2. Argamassa de cimento.....	31
4.2.3. Argamassa de cimento imersa em água.....	31
4.3. Comparação de resultados	32
4.4. Ensaio de impacto <i>Charpy</i>	33
4.4.1. Energia absorvida	34

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	37
5.1. Conclusões.....	37
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Comparação de algumas propriedades entre o aço, alumínio e o compósito[2].	3
Figura 2.2. Constituintes de um compósito [5].	5
Figura 2.3. Classificação dos compósitos quanto a matriz[6].	5
Figura 2.4. Compósito reforçado com: (a) partículas aleatórias; (b) fibras descontínuas unidirecionais; (c) fibras descontínuas aleatórias; (d) fibras contínuas unidirecionais; (e) fibras contínuas bidirecionais e (f) fibras contínuas multidirecionais [4].	8
Figura 2.5. Processo de deposição manual[1].	9
Figura 2.6. Representação esquemática do processo de fabrico com saco de vácuo[4].	10
Figura 2.7. Representação esquemática dos mecanismos de rotura de um material compósito[11].	13
Figura 3.1. Ciclo de cura aplicado ao laminado[8].	15
Figura 3.2. Serra elétrica utilizada para corte das placas de vidro/ epóxico.	16
Figura 3.3. Preparação dos provetes: (a) Lixa de água; (b) Provetes numerados.	17
Figura 3.4. Constituintes da argamassa de metacaulino	18
Figura 3.5. Equipamento utilizados: (a) Misturadora da argamassa de metacaulino; (b) Balança para pesar os constituintes da argamassa de metacaulino.	19
Figura 3.6. Constituintes da argamassa de cimento.	20
Figura 3.7. Equipamentos utilizados: (a) Balde e colher para misturar a argamassa; (b) Balança para pesagem dos constituintes.	21
Figura 3.8. Estruturas/Imersão dos provetes: (a) Metacaulino; (b) Argamassa.	22
Figura 3.9. Tensão das diferentes soluções, em relação ao provete teste.	23
Figura 3.10. Balança utilizada para determinação da massa dos provetes.	24
Figura 3.11- (a) Vista geral do equipamento de microdureza; (b) Posicionamento do provete para o ensaio	25
Figura 3.12. Forma da penetração do ensaio de Vickers.	26
Figura 3.13- (a) Martelo utilizado no equipamento; (b) Equipamento Do Ensaio de <i>Charpy</i> .	26
Figura 4.1. Variação da massa nas diferentes soluções.	29
Figura 4.2. Variação da dureza nas diferentes soluções.	32

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Características mecânicas mais relevantes da resina epóxida [7].....	6
Tabela 4.1. Resultados dos ensaios de microdureza na argamassa de metacaulino.....	30
Tabela 4.2. Resultados dos ensaios de microdureza na argamassa de cimento.....	31
Tabela 4.3. Resultados dos ensaios de dureza na argamassa de cimento imersa em água..	31
Tabela 4.4. Resistência ao impacto para diferentes soluções.....	33
Tabela 4.5. Energia absorvida.....	35

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

m_i - Massa inicial do provete

m_f – Massa do provete após imersão

m_r – Variação da massa

Siglas

INEGI – Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

1. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios que o ser humano se focou na investigação, com o objetivo de evoluir e criar novas metodologias que contribuíssem positivamente para o bem estar da humanidade. A inovação no âmbito dos materiais constitui um exemplo importante dessa contribuição positiva. Deste modo, tem-se verificado uma aposta no desenvolvimento de novos materiais com propriedades melhoradas, inovadoras e mais vantajosas do ponto de vista ambiental.

Neste contexto, os materiais compósitos, graças à sua versatilidade, boas propriedades mecânicas e reduzidos custos de produção em certos casos, permitem uma grande variedade de aplicações em diversas indústrias, incluindo a construção civil, a automóvel e a aeronáutica. Estes importantes aspetos conferem aos materiais compósitos a possibilidade de se tornarem em matérias-primas do futuro.

No âmbito da construção civil são frequentes os problemas inerentes à corrosão, ao peso excessivo e, conseqüentemente, à durabilidade e segurança das armaduras em aço. Neste sentido têm sido realizados estudos para avaliar a substituição do aço por materiais compósitos. Assim, a presente dissertação tem como objetivo investigar a influência de soluções cimentícias na integridade estrutural de materiais compósitos que possam vir a ser utilizados nas armaduras das estruturas de engenharia civil, tais como em pilares, vigas, lajes, fundações, etc.

Esta dissertação encontra-se estruturada em 5 capítulos. O capítulo 2 faz o enquadramento teórico, apresentando-se os materiais compósitos, a sua aplicabilidade em engenharia civil e os estudos existentes no âmbito da degradação destes materiais. O capítulo 3 corresponde à descrição do procedimento experimental, incluindo alguns testes preliminares que permitiram definir os tempos de imersão dos provetes. São ainda descritos os materiais e equipamentos utilizados. No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados experimentais, com referência a uma comparação relativamente a resultados previamente expostos em referências bibliográficas anteriores. Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões finais desta dissertação e feitas algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. ESTADO DE ARTE

O presente capítulo aborda, de um modo geral, os materiais compósitos, seus constituintes e aplicações. São também apresentados alguns estudos sobre os efeitos da degradação em materiais compósitos, e referidos os ensaios de impacto.

2.1. Materiais compósitos

Os materiais compósitos podem ser caracterizados como sendo uma mistura ou combinação de dois ou mais micro ou macro constituintes que diferem na forma e/ou na composição química, e que na sua essência são insolúveis uns nos outros. O objetivo deste tipo de materiais é a obtenção de um material final que tenha propriedades superiores em relação às propriedades de cada um dos seus constituintes [1].

Os Compósitos reforçados com fibras estão a entrar fortemente no mercado, no grupo dos materiais para estruturas e o seu uso tem crescido continuamente, independentemente das crises económicas. Tem sido, contudo, a necessidade de materiais de alto desempenho para a aviação militar, civil, veículos aeroespaciais e foguetes que tem alimentado este crescimento. As necessidades de redução de peso favorecem claramente o seu uso pelo que tem aumentado cada vez mais o número de componentes em metal que são substituídos por componentes feitos em Compósitos [1].

Na Figura 2.1 é possível observar-se as diferentes propriedades mecânicas, físicas e químicas dos materiais compósitos quando comparadas com materiais tradicionalmente utilizados. Desta figura é possível concluir-se que os compósitos apresentam características de maior relevo que os outros materiais aqui comparados.

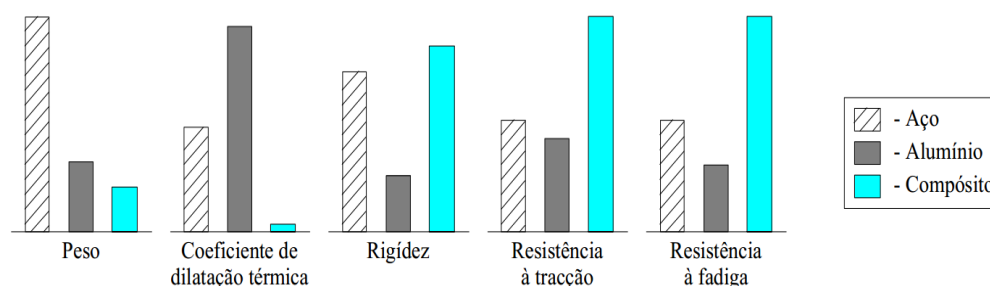


Figura 2.1. Comparação de algumas propriedades entre o aço, alumínio e o compósito[2].

2.1. Aplicação dos materiais compósitos

A substituição dos materiais tradicionais por materiais compósitos reforçados tem aumentado continuamente nos últimos anos em diversas aplicações como a indústria naval e a construção civil.

Relativamente ao tema desta dissertação, constata-se que a aplicação mais comum dos compósitos na indústria civil é presentemente a reabilitação e manutenção de estruturas já existentes. Estes materiais são atrativos para recuperar a resistência inicial das estruturas quando degradadas, aumentar a capacidade de carga de modo a satisfazer novos usos, ou mesmo modificar a funcionalidade das mesmas sem implicar grande aumento do peso da estrutura. Existem também potenciais economias em termos de custos e redução de problemas ambientais no uso de compósitos para reabilitação de infraestruturas[3].

É possível realçar algumas vantagens referidas na aplicação dos materiais compósitos na construção civil, tais como:

- Elevada rigidez;
- Elevada resistência à corrosão;
- Não são condutores elétricos;
- Baixa condutividade térmica;
- Estabilidade estrutural;
- Fácil moldagem;
- Menor peso em relação à maioria dos materiais;
- Reduzido impacto ambiental.

2.2. Elementos constituintes dos compósitos

Os materiais compósitos podem ser definidos como sendo um material formado pela combinação de dois ou mais elementos (geralmente designados por reforço e matriz), resultando um material com melhores propriedades do que as dos constituintes base. Uma característica interessante dos compósitos é a sua anisotropia. O compósito é anisotrópico quando as suas propriedades mecânicas, físicas, térmicas ou elétricas variam em função da direção. Em componentes fabricados a partir de compósitos reforçados por fibras contínuas, como laminados unidirecionais, bidirecionais ou multidirecionais, a presença da anisotropia pode trazer benefícios. Esta anisotropia permite planejar de modo

que a maior resistência do componente aconteça na direção em que se verifique a tensão máxima em serviço. De facto, a vantagem principal destes compósitos está na habilidade de controlar a anisotropia do componente através do projeto e do fabrico [4]. Na Figura 2.2, está representada esquematicamente essa constituição.

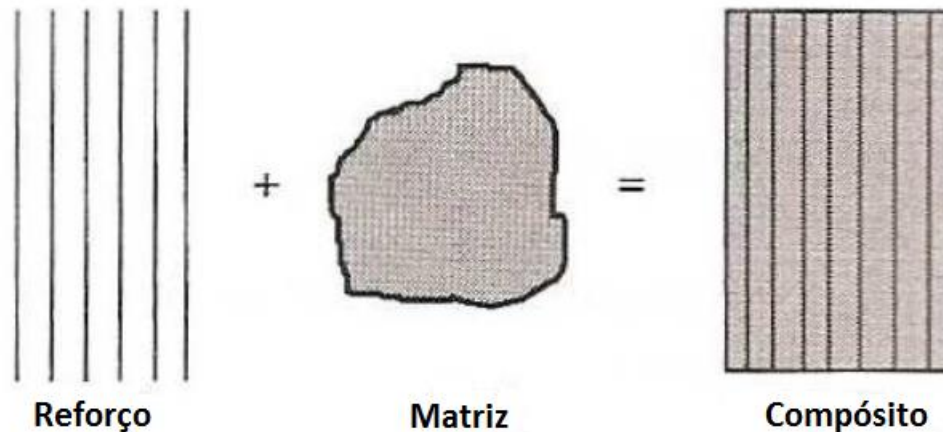


Figura 2.2. Constituintes de um compósito [5].

2.2.1. Matriz

Como está representado na Figura 2.3 a matriz pode ser de natureza orgânica, metálica ou cerâmica. A fase da matriz confere estrutura ao material compósito preenchendo os espaços vazios que ficam entre o reforço, mantendo-o na sua posição. A matriz protege o reforço do meio envolvente, de danos durante o manuseamento, distribui o carregamento pelo reforço e ainda permite a redistribuição em caso de rotura de alguns elementos [6]. Nesta dissertação estudam-se os materiais compósitos de matriz polimérica.

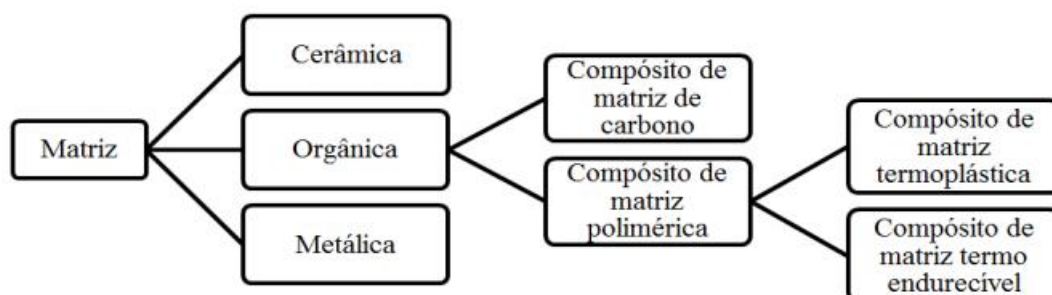


Figura 2.3. Classificação dos compósitos quanto a matriz[6].

2.2.1.1. Matriz polimérica

As matrizes poliméricas são constituídas por moléculas de grandes dimensões (macromoléculas), sendo estas, na sua cadeia central, compostas por

unidades repetitivas designadas por monómeros. Estas matrizes dividem-se em duas categorias principais que são os termoplásticos e os termoendurecíveis [6]. Na presente dissertação a matriz utilizada na fabricação do compósito é termoendurecida.

2.2.1.1.1. Matriz termoendurecível

Os termoendurecíveis tornam-se permanentemente duros quando submetidos ao calor e não amolecem com um aquecimento subsequente. Geralmente são mais duros, mais resistentes e mais frágeis que os termoplásticos, e possuem melhor estabilidade dimensional. Os materiais termoendurecíveis mais utilizados para constituir a matriz de compósitos são os epóxidos, os poliésteres e as resinas fenólicas de poliamida [3]. A Tabela 2.1 apresenta de forma resumida as características mecânicas da matriz utilizada no material compósito da presente dissertação.

Tabela 2.1. Características mecânicas mais relevantes da resina epóxida [7].

<i>Características Mecânicas</i>	<i>Valor</i>
<i>Resistência à tração</i>	57 MPa
<i>Deformação na tração</i>	2,4%
<i>Módulo à tração</i>	$2,99 \cdot 10^3$ MPa
<i>Resistência à flexão</i>	131 MPa
<i>Módulo à flexão</i>	$3,68 \cdot 10^3$ MPa
<i>Resistência à compressão</i>	81 MPa
<i>Módulo à compressão</i>	$2,56 \cdot 10^3$ MPa

2.2.1.1.2. Matriz termoplástica

Os termoplásticos apresentam a vantagem de amolecerem, em vez de se tornarem rígidos durante o seu aquecimento, voltando a endurecer após o seu arrefecimento. Estes processos são totalmente reversíveis e podem ser repetidos um determinado número de vezes. Esta propriedade dos termoplásticos facilita aplicações

em técnicas convencionais de compressão para moldar compostos. Além disso, os termoplásticos são relativamente moles e dúcteis, e podem ficar num determinado estado durante longos períodos de tempo, o que torna estes materiais muito utilizados. Resinas reforçadas com termoplásticos têm vindo a distinguir-se como um grupo importante de compósitos. Muitas investigações nesta área têm sido feitas, nomeadamente no que respeita ao melhoramento das suas propriedades de modo a obter maiores vantagens funcionais, largamente usadas em aplicações aeronáuticas [3].

2.2.2. Reforço

O reforço, fase dispersa do compósito, é o elemento responsável pelo bom desempenho mecânico do material compósito, uma vez que, é estes que suporta grande parte das cargas aplicadas ao material compósito. De uma forma geral, a fase dispersa dos compósitos deve ser de elevada resistência mecânica e de elevada rigidez, e deve elevar a resistência térmica e condutividade do mesmo. Para o reforço representar uma vantagem para o compósito, este deve ser mais resistente e mais rígido que a matriz. Deste modo a boa interação entre a matriz e o reforço pode ser garantida pela criação de uma interface entre ambas que possa adequar a rigidez da matriz com a ductilidade do reforço. Para tal é essencial que a ductilidade da matriz seja mínima ou mesmo nula para que o compósito apresente um comportamento adequado [6].

O reforço pode, contudo, apresentar um desempenho diminuído devido a vários fatores, tais como o comprimento. O desempenho dos compósitos é avaliado pelo comprimento, forma, orientação e composição do reforço, bem como pelas propriedades mecânicas da matriz. O arranjo do reforço influencia significativamente as propriedades dos compósitos [6]. O reforço pode apresentar-se como um conjunto aleatório de partículas e de fibras. Na situação em estudo o reforço é constituído por fibras contínuas bidirecionais. Na Figura 2.4 são esquematizados os reforços possíveis conforme o tipo de utilização pretendida para o compósito.

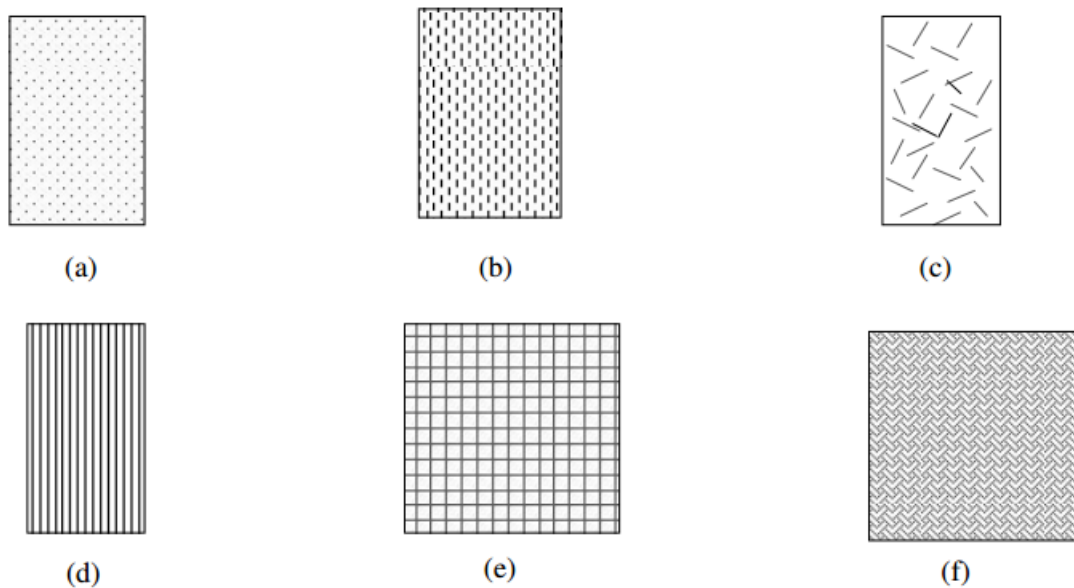


Figura 2.4. Compósito reforçado com: (a) partículas aleatórias; (b) fibras descontínuas unidirecionais; (c) fibras descontínuas aleatórias; (d) fibras contínuas unidirecionais; (e) fibras contínuas bidirecionais e (f) fibras contínuas multidirecionais [4].

Os laminados são constituídos pelo empilhamento de camadas unidirecionais ou de camadas reforçadas por tecidos, com fibras colocadas em diferentes orientações. As propriedades efetivas dos laminados podem variar com a orientação, espessura e sequência de empilhamento das camadas individuais. Os laminados cujos empilhamentos são simétricos não apresentam acoplamento de componentes mecânicas em tração com componentes de corte e/ou componentes de torção, enquanto laminados não simétricos apresentam. Por esta razão, os empilhamentos simétricos são os mais utilizados, pois oferecem uma resposta mecânica mais uniforme do que os laminados não simétricos. Alguns tipos de empilhamentos podem gerar uma classe de laminado muito importante e muito comum que é chamada de quase-isotrópica. Neste caso, a resposta elástica efetiva destes laminados, no seu respetivo plano, é isotrópica. Pelo que já foi descrito, pode-se afirmar que é muito importante explicitar para cada laminado a respetiva sequência de empilhamento [4].

2.3. Métodos de produção dos compósitos

Na produção de materiais compósitos existe uma variedade de métodos de produção, mas o problema de custo da automatização do processo leva a que ainda muitos

materiais compósitos sejam feitos de forma “artesanal”. De seguida serão apresentadas as técnicas mais usadas na produção de matérias compósitos.

2.3.1. Deposição manual

O processo de deposição manual é o método mais utilizado no fabrico de materiais compósitos. Este método consiste em impregnar o reforço, que na situação em estudo são fibras contínuas bidirecionais, com a matriz em estado líquido, camada a camada, sobre um molde, retirando o excesso de matriz, resina epóxida, com uma espátula. A resina é espalhada com a ajuda de um rolo e, ao mesmo tempo, removem-se as bolhas de ar que podem prejudicar o desempenho do componente. O processo é repetido de forma a aumentar a espessura do compósito [8]. Na Figura 2.5 é representado o processo de deposição manual.

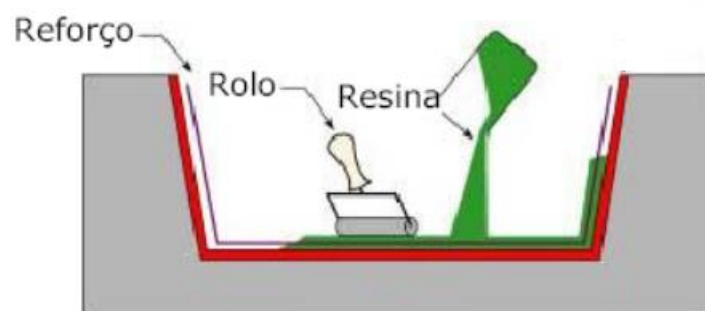


Figura 2.5. Processo de deposição manual[1].

Neste processo é de realçar que a cura é feita sob condições atmosféricas normais, tem baixa capacidade de produção, a qualidade das peças dependem de quem as produz e de um modo geral a produção apresenta piores propriedades mecânicas quando comparado com outros processos [1].

2.3.2. Moldação por autoclave

O processo de moldação por autoclave é utilizado na fabricação de laminados de elevado desempenho, em áreas como a aeronáutica e espacial. O autoclave basicamente trata-se de um sistema fechado, onde é colocada a peça, e que está sujeito a determinadas condições de temperatura e pressão. Por sua vez, o laminado é fechado conjuntamente com o molde numa embalagem, tal como na Figura 2.6, na qual se faz vácuo, promovendo a

remoção do ar que está no interior da peça, provocando a compactação do laminado. De seguida é colocado no autoclave para se fazer a cura da resina. A maior parte da produção de materiais compósitos avançados faz uso do autoclave. Neste processo é vulgar o recurso a “pré-impregnados”, que são fibras previamente impregnadas de resina. O seu custo é mais elevado que os tecidos de fibra secos, devido às necessidades especiais de transporte e armazenamento. No entanto, este processo permite obter uma ótima proporção entre fibras e matriz, dando origem a uma relação peso/resistência mais eficiente. Geralmente, a escolha dos materiais compósitos por parte da indústria aeroespacial recai sobre os pré-impregnados [8].

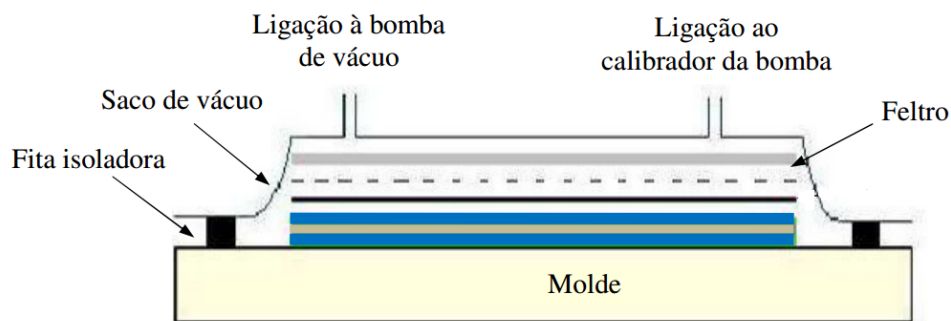


Figura 2.6. Representação esquemática do processo de fabrico com saco de vácuo[4].

2.4. Agentes de degradação dos compósitos

Durante a sua utilização, os materiais podem ficar sujeitos a solicitações exteriores e a condições ambientais que não são as ideais. Com o objetivo de poder antecipar o comportamento dos materiais, perante a ação de agentes exteriores que podem ser corrosivos, são realizados testes em condições de serviço semelhantes à que vão ficar sujeitos em serviço para aferir a diminuição da integridade estrutural. Assim, pode-se tentar prever o comportamento do material e a sua vida útil. A vida útil do material é entendida como o período de tempo, desde a sua entrada em serviço até que sejam garantidas as condições mínimas de segurança exigidas para a função a desempenhar.

O estudo da degradação dos compósitos sujeitos ao efeito de soluções cimentícias, tais como a argamassa e os seus derivados, nunca tinha sido realizado. No entanto, com o crescente interesse deste tipo de materiais na construção civil torna-se imperiosa esta análise. Os estudos até aqui desenvolvidos centraram-se no ramo das indústrias aeronáuticas, espacial e automóvel, tendo sido analisados os efeitos da

humidade, meios ácidos e alcalinos e da temperatura, que serão os principais fatores influenciadores das características dos polímeros. Contudo, também já foram realizados alguns testes para avaliar a influência das descargas elétricas e do efeito da grenalhagem nas propriedades mecânicas dos materiais compósitos.

2.4.1. Condições higrométricas variáveis

No estudo realizado por Nuno *et al.* [9] foi utilizado um compósito híbrido, composto por carbono/Kevlar/resina epóxi, o mesmo tipo de resina utilizada no estudo realizado no âmbito desta dissertação. O estudo destes investigadores consistiu em estudar o efeito da esterilização por autoclave que é constituído por três etapas distintas: aquecimento, esterilização e secagem. As condições higrométricas específicas utilizadas para a realização da etapa de esterilização decorreu à temperatura de 121°C durante 20 minutos e a uma pressão de 3-5 bar.

Nuno *et al* [9] através de ensaios de impacto concluíram que há um decréscimo na ordem dos 5,4% para a carga máxima e de 23,5% para a energia restituída até ao décimo impacto. Em sentido contrário há um aumento, na ordem dos 9,5%, para o deslocamento até ao décimo impacto. Em forma de conclusão, fica comprovado que a degradação dos laminados deveu-se à ação conjunta temperatura/humidade o que levou, conseqüentemente, à menor resistência ao impacto observada.

2.4.2. Meios ácidos e alcalinos

O estudo realizado por Amaro *et al.* (2013) [10], em que foi utilizado o compósito vidro/epóxi teve como objetivo averiguar a influência na dureza e na resistência ao impacto de soluções ácidas (HCl) e alcalinas (NaOH). O estudo foi realizado tendo por base 3 períodos de imersão diferentes e nestas soluções.

Em relação à dureza foi possível concluir que há um aumento geral da dureza em relação aos valores da placa de teste após a imersão nas soluções. Mais detalhadamente, o aumento mais significativo da dureza é obtido ao fim da primeira fase de imersão, 12 dias, cerca de 20,8% e 12,5% para os laminados imersos em soluções alcalinas (NaOH) e ácidas (HCl), respetivamente. Para os tempos de imersão superiores não é detetada qualquer alteração significativa em nenhuma das soluções.

No que toca à resistência ao impacto foram efetuados impactos de baixa velocidade, inicialmente pré-impactados com uma energia de 8 J, correspondente a uma velocidade de impacto de 2,16 m/s, e depois procedeu-se a multi-impactos de 4 J, correspondendo a uma velocidade de 1,53 m/s, até ocorrer perfuração total do provete. Amaro *et al* [10] concluíram que as soluções apresentam efeitos significativos na carga, deslocamento e tempo de imersão quando comparados com a placa de teste. As amostras imersas em NaOH durante 12 dias apresentaram uma diminuição de cerca de 18,5% e 7% em relação a carga e ao tempo de contato, respetivamente. Em sentido contrário, há um aumento do deslocamento de cerca de 37,1%.

Em relação às amostras de HCl imersas durante os 12 dias verificaram uma diminuição em torno de 5,4% e 15,2% em relação a carga e ao tempo de contato, respetivamente, e o deslocamento aumentou para 39,7%.

2.5. Impacto em materiais compósitos

Devido ao recente crescimento da utilização de materiais compósitos, em aplicações sujeitas a impactos dos mais variáveis tipos, o estudo do comportamento destes materiais submetidos a impacto tem ganho recentemente grande relevo. Nos últimos anos foram feitas várias tentativas para classificar os diversos casos de impacto, parecendo, no entanto, bastante difícil chegar a uma definição consensual. A hipótese que se revela mais aceite pela comunidade científica classifica os impactos como sendo de alta velocidade e de baixa velocidade [5].

Assim, o impacto é considerado, por alguns autores, de baixa velocidade quando se situa entre 1 a 10 m/s e alta velocidade para velocidades superiores a 10 m/s. Estes dois tipos de impacto distinguem-se pelo comportamento do material e pelo dano que causam [8]: a velocidade baixa promove danos locais normalmente invisíveis a olho nu, e as propriedades mecânicas são afetadas pela rotura de algumas fibras ou degradação da matriz, no impacto a baixa velocidade o dano que surge nos compósitos laminados pode ser caracterizados por rotura da matriz, fissura das fibras e delaminação.

2.5.1. Rotura de materiais compósitos

A rotura nos materiais compósitos pode ser dividida em duas categorias, a rotura intra-laminar (Figura 2.7 a) e a interlaminar (Figura 2.7 b). No caso da rotura intra-

laminar a rotura pode dar-se ao nível da matriz, ser por rotura das fibras, descoesão interfacial fibra/matriz ao atrito fibra/matriz após a descoesão. A fratura interlaminar, ou delaminação, consiste num descolamento entre duas camadas contíguas e normalmente ocorre entre camadas com diferentes orientações ou propriedades. Este tipo de rotura é muito comum nos materiais de fibras contínuas, sendo o mecanismo de fratura mais comum que ocorre nas fibras de alto desempenho [6].

Estes mecanismos de rotura podem ocorrer simultaneamente durante o processo de fratura. De referir que mecanismos de rotura dependem do compósito, do tipo de carregamento aplicado e da orientação das fibras. A delaminação apenas se verifica após a rotura da matriz. Quando as fibras estão orientadas paralelamente à direção da propagação da carga a rotura ocorre preferencialmente por descolamento das fibras. No caso de as fibras estarem orientadas perpendicularmente à orientação da carga verifica-se rotura por deslizamento e rotura das fibras [6].

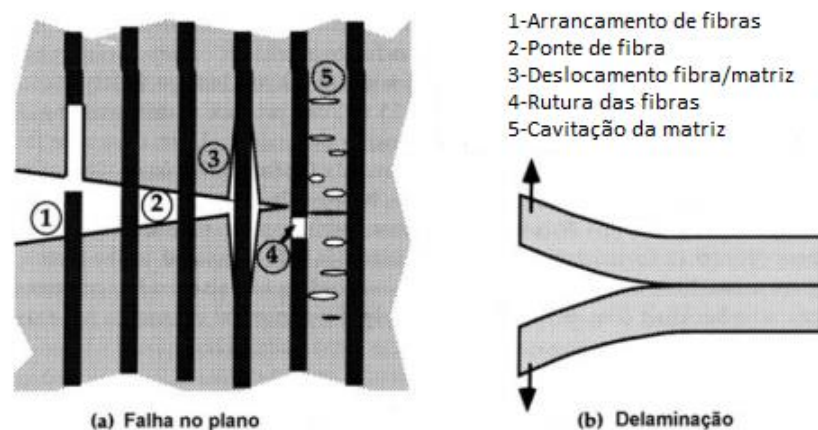


Figura 2.7. Representação esquemática dos mecanismos de rotura de um material compósito[11].

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo vai ser descrita toda a componente experimental, isto é, os materiais e soluções utilizados, equipamentos e os procedimentos que foram seguidos para obtenção dos resultados, incluindo alguns testes preliminares que permitiram determinar os tempos de imersão dos provetes. A degradação dos provetes imersos foi estudada através de ensaios de medição da massa, microdureza e ensaio de impacto (Charpy).

3.1. Provetes de vidro/epóxico

Os provetes utilizados no estudo experimental foram produzidos no INEGI, por moldação em autoclave. O laminado foi sujeito a uma pressão de 2 bar e a um ciclo de cura de acordo com o representado na Figura 3.1. As placas obtidas com dimensões 300×300 [mm] apresentam uma sequência de empilhamento de $[0_3/90_3]_{2s}$, sendo que cada camada tem uma espessura de aproximadamente 0,14 mm.

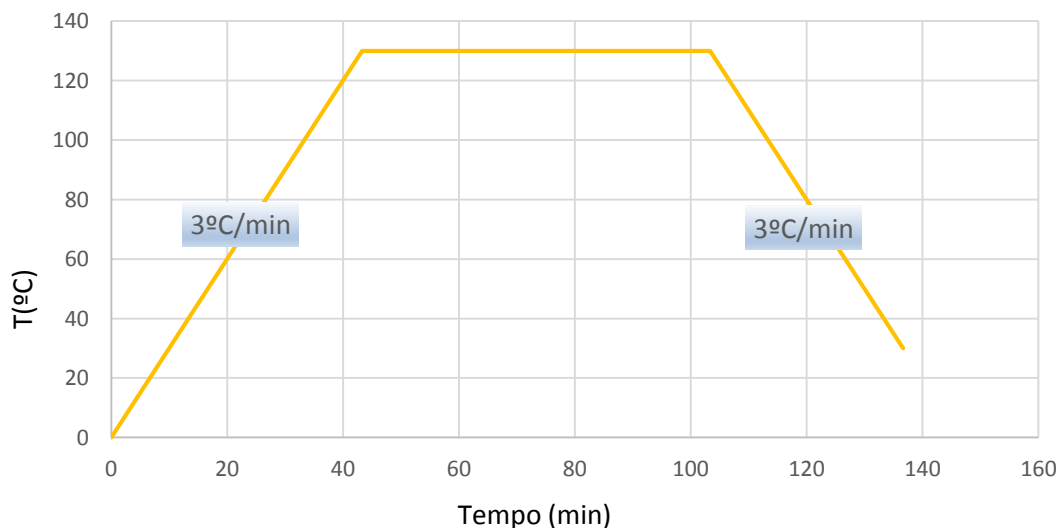


Figura 3.1. Ciclo de cura aplicado ao laminado[8].

Posteriormente, as placas de vidro/epóxico foram cortadas com dimensões de 10×70 [mm] com vista à realização de ensaios de impacto Charpy. Para proceder ao corte

das placas utilizou-se a serra elétrica da Figura 3.2, que possui dentes diamantados, evitando dessa forma o arrancamento de fibras, que podiam alterar a integridade estrutural do provete.



Figura 3.2.Serra elétrica utilizada para corte das placas de vidro/ epóxico.

Os provetes seccionados pela serra elétrica não apresentavam todos exatamente as mesmas dimensões e tinham algumas imperfeições nas arestas. No sentido de eliminar essas pequenas imperfeições utilizou-se uma lixa de água Figura 3.3 (a), de 320 *mesh*, cuja superfície abrasiva é fina e, por isso, mais adequada para acabamentos. Com este procedimento conseguiu-se garantir ausência de variações de tamanho e pequenas imperfeições nas arestas.

Posteriormente, procedeu-se à numeração dos provetes, Figura 3.3 (b), permitindo a sua fácil identificação ao longo de todo o procedimento experimental.

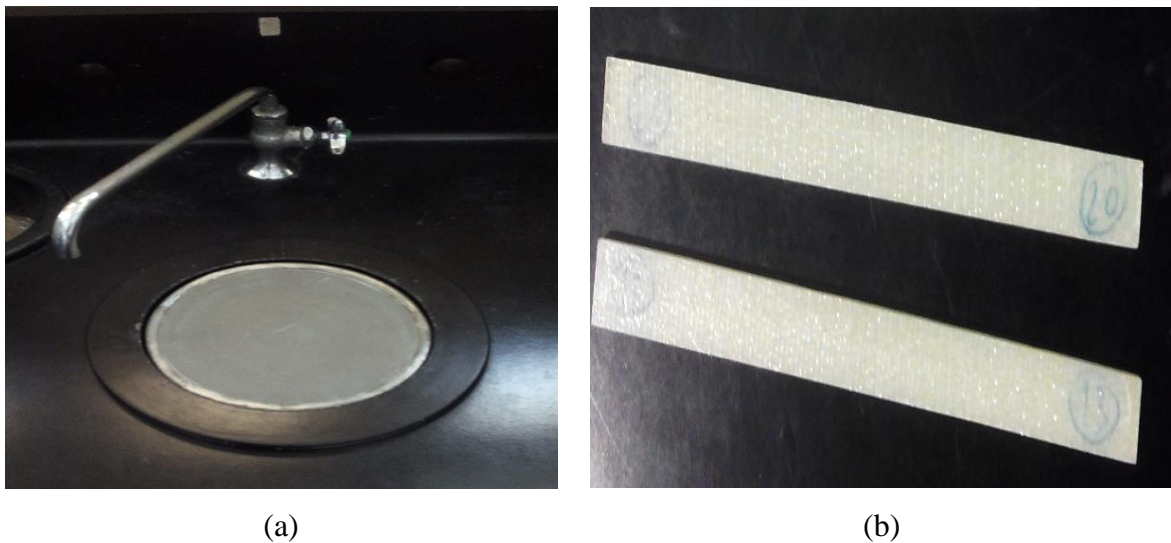


Figura 3.3. Preparação dos provetes: (a) Lixa de água; (b) Provetes numerados.

3.2. Soluções de degradação

Os provetes foram imersos em duas soluções distintas, correspondentes às mais utilizadas na construção civil. Uma das soluções corresponde a argamassa de metacaulino, que atualmente ainda permanece em estudo pelos engenheiros civis por ser uma possível solução para substituir a tradicional argamassa. A segunda solução é a argamassa de cimento, que é a mais utilizada nas construções. Alguns dos provetes imersos na argamassa foram colocados numa num recipiente com água que era mudada de 10 em 10 dias. Pretende simular-se a situação em que o material está sujeito a situações de molhagem mais ou menos prolongadas.

3.2.1. Argamassa de Metacaulino

A mistura da argamassa de metacaulino é constituída pelo metacaulino, a areia, o silicato de sódio e o hidróxido de sódio, sendo as quantidades respetivas apresentadas na Figura 3.4.

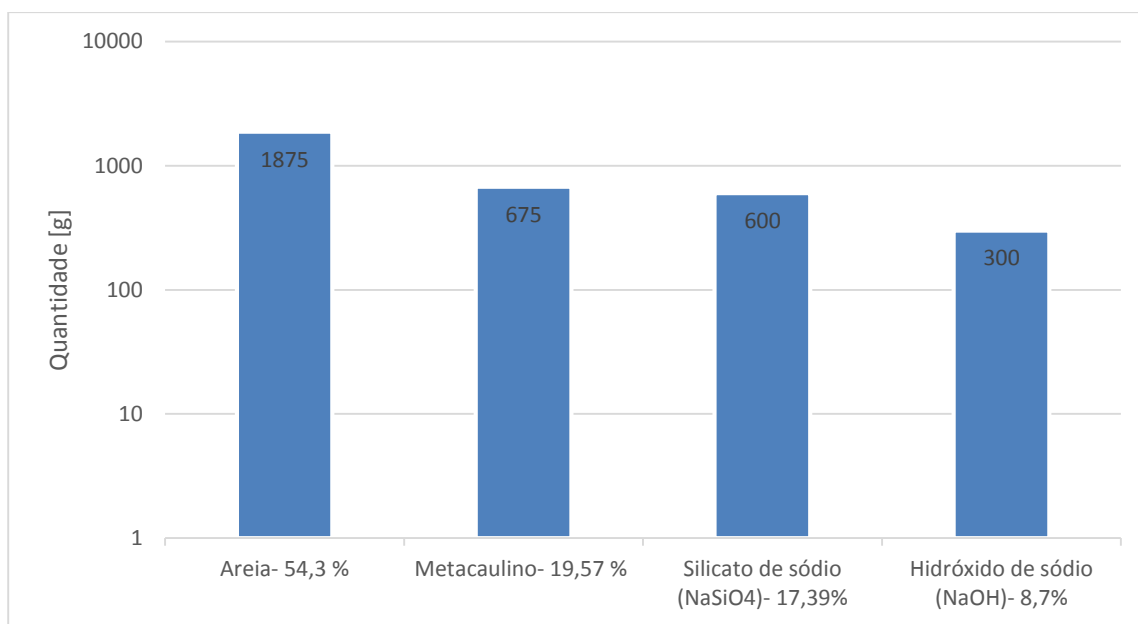


Figura 3.4. Constituintes da argamassa de metacaulino

O metacaulino é um pó com uma coloração esbranquiçada, que mesmo misturado com os outros constituintes continua com essa coloração, Figura 3.5. A obtenção do metacaulino é feita a partir dos caulinos, aluminossilicatos naturais, resultantes de alterações químicas das rochas feldspáticas apresentando em alguns aspetos comportamento melhores que o betão tradicional. Em comparação com a argamassa de cimento é o que imite menos emissões de dióxido de carbono durante a sua produção e o menos prejudicial a nível ambiental[12]. Ainda em relação ao processo de fabrico é de realçar que o metacaulino não necessita de temperaturas tão elevadas (700-800°C) como o cimento, que usa valores superiores a 1500°C, na passagem pelo forno[12].

As soluções foram preparadas nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. A Figura 3.5 (a) representa a misturadora utilizada na preparação da solução. A Figura 3.5 (b) mostra a balança usada na pesagem dos constituintes.

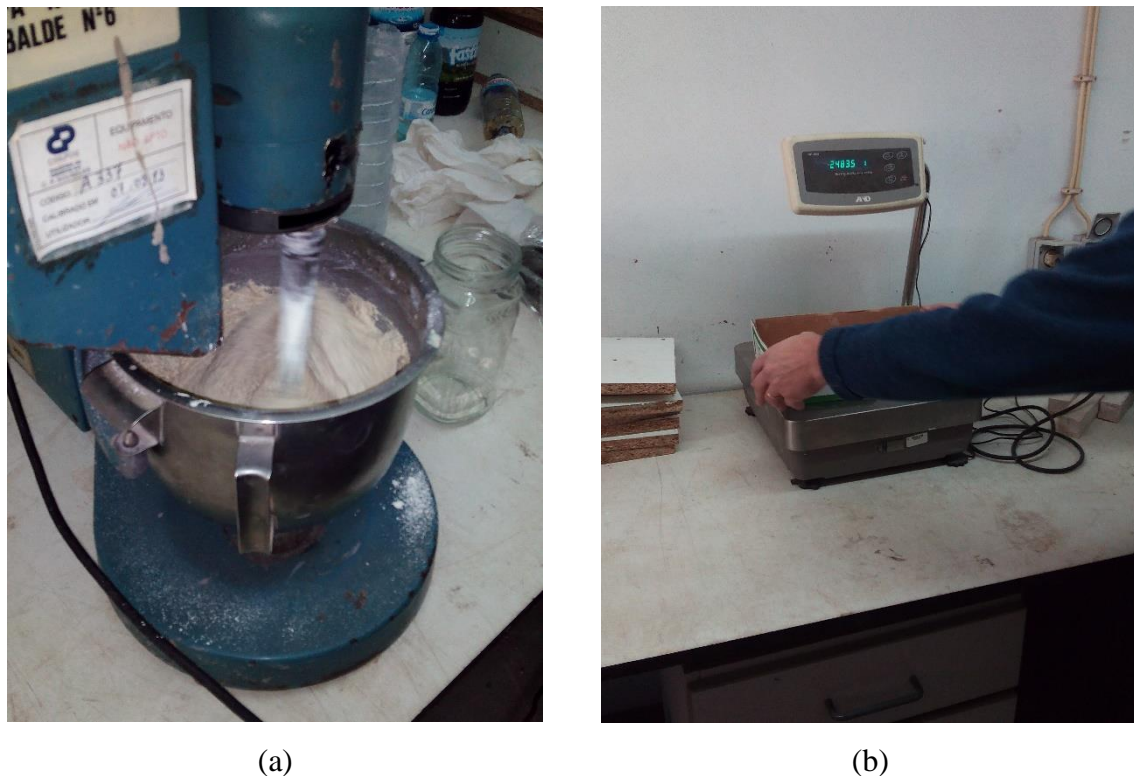


Figura 3.5. Equipamento utilizados: (a) Misturadora da argamassa de metacaulino; (b) Balança para pesar os constituintes da argamassa de metacaulino.

Quanto à preparação desta solução alguns autores acreditam que a ordem ideal e que leva a melhores resultados da mistura para pastas ativadas alcalinamente é a que mistura primeiro os sólidos, e depois o ativador, ou seja a combinação entre o silicato de sódio e o hidróxido de sódio [12]. Segundo resultados obtidos em trabalhos de investigação anteriores, a aplicação deste material na edificação revelou-se viável e bastante vantajosa, com a possibilidade de controlo da sua capacidade resistente a partir da composição do ativador [12].

3.2.2. Argamassa de cimento

A argamassa e o betão são materiais usados na construção e têm como característica comum permanecerem moldáveis durante algum tempo, antes de se tornarem sólidos e muito resistentes à compressão. No estudo em questão foi utilizada a argamassa de cimento, cuja composição se encontra descrita na Figura 3.6.

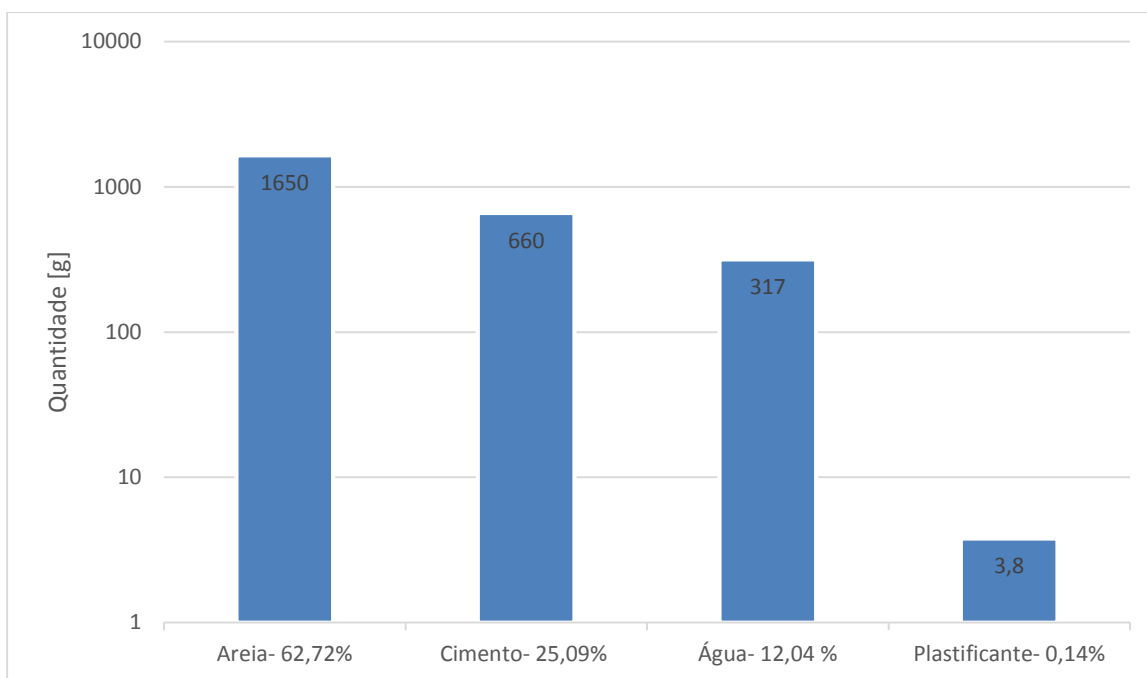


Figura 3.6. Constituintes da argamassa de cimento

A distinção entre o betão e a argamassa de cimento está na composição. Nas argamassas os elementos mais grossos são areias enquanto os betões, para além das areias ainda têm agregados (britas, na ordem dos 2,5 cm). O objetivo deste trabalho é o estudo da degradação devido ao ligante e não do agregado, por isso a não utilização de agregados não se trona relevante para as conclusões. Assim, neste estudo foi decidido estudarem-se argamassas de cimento, sendo que estas simulariam o comportamento do betão.

A calda preparada, tal como é habitual no betão, apresentava na sua constituição um plastificante, que é responsável por lubrificar as partículas, no sentido de tornar a calda fluída e com capacidade de se espalhar no molde. Deste modo, não é necessário uma composição tão rica em água, que prejudicaria a resistência da argamassa. Tal como a argamassa de mecaulino também a argamassa foi preparada nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. A Figura 3.7 (a) ilustra a forma como foi realizada a mistura dos constituintes, em que os utensílios utilizados foram o balde e a colher. Na Figura 3.7 (b) apresenta-se a balança usada na pesagem dos constituintes.



Figura 3.7. Equipamentos utilizados: (a) Balde e colher para misturar a argamassa; (b) Balança para pesagem dos constituintes.

3.3. Imersão dos provetes

Para a imersão dos provetes nas soluções foram criadas umas caixas para encaixar os provetes, tal como representado na Figura 3.8 por forma a permitir a colocação e vibração das soluções sem que os provetes saíssem das suas posições nas estruturas. A vibração das soluções foi feita para que a solução ficasse compactada, simulando o que se verifica na realidade para remoção de ar que pudesse ficar em contacto com os provetes, falseando dessa maneira os resultados do ensaio. Para a realização do estudo em questão foram ensaiados 3 provetes por cada período de imersão, mais 3 provetes de controlo (sem terem sido imersos), num total de 30 provetes.

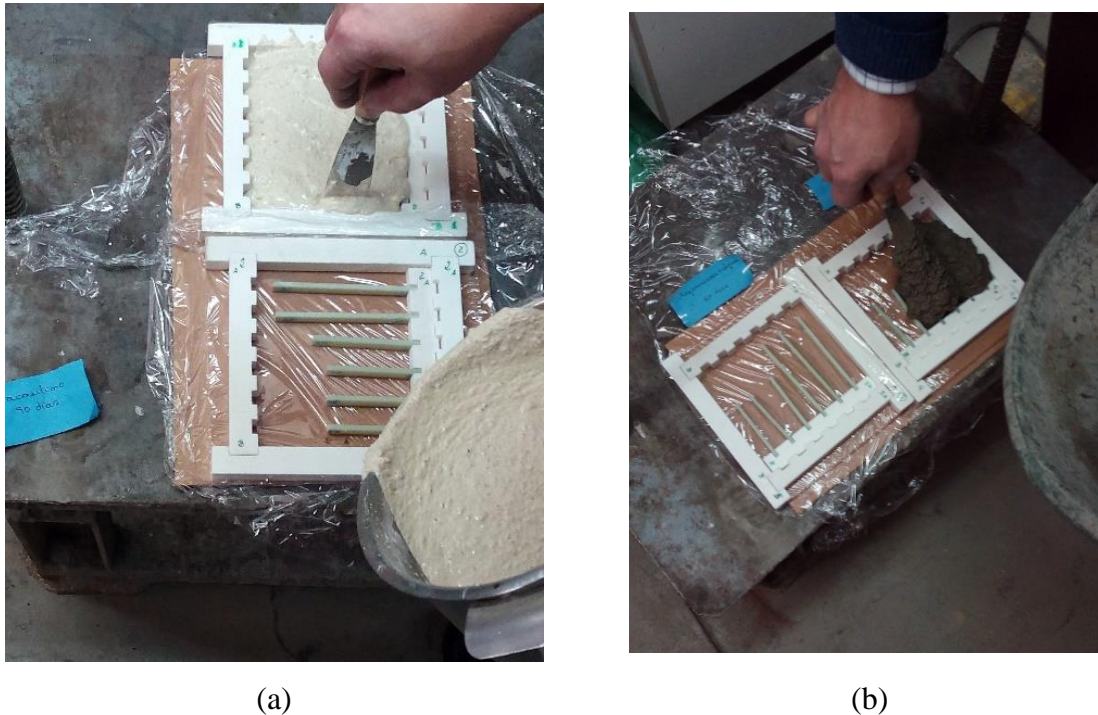


Figura 3.8. Estruturas/Imersão dos provetes: (a) Metacaulino; (b) Argamassa.

3.4. Tempo de imersão

A determinação do tempo de imersão dos provetes requereu a realização de testes preliminares com avaliação da variação da tensão, no sentido de calcular a degradação ocorrida em função do tempo. Assim, foram realizados testes preliminares em provetes imersos nas mesmas soluções, que iriam ser utilizados no estudo principal mas num intervalo de tempo mais curto do que os aplicados nos provetes finais, por forma a possibilitar a majoração dos tempos de imersão dos provetes nas soluções a utilizar no presente estudo a desenvolver.

Na Figura 3.9 são apresentados os resultados dos testes preliminares. Os provetes foram imersos nas soluções em estudo e retirados após tempos diferentes, 14 dias e 28 dias. A análise da influência das soluções nas propriedades mecânicas do compósito em estudo foi efetuada recorrendo ao ensaio de flexão em 3 pontos. Não se tendo verificado alterações significativas para o caso de imersão durante 14 dias e já algumas alterações para os 28 dias, decidiu-se que os tempos de imersão a utilizar no presente estudo seriam 30, 60 e 90 dias.

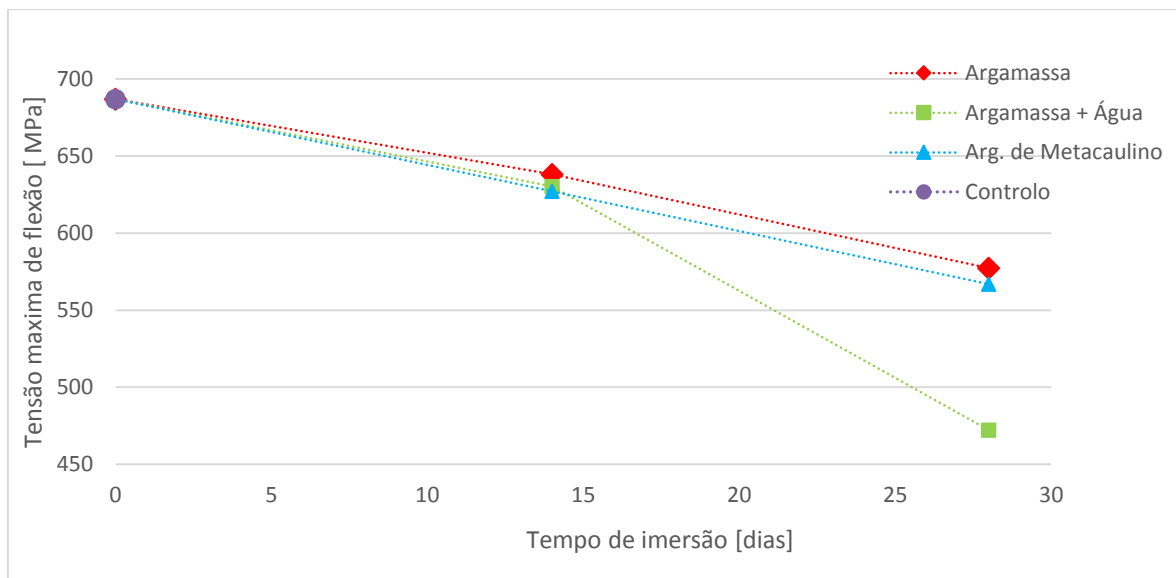


Figura 3.9. Tensão das diferentes soluções, em relação ao provete teste.

3.5. Variação da massa

No sentido de determinar a alteração que pudesse ocorrer na massa dos provetes pela ação das soluções, estes foram pesados antes e após a imersão nas mesmas. Com o intuito de avaliar a quantidade de material absorvido, em termos de massa (m_r), procedeu-se, conforme referido, à pesagem de todas as placas antes (m_i) e após (m_f) a imersão nas soluções, durante o tempo estabelecido. Para tal utilizou-se uma balança Figura 3.10 de grande precisão (décima de micrograma).

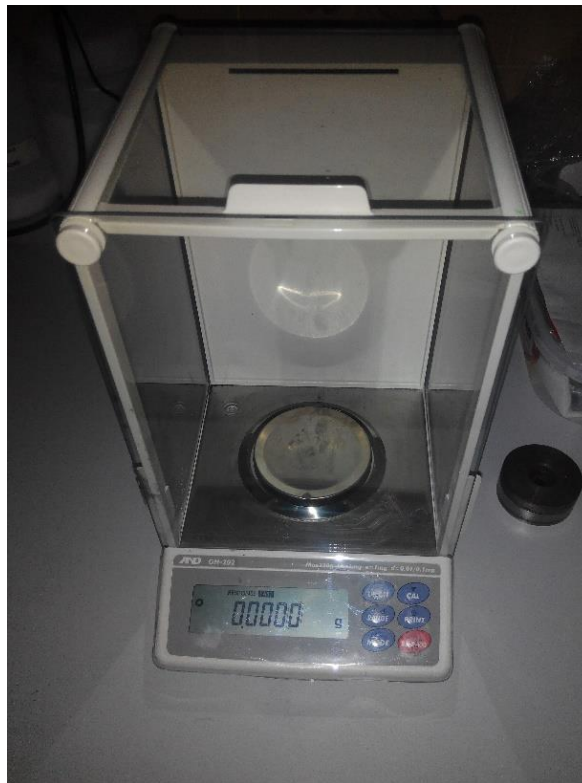


Figura 3.10. Balança utilizada para determinação da massa dos provetes.

Posteriormente, aplicou-se a equação (3.1) para obter a variação de massa ocorrida em cada provete após a imersão nas soluções.

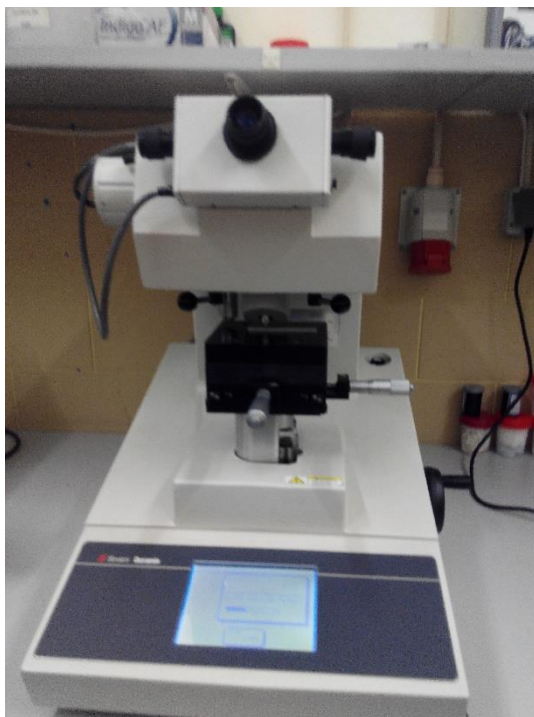
$$m_r[\%] = \frac{m_f - m_i}{m_i} \quad (3.1)$$

3.6. Ensaio de microdureza

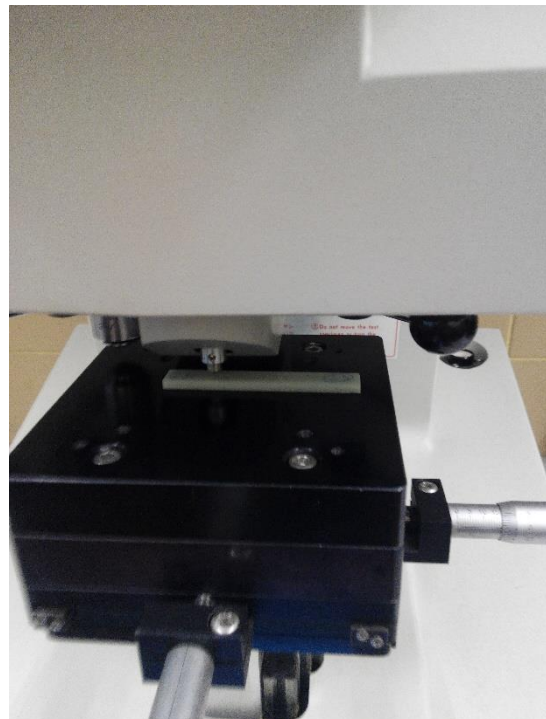
A dureza foi efetuada através do ensaio de Dureza *Vickers* e pode ser definida como a resistência à deformação plástica de um material. Esta avaliação é feita com recurso a um material com uma resistência à deformação plástica (dureza) superior à do material a analisar. A determinação da dureza (H) é conseguida através da razão entre a área projetada de indentação (A_C), após a remoção do indentador, e a carga aplicada (P). Deste modo, a avaliação da dureza é calculada através da aplicação da seguinte expressão (3.2):

$$H = \frac{P}{A_c} \quad (3.2)$$

O ensaio de Dureza *Vickers* é utilizado frequentemente por não destruir as amostras e pela simplicidade do procedimento. O equipamento utilizado foi o STRUERS DURAMIN, representado na Figura 3.11. O indentador utilizado, designado por *Vickers*, classifica-se como piramidal.



(a)



(b)

Figura 3.11- (a) Vista geral do equipamento de microdureza; (b) Posicionamento do provete para o ensaio

A realização deste ensaio divide-se em três fases distintas relativamente à carga: aplicação da carga propriamente dita, a indentação e a descarga. A carga utilizada foi de 1 Newton (N), estando por isso na gama da microdureza e indentação foi de 40 segundos tendo-se de seguida retirado o indentador para se observar o comportamento na descarga. Na Figura 3.12 é representada a forma do indentador usado para a realização do ensaio de microdureza.

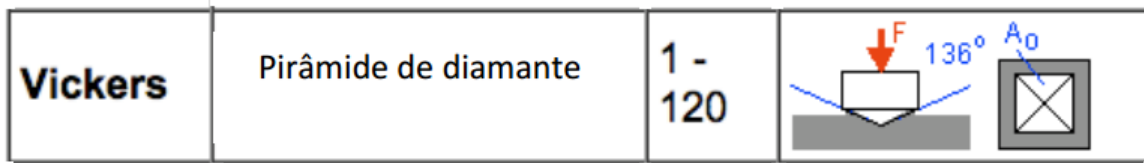


Figura 3.12. Forma da penetração do ensaio de Vickers [7].

3.7. Ensaio de impacto *Charpy*

O ensaio de impacto *Charpy* tem como objetivo medir a capacidade de absorção de energia pelo provete até à rotura, avaliar a resistência do provete ao impacto e a resiliência do provete. A simplicidade e facilidade de instrumentação e o baixo custo do ensaio constituem as principais vantagens do ensaio de impacto *Charpy*. É um ensaio destrutivo, levando à rotura do material, não simulando, no entanto, os eventos que geralmente se verificam em situações reais de impacto de baixa velocidade [5]. Neste ensaio o provete é apoiado em 2 extremidades e posteriormente é atingido por um martelo no seu ponto médio. O martelo é solto a partir de um ponto mais elevado até embater no provete. Na Figura 3.13 (a) é apresentado o martelo utilizado, designado por M2129, com uma energia aplicada de 5 J e uma abertura de 12 mm. A Figura 3.13 (b) representa o equipamento utilizado, CEAST 9050, existente no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra.



(a)

(b)

Figura 3.13- (a) Martelo utilizado no equipamento; (b) Equipamento Do Ensaio de *Charpy*.

A resistência ao impacto é a energia absorvida pelo provete antes de partir, sendo medida pela deformação que o provete vai sofrer até atingir a rotura.

Na situação em que o embate do martelo não têm energia suficiente para partir o provete, apresenta-se uma situação em que a energia absorvida é igual à energia máxima, que é de 5J para o martelo usado. Nesta situação, a resistência ao impacto é igual à resiliência, a energia do embate é toda a absorvida no regime elástico, não havendo deformação no provete.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo procede-se à apresentação, análise e discussão dos resultados, fazendo breves referências a investigações previamente existentes relativas à degradação do compósito vidro/epóxico. O estudo incide sobre a variação da massa, a microdureza e o ensaio de impacto, (ensaio de *Charpy*).

4.1. Massa

Tal como foi descrito no procedimento experimental, a variação de massa sofrida pelos provetes após imersão nas soluções, foi calculada recorrendo a equação (3.1). Na Figura 4.1 é apresentada a variação da massa em percentagem.

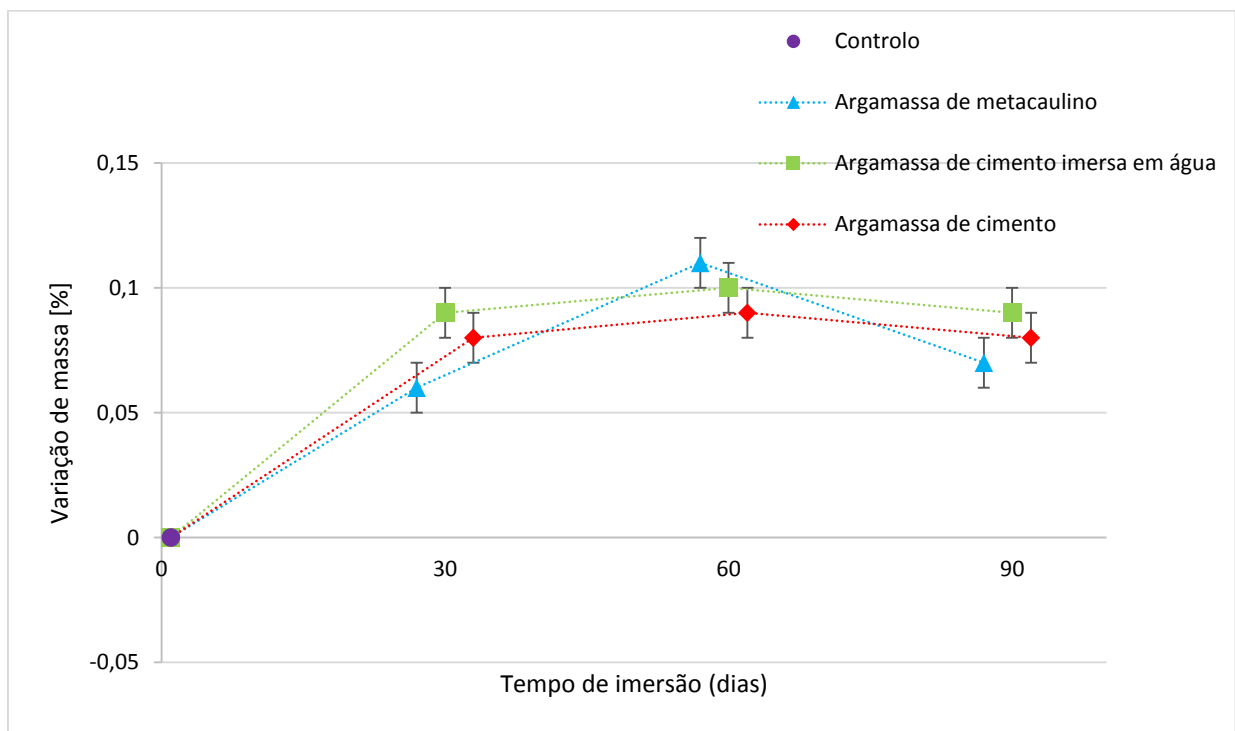


Figura 4.1. Variação da massa nas diferentes soluções.

Da observação da figura é possível verificar que em todos os casos houve um aumento da massa, contudo, incrementos muito pouco expressivos. Esse aumento pode ser explicado pelo preenchimento dos poros dos provetes pelas soluções em que foram imersos, o que poderá significar que os provetes absorveram parte da solução. A variação

máxima do aumento de massa em relação ao provete de controlo foi de 0,11% para os provetes imersos durante 60 dias na solução de argamassa de metacaulino, sendo, no entanto, uma variação muito baixa.

4.2. Ensaio de microdureza

A microdureza foi determinada recorrendo ao ensaio de dureza Vickers tal como exposto no capítulo anterior. Neste ponto são apresentados os resultados obtidos para cada solução e feita a análise dos mesmos, bem como a comparação com outros trabalhos semelhantes.

4.2.1. Argamassa de metacaulino

A solução de argamassa de metacaulino é a que apresenta maiores variações na dureza após a imersão. Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados obtidos após imersão na solução de argamassa de metacaulino. Por análise da Tabela 4.1 verifica-se uma diminuição da dureza em relação ao provete controlo ao fim dos 30 dias, por volta dos 7%. Para os 60 dias e os 90 dias observa-se um aumento no valor da dureza, sendo que para 90 dias esse acréscimo em relação ao provete de controlo é de cerca de 16%, o que pode indicar que ocorreu um endurecimento da matriz para os 90 dias de imersão.

Tabela 4.1. Resultados dos ensaios de microdureza na argamassa de metacaulino.

Dureza [MPa]	Amostras/Tempo de imersão			
	Argamassa de Metacaulino			
	Controlo	30 Dias	60 Dias	90 Dias
Dureza média	22,7	21,0857	22,52	26,3
Desvio padrão	1,33	1,118	1,6	1,7

4.2.2. Argamassa de cimento

A argamassa de cimento no que respeita a dureza após a imersão apresenta uma diminuição para 30 dias, (6%) em relação ao provete controlo voltando a aumentar, para os 60 dias e 90 dias, para os 90 dias o aumento foi de 7% em relação ao provete de controlo, conforme ilustrado na Tabela 4.2

Tabela 4.2. Resultados dos ensaios de microdureza na argamassa de cimento.

Dureza[MPa]	Amostras/Tempo de imersão			
	Argamassa de Cimento			
	Controlo	30 Dias	60 Dias	90 Dias
Dureza média	22,7	21,4	21,657	24,35
Desvio padrão	1,33	1,612	1,187	1,37

Tal como já foi verificado nas outras soluções, também neste caso se verificou, para a imersão de 90 dias, um endurecimento na matriz.

4.2.3. Argamassa de cimento imersa em água

No que diz respeito à argamassa de cimento imersa em água a dureza volta a diminuir para os 30 dias em relação ao provete controlo, Tabela 4.3. De realçar que a dureza aumenta para os 60 e 90 dias, sendo que em relação ao provete teste há um aumento de 2% para os 90 dias. No entanto, os aumentos não são significativos e encontram-se na gama do desvio padrão.

Tabela 4.3. Resultados dos ensaios de dureza na argamassa de cimento imersa em água.

Dureza [MPa]	Amostra/Tempo de imersão			
	Argamassa de Cimento imersa em água			
	Controlo	30 Dias	60 Dias	90 Dias
Dureza média	22,7	21,06	21,933	23,16
Desvio padrão	1,33	1,602	1,43	1,5

4.3. Comparação de resultados

Na Figura 4.2 mostra-se a influência das soluções na dureza do vidro/epóxico ao longo do tempo de imersão.

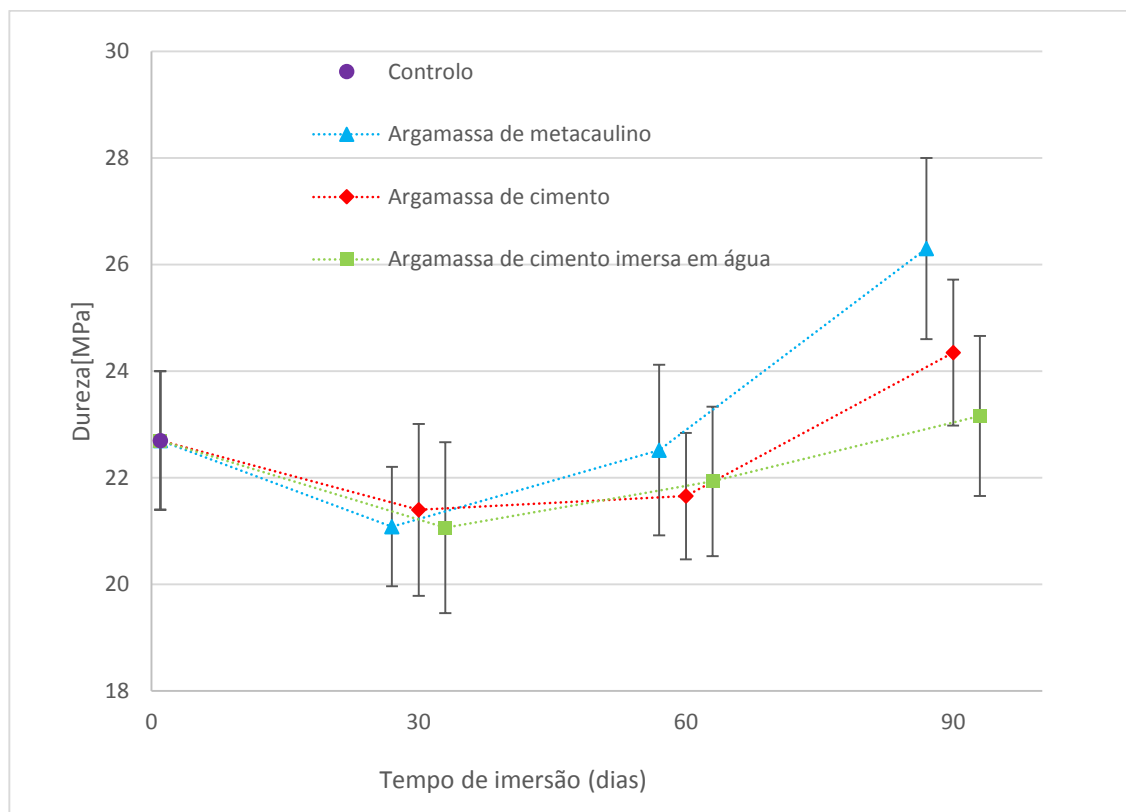


Figura 4.2. Variação da dureza nas diferentes soluções.

Da observação da figura é possível tirar algumas conclusões em relação a influência das soluções no vidro/epóxico,

No âmbito geral há uma diminuição da dureza em média de 7% em todas as soluções ao fim de 30 dias. Esta diminuição pode ser explicada pela degradação da matriz que levou a uma diminuição da dureza ao fim deste período.

Ao fim dos 60 dias há um aumento da dureza em relação aos 30 dias o que pode ser explicado devido ao facto da continuação da imersão que levou ao endurecimento da matriz e que se refletiu na dureza do compósito. Neste período o aumento é mais significativo para a argamassa de metacaulino, e é de cerca de 7% em relação aos 30 dias.

Por fim, para os 90 dias, a dureza segue a tendência, ou seja, continua a aumentar, em todas as soluções. A argamassa de metacaulino é a que tem um aumento mais significativo. Os aumentos foram de 15%, 7% e 2% para a argamassa de metacaulino, argamassa de cimento e argamassa de cimento imersa em água respetivamente. Tal como

já foi referido anteriormente, o aumento do tempo de imersão levou a um endurecimento da matriz que por sua vez levou a um aumento da dureza. Os resultados estão de acordo com o estudo efetuado em [10] em que a dureza aumentava quando o compósito estava em contacto com soluções alcalinas e ácidas.

4.4. Ensaio de impacto Charpy

Com o ensaio de *Charpy* foi possível determinar a resistência ao impacto de cada um dos provetes, bem como a energia absorvida. Vão ser descritos esses 2 parâmetros que são uma boa forma de descrever a evolução das propriedades mecânicas deste.

Os provetes foram submetidos a múltiplos impactos até atingirem a rotura total, tendo-se quantificado a energia absorvida em cada impacto. Neste caso garantiu-se que em cada impacto não havia re-impacto, isto é, que o martelo só impactava o provete uma única vez. No múltiplo impacto foi ainda garantida a posição do provete, de forma a que os impactos sucessivos se verificassem todos na mesma secção do provete em análise.

Tabela 4.4. Resistência ao impacto para diferentes soluções.

Resistência ao impacto [KJ/m^2]	Tempo (dias)		
	30	60	90
Ensaio	100,54	100,54	100,54
Argamassa de metacaulino	66,53	96,67	147
Argamassa de cimento	66,447	86,13	137,34
Argamassa de cimento imerso em água	66,53	89,145	104,37

A Tabela 4.4 mostra os valores da resistência de impacto nas diferentes soluções e nos diferentes tempos de imersão. Em relação a análise dos resultados, no primeiro tempo de imersão (30 dias) há em todas as soluções uma diminuição em cerca de 33% da resistência ao impacto em relação ao provete controlo, O que pode ser explicado pela diminuição da dureza, em relação aos provetes imersos nos 60 dias e 90 dias o valor da resistência ao impacto aumenta, ultrapassando os valores da resistência ao impacto do provete controlo ao fim dos 90 dias.

A solução que demonstra apresentar uma evolução mais elevada na resistência de impacto é a argamassa de metacaulino em que após 30 dias sofre um aumento de 45% e entre os 60 dias e os 90 dias esse aumento é de 52%. Tal significa que há um aumento de 120% dos 30 dias para os 90 dias, o que se traduz num aumento da dureza já verificado nos ensaios de microdureza.

Em relação as argamassas de cimento ambas têm um comportamento semelhante dos 30 dias para os 60 dias (um aumento de cerca de 30%). Para os 90 dias é evidente uma maior variação no caso em que houve a imersão da solução em água. O aumento da resistência ao impacto da argamassa de cimento imerso em água é só de 17% em relação aos 60 dias e na argamassa de cimento não imersa esse aumento é de 59%. É possível concluir que as soluções de argamassa de cimento e de metacaulino têm um comportamento muito parecido no que toca a degradação do compósito de vidro/epóxico.

4.4.1. Energia absorvida

A energia absorvida foi outro parâmetro que permitiu caracterizar o comportamento do compósito. Na Tabela 4.5 são apresentados estes valores. Sendo a energia do martelo 5J sempre que não ocorria a rotura do provete esta energia era absorvida na sua totalidade. Os valores mais baixos que surgem na tabela significam que existe dano no provete, sendo este mais elevado quanto menor é o valor da energia absorvida.

Tabela 4.5. Energia absorvida.

Energia [J]	Tempo (dias)	Nº de impactos		
		1º	2º	3º
Ensaio	-	5	5	3,96
Argamassa de metacaulino	30	5	5	4,881
	60	5	5	3,5
	90	4.824	-	-
Argamassa de cimento	30	5	5	3,569
	60	5	4,777	-
	90	4,42	-	-
Argamassa de cimento imerso em água	30	5	5	3,875
	60	5	5	3
	90	4,383	-	-

Da análise da Tabela 4.5 pode-se concluir que os provetes imersos durante 90 dias, independentemente do tipo de solução, partem ao fim do 1º impacto. Para o caso dos 60 dias os provetes imersos em argamassa de metacaulino e em argamassa de cimento imerso em água partem ao 3º impacto, enquanto para a outra solução a rotura surge ao fim do 2º impacto. Considerando o período de imersão de 30 dias os provetes apresentam todos um comportamento semelhante apresentando rotura total ao fim do 3º impacto.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A presente dissertação teve como objetivo estudar a influência das soluções cimentícias na degradação de materiais compósitos de vidro/epóxico. De acordo com os resultados obtidos e análise realizadas foi possível retirar algumas conclusões. Neste capítulo são expostas as considerações mais relevantes do trabalho realizado. Por fim, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

5.1. Conclusões

Do presente estudo podem-se retirar as conclusões abaixo enumeradas:

1. Em relação à massa, a variação é tão baixa que não é possível nenhuma relação nem em função das soluções nem do tempo de imersão.
2. As soluções demonstraram ter influência na integridade estrutural do compósito.
3. A degradação do compósito está diretamente relacionada com o tempo de imersão na solução.
4. Há um aumento da dureza que se deve as soluções e ao tempo a que são imersos.
5. As soluções imersas durante 90 dias tornam-se muito frágeis, partindo logo no primeiro impacto, independentemente da solução em estudo.
6. A solução de argamassa de metacaulino foi a que causou maior degradação no compósito, tornando o compósito mais frágil.
7. A solução de argamassa de cimento imersa água não apresenta alteração relevante em relação a argamassa de cimento não imersa.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Com a realização deste estudo foi possível colocar algumas questões em relação ao comportamento do compósito de vidro/époxi, que é pertinente referir:

- I. Realizar o mesmo estudo mas com um ensaio de fadiga;
- II. Aumentar o tempo imersão dos provetes para compreender o seu efeito na degradação do compósito;
- III. Analisar a influência da espessura no comportamento do vidro/epóxico;
- IV. Criar uma atmosfera controlada através de um autoclave para simular as variações térmicas ocorridas ao longo do dia e realizar o mesmo estudo;
- V. Fazer estudos similares para outro tipo de compósitos;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. Trindade, “Apontamentos da disciplina de Ciências dos materiais.” DEM/UC 2011.
- [2] L. F. Pereira Juvandes, “Materiais compósitos reforçados com fibras, FRP” Tese de Mestrado, FEUP, 2002.
- [3] A. Ventura, “Os Compósitos ea sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas” *Ciência Tecnol. dos Mater.*, vol. 21, pp. 10–19, 2009.
- [4] H. Silva, “Comportamento Mecânico de compósitos de fibras de vidro/ epoxy nano-reforçados” Tese de Doutoramento, FCTUC, 2014.
- [5] D. Dias, “Comportamento ao Impacto a baixa velocidade de laminados de epóxico / fibra de vidro , com camadas de cortiça” Tese de Mestrado, FEUP, 2009.
- [6] N. Veiga “Comportamento à fratura em modo I de compósitos de matriz polimérica , reforçados com fibras de juta ” Tese de Mestrado, FEUP, 2014.
- [7] J. Costa, “O efeito abrasivo na resistência ao impacto de materiais compósitos” Tese de Mestrado, FCTUC, 2014.
- [8] T. Nogueira, “Estudo da influência do efeito do meio ambiente na resistência ao impacto de laminados de vidro epóxico” Tese de Mestrado, FCTUC, 2013.
- [9] G. Elisio “Estudo da degradação das propriedades mecânicas de materiais compósitos pelo efeito da esterilização por autoclave ” Tese de Mestrado, UBI, 2013.
- [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. Stab.*, vol. 98, no. 4, pp. 853–862, 2013.
- [11] R. V. Da Silva, “Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais” Tese de Doutoramento, USP, Brasil, 2003.
- [12] M. Oliveira, “Caracterização do Comportamento Mecânico de Sistemas Ligantes Obtidos por Activação Alcalina; Evolução Temporal e Composição de Activador” Tese de Mestrado, FCTUC, 2014.

- [13] L. Guimarães, “Compressão de placas compósitas após submetidas a impacto d baixa velocidade” Tese de Mestrado, FCTUC,2010.

Erro! A origem da referência não foi encontrada.
