



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo da influência do efeito de meios corrosivos na resistência ao impacto de laminados vidro/epóxico

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

Study of the effect of corrosive environments influence in impact resistance of glass/epoxy laminates

Autor

Ana Rita da Silva Rodrigues

Orientadores

Professora Ana Paula Betencourt Martins Amaro

Professora Cristina Maria Gonçalves dos Santos

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 Cristina Maria Gonçalves dos Santos**
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2016

“Quanto mais aumenta o nosso conhecimento, mais evidente fica a nossa
ignorância.”

John F. Kennedy.

Aos meus pais.

Agradecimentos

A realização deste trabalho só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Em primeiro lugar quero agradecer à minha orientadora, Professora Doutora Ana Paula Betencourt Martins Amaro, por toda a disponibilidade demonstrada e por tua ajuda prestada, fundamental para a concretização deste trabalho.

Agradeço à minha orientadora, Professora Doutora Cristina Maria Gonçalves dos Santos, pelo auxílio prestado e conhecimentos transmitidos.

Quero agradecer à Professora Doutora Ana Paula da Fonseca Piedade pela disponibilidade em elaborar as soluções usadas neste trabalho.

O meu agradecimento ao Sr. Fernando Bernardes, das oficinas do DEMUC, por toda a ajuda prestada na preparação dos provetes para a realização dos ensaios, assim como, pelo auxílio prestado em algumas adversidades surgidas ao longo deste trabalho.

Agradeço à minha família, especialmente aos meus pais, por estarem presentes em todas as fases da minha vida, por todo o apoio e por toda a motivação que sempre me deram. Quero agradecer, também, todas as condições que me proporcionaram para que pudesse alcançar os meus objetivos.

Agradeço aos meus amigos que sempre estiveram presentes na minha vida e me apoiaram, não só nestes últimos meses mas ao longo dos últimos anos.

Por fim, agradeço aos meus colegas de laboratório de mecânica estrutural por toda a ajuda e espírito de companheirismo que criamos em longo deste semestre.

Resumo

Os materiais compósitos podem estar expostos a vários tipos de ambientes corrosivos durante a sua vida útil, o que pode causar degradação nas suas propriedades. O efeito de soluções ácidas e alcalinas nas propriedades mecânicas de compósitos pode já ser encontrado na literatura publicada, no entanto, estas publicações não são suficientes para estabelecer um conhecimento profundo sobre esta matéria.

A presente dissertação tem como objetivo estudar o efeito de soluções corrosivas na integridade estrutural de compósitos laminados vidro/epóxico durante vários períodos de imersão, em soluções com diferentes concentrações e em soluções a diferentes temperaturas.

Neste estudo, os provetes de laminado vidro/epóxico foram imersos em soluções de ácido clorídrico (HCl) e de hidróxido de sódio (NaOH). Após os seus períodos de imersão, estes provetes foram sujeitos a medições de massa, dureza e rugosidade, e foram, ainda, realizados ensaios de impacto transversal e longitudinal e ensaios de flexão em três pontos.

Os resultados obtidos permitem constatar que, independentemente da solução, a resistência ao impacto e à flexão dos provetes diminui com o tempo de imersão. Porém, a solução alcalina provoca maior redução nas propriedades mecânicas dos laminados do que a solução ácida. No caso do aumento de concentração de soluções concluiu-se que a solução de hidróxido de sódio promove uma diminuição na resistência ao impacto dos provetes, no entanto, o aumento de concentração de ácido clorídrico provoca um pequeno aumento das propriedades dos laminados, quer na resistência ao impacto transversal quer ao longitudinal. Este estudo permitiu verificar ainda que, para ambas as soluções, a resistência ao impacto de provetes imersos em temperaturas superiores à temperatura ambiente diminui bruscamente.

Palavras-chave: Laminados de Vidro/Epóxico, Degradação, Soluções corrosivas, Impacto a baixa velocidade, Flexão em três pontos.

Abstract

Composite materials can be exposed to several types of corrosive environments during their in-service life, which can cause degradation of their properties. The effect of acid and alkaline solutions on the mechanical properties of composites can already be found in published literature, however, these publications are not sufficient to establish a full knowledge of this subject.

This dissertation aims to study the effect of corrosive solutions on the structural integrity of composites laminated glass/epoxy during several periods of immersion, in solutions with different concentration and solutions at different temperatures.

In this study, laminated glass/epoxy specimens were immersed in solutions of hydrochloric acid (HCl) and sodium hydroxide (NaOH). After their immersion periods, this specimens were subjected to mass, surface roughness and hardness measurements, and transversal and longitudinal impact tests and three-point bending tests were also performed.

The results obtained allow to find that, independently of the solution, the impact and flexural strength of the specimens decrease with the immersion time. But, the alkaline solution causes higher decrease of the mechanical properties of the laminates than the acid solution. In the case of the increase of concentration of the solutions it was concluded that the sodium hydroxide solution promotes a decrease on the impact strength of the specimens, however, the increase of the concentration on the hydrochloric acid solution causes a small raise on the laminates properties, on transversal impact strength and also on longitudinal impact strength. This study allowed also to verify that, for both solutions, the impact strength of the specimens immersed in temperatures higher than the environmental temperature decrease sharply.

Keywords Laminated Glass/Epoxy, Degradation, Corrosive solutions, Low velocity impact, Three-point bending.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estrutura da dissertação	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Materiais Compósitos	5
2.1.1. Compósitos Reforçados com Fibras	7
2.1.2. Vantagens e Desvantagens	10
2.1.3. Aplicações de Materiais Compósitos	11
2.1.4. Processos de Fabrico	11
2.2. Degradação em Materiais Compósitos	13
2.2.1. Temperatura.....	14
2.2.2. Humidade	15
2.2.3. Soluções Corrosivas	17
2.3. Impacto em materiais compósitos.....	20
2.3.1. Dano	20
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	23
3.1. Produção de Compósitos Laminados.....	23
3.2. Conceção dos provetes.....	24
3.2.1. Ensaio de Impacto Transversal.....	24
3.2.2. Ensaio de Impacto Longitudinal.....	25
3.2.3. Ensaio de Flexão em Três Pontos.....	25
3.3. Imersão dos Provetes em Soluções Aquosas	26
3.4. Avaliação da Massa	28
3.5. Avaliação da Dureza	29
3.6. Avaliação da Rugosidade.....	30
3.7. Avaliação da Resiliência.....	31
3.8. Avaliação da Resistência à Flexão.....	33
3.9. Visualização do dano	34
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	37
4.1. Efeito do Tempo de Imersão.....	37
4.1.1. Variação de Massa.....	37
4.1.2. Ensaio de Rugosidade.....	38
4.1.3. Ensaio de Dureza	40

4.1.4.	Ensaio de Impacto Transversal	41
4.1.5.	Ensaio de Impacto Longitudinal	43
4.1.6.	Ensaio de Flexão em Três Pontos	46
4.2.	Efeito da Concentração.....	49
4.2.1.	Varição de Massa	49
4.2.2.	Ensaio de Rugosidade	50
4.2.3.	Ensaio de Dureza.....	51
4.2.4.	Ensaio de Impacto Transversal	52
4.2.5.	Ensaio de Impacto Longitudinal	53
4.3.	Efeito da Temperatura	56
4.3.1.	Ensaio de Rugosidade	56
4.3.2.	Ensaio de Dureza.....	58
4.3.3.	Ensaio de Impacto Longitudinal	58
5.	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	63
5.1.	Conclusões.....	63
5.2.	Sugestões para trabalhos futuros	64
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Constituição de um compósitos [4].....	5
Figura 2.2. Classificação para os vários tipos de compósitos [6].....	6
Figura 2.3. Orientação das camadas de um compósito reforçado com fibras [7].....	8
Figura 2.4. Comparação de propriedades entre o aço, o alumínio e um compósito [9]..	11
Figura 2.5. Classificação dos processos de fabrico em função do tipo de resina utilizada [10].	12
Figura 2.6. Representação do saco de vácuo [10].	13
Figura 2.7. Efeito da temperatura no comportamento dinâmico de uma resina [12]..	15
Figura 2.8. Variação da rigidez e do Tg com os efeitos higrotérmicos (Tgw- Tg húmido, Tgo- Tg seco) [12].....	16
Figura 2.9. Representação dos diferentes modos de cedência [4].....	21
Figura 2.10. Esquema de efeitos locais num compósito fibroso devido à propagação de fenda [4]...	22
Figura 3.1. Ciclo de cura das placas laminadas [19].....	23
Figura 3.2. a) Serra elétrica de corte com disco (2mm) diamantado; b) Equipamento de polimento com lixas de SiC (320 mesh) e água como lubrificante.....	24
Figura 3.3. Dimensões do provete tipo 2, segundo a norma ISO 8256 método A [21].....	25
Figura 3.4. Provetes imersos em: a) soluções de hidróxido de sódio (NaOH); b) soluções ácido clorídrico (HCl).....	26
Figura 3.5. Balança.....	28
Figura 3.6. a) Equipamento de ultramicroidentação de Vickers. b) Provette sujeito a indentação.....	29
Figura 3.7. a) Equipamento de ensaio de rugosidade. b) Provette sujeito a uma passagem do rugosímetro.....	30
Figura 3.8. a) Martelo e suporte do provete; b) Equipamento do ensaio de impacto transversal; c) Posicionamento dos provetes no suporte do equipamento.....	32
Figura 3.9. a) Equipamento de ensaio de impacto longitudinal; b) Martelo prestes a embater no suporte móvel do provete; c) Fixação do provete com recurso a uma peça auxiliar.....	33
Figura 3.10. a) Equipamento de flexão em três pontos e respetivo software; b) Provette durante o ensaio de flexão; c) Esquema do ensaio de flexão em três pontos.....	34
Figura 3.11. Conjunto de equipamentos para a visualização do dano.....	35

Figura 4.1. Variação da massa dos provetes na gama de tempo de imersão 15-90 dias.....	38
Figura 4.2. Variação da rugosidade média, Ra, ao longo do tempo.....	39
Figura 4.3. Evolução da dureza, função do tempo de imersão nas soluções a 10%.....	40
Figura 4.4. Variação da resiliência em provetes sujeitos a ensaios de impacto transversal ao longo do tempo de imersão.....	41
Figura 4.5. Dano em provetes imersos na solução de NaOH, após ensaios de impacto transversal, durante 90 dias.....	43
Figura 4.6. Variação da resiliência em provetes sujeitos a ensaios de impacto longitudinal ao longo do tempo de imersão.....	44
Figura 4.7. Dano em provetes sujeitos a ensaios de impacto longitudinal, a) Controlo; e após 90 dias de imersão b) Solução de NaOH; c) Solução de HCl.....	45
Figura 4.8. Variação da tensão de flexão máxima em provetes sujeitos a ensaios de flexão em três pontos, ao longo do tempo de imersão.....	46
Figura 4.9. Variação do valor da tensão com o deslocamento em provetes sujeitos a ensaios de flexão em três pontos, imersos em solução de NaOH 10%.....	47
Figura 4.10. Dano em provetes sujeitos a ensaios de flexão em três pontos, a) Controlo; em solução alcalina a 10% b) 15 dias; c) 30 dias; d) 60 dias.....	48
Figura 4.11. Variação da massa dos provetes, em diferentes concentrações.....	49
Figura 4.12. Variação da rugosidade média, Ra, em soluções com diferentes concentrações.....	50
Figura 4.13. Evolução da dureza, função da concentração das soluções.....	51
Figura 4.14. Variação da resiliência em provetes sujeitos a ensaios de impacto transversal, imersos em diferentes concentrações da solução.....	52
Figura 4.15. Variação da resiliência em provetes sujeitos a ensaios de impacto longitudinal, imersos em diferentes concentrações da solução.....	54
Figura 4.16. Visualização do dano em provetes sujeitos a ensaios de impacto longitudinal, imersos durante 30 dias em: a) 10% NaOH; b) 10% HCl; c) 20% NaOH; d) 20% HCl; e) 30% NaOH; f) 30% HCl.....	55
Figura 4.17. Variação da rugosidade média, Ra, em soluções com diferentes temperaturas.....	57
Figura 4.18. Evolução da dureza, função da temperatura.....	58
Figura 4.19. Variação da resiliência em provetes sujeitos a ensaios de impacto longitudinal, imersos a diferentes temperaturas.....	59
Figura 4.20. Dano em provetes sujeitos a ensaios de impacto longitudinal, imersos durante 30 dias em: a) NaOH a 8°C; b) HCl a 8°C; c) NaOH a 25°C; d) HCl a 25°C; e) NaOH a 40°C; f) HCl a 40°C.....	60

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Dimensões dos provetes do tipo 2	25
Tabela 3.2. Condições de imersão dos provetes.....	27
Tabela 3.3. Distribuição dos provetes pelas soluções e ensaios.....	28
Tabela 4.1. Rugosidade medida nos provetes, ao longo dos períodos de imersão.....	38
Tabela 4.2. Rugosidade medida nos provetes, imersos em diferentes concentrações.....	50
Tabela 4.3. Rugosidade medida nos provetes, imersos em diferentes temperaturas.....	57

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

b – Largura do provete

E – Módulo de Elasticidade

E' – Módulo de ganho

E'' – Módulo de perda

h – Espessura do provete

L – Distância entre apoios do provete

m_f – Massa do provete após a sua imersão nas soluções corrosivas

m_i – Massa do provete antes da sua imersão nas soluções corrosivas

m_r – Percentagem da variação da massa do provete

P – Carga aplicada ao provete

R_a – Rugosidade média de um material

R_q – Rugosidade media quadrática de um material

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

σ – Tensão normal de um material

$\tan \delta$ – Coeficiente de perda

Tg – Temperatura de transição vítrea

Siglas

CNC – Controlo Numérico Computacional

DEMUC – Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

O uso de materiais compósitos tem aumentado exponencialmente ao longo dos últimos anos pois permitem a junção das melhores propriedades de cada tipo de material que os constitui. Devido às suas boas características, este tipo de materiais tem sido cada vez mais utilizado em engenharia em substituição de alguns materiais tradicionais. Áreas de grande exigência como a aeronáutica, indústria automóvel, naval ou até mesmo a construção civil, são alguns exemplos da aplicabilidade dos materiais compósitos. O uso deste tipo de material justifica-se devido ao facto de apresentarem boas propriedades mecânicas, como por exemplo elevadas resistência mecânica e rigidez específica.

Na presença de ambientes corrosivos a utilização de componentes plásticos reforçados com fibra de vidro tem sido cada vez maior, substituindo assim materiais como os aços inoxidáveis e os aços revestidos. Esta alteração deve-se ao facto de este tipo de materiais compósitos apresentarem preços reduzidos, boas propriedades estáticas e dinâmicas, boa resistência à corrosão, fácil fabrico e, as já referidas, elevadas rigidez específica e resistência mecânica [1].

Os reservatórios destinados ao transporte e armazenamento de soluções corrosivas são muitas vezes constituídos por compósitos laminados de vidro/epóxico. No entanto, estes componentes podem ser degradados devido à abrasão, delaminação ou separação da fibra e da matriz, entre outras [1]. Neste sentido torna-se importante perceber a influência das soluções corrosivas neste material, de modo a se aferir e prever a ocorrência de danos e inibição da utilização dos componentes.

Existem já alguns estudos sobre o efeito de soluções ácidas e alcalinas nas propriedades mecânicas de compósitos de matriz polimérica reforçada com fibra de vidro. No entanto, as publicações existentes não apresentam dados suficientes que permitam obter conclusões assertivas sobre as alterações que estas soluções provocam no material.

Neste sentido, pretende-se com este trabalho contribuir para o estudo da influência de um meio corrosivo nas propriedades mecânicas de compósitos vidro/epóxico.

1.2. Objetivos

Este trabalho, como já foi referido anteriormente, tem como objetivo avaliar a integridade estrutural de materiais compósitos de vidro/epóxico após sujeitos ao efeito de soluções ácidas e alcalinas. Pretende-se, assim, simular as condições exteriores a que estes compósitos possam estar sujeitos, com o intuito de prever o comportamento do material nestas condições.

Nesta dissertação, será avaliada a resistência ao impacto a baixa velocidade, transversal (*Charpy*) e longitudinal (*Tensile Impact*), e a resistência à flexão, depois da imersão dos compósitos em soluções de ácido clorídrico (HCl) e de hidróxido de sódio (NaOH). Foram seleccionados impactos a baixa velocidade para este estudo por estes serem considerados os mais problemáticos, dado ao facto de as suas repercussões serem difíceis de se detetarem visualmente [1]. Por outro lado, os ensaios de flexão foram seleccionados para esta avaliação por serem os mais sensíveis a condições de exposição externas [2].

Parâmetros como a rugosidade e a dureza dos compósitos são expectáveis que sofram alterações significativas na presença de ambientes corrosivos. Neste sentido, serão feitas medições de ambos com o intuito de observar as suas evoluções ao longo do tempo de imersão.

Todos os resultados obtidos serão comparados com os resultados de provetes de controlo (provetes não imersos). Serão também confrontados os resultados entre diferentes tempos de imersão, diferentes temperaturas e diferentes concentrações das soluções.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação estará dividida em cinco capítulos. No primeiro, o presente, procura-se enquadrar e definir o problema, de modo a identificar os objetivos propostos.

No segundo capítulo, será feita uma revisão da literatura existente de forma a perceber aquilo que já foi realizado acerca deste tema e quais as conclusões obtidas. Efetua-se uma breve introdução aos materiais compósitos, as suas aplicações, vantagens, desvantagens, entre outras.

O capítulo três é dedicado à descrição de todo o processo experimental, nomeadamente o processamento dos compósitos laminados e as suas condições ao longo do estudo, os equipamentos e os procedimentos utilizados.

No capítulo quatro apresentam-se e analisam-se todos os resultados obtidos, efetuando-se uma comparação com os resultados presentes na literatura.

Por fim, no quinto e último capítulo, serão expostas as conclusões finais, tendo em conta os resultados obtidos, e sugerem-se propostas para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será feita uma exposição de informação relevante para esta dissertação, baseada em estudos realizados no âmbito deste tema por outros autores. Começa-se por abordar os materiais compósitos, a sua constituição, aplicações, vantagens e desvantagens e modos de fabrico. É feita uma abordagem mais específica aos compósitos reforçados com fibras, que são os utilizados neste trabalho. De seguida será feita uma revisão de trabalhos realizados anteriormente sobre a degradação em compósitos, nomeadamente, degradação resultante de vários fatores tais como: temperatura, humidade e soluções corrosivas. Por fim, serão feitas referências a publicações de outros autores sobre o impacto em materiais compósitos e respetivo dano.

2.1. Materiais Compósitos

De uma maneira geral pode-se considerar um compósito como sendo qualquer material composto de 2 ou mais materiais, matriz e reforço(s), que, não sendo miscíveis, são compatíveis quimicamente e apresentam propriedades mecânicas complementares. Assim, as propriedades finais do compósito serão função das propriedades dos constituintes [2]. Na Figura 2.1 estão representadas as fases de um material compósito.

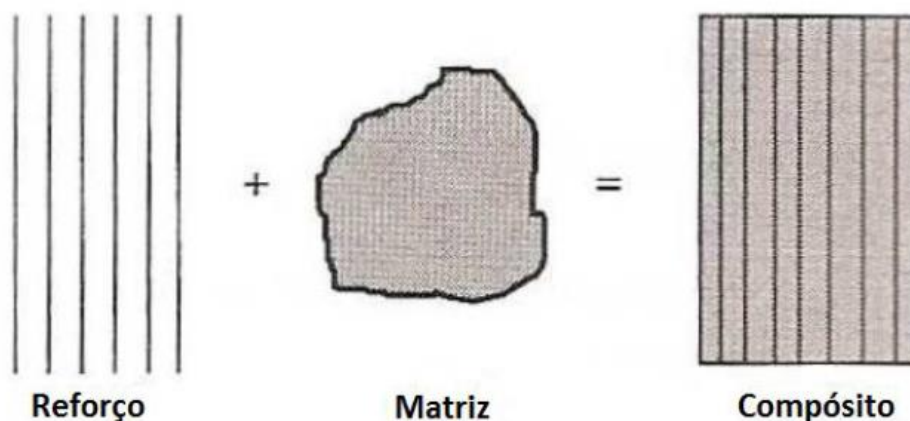


Figura 2.1. Constituição de um compósito [4].

Muitos materiais compósitos são compostos por apenas duas fases. Uma é chamada de matriz, que é contínua, e envolve a outra fase, chamada frequentemente de fase

dispersa. Um exemplo comum de um material compósito é a madeira, que é um compósito natural formado fundamentalmente por um arranjo complexo de celulose reforçado por uma substância polimérica denominada lenhina e por outros compostos orgânicos. As propriedades dos compósitos dependem de propriedades físicas e de fatores inerentes às fases constituintes [5], [6].

A classificação dos materiais compósitos é feita dividindo-os em dois grandes grupos: compósitos de fibras e compósitos particulados. Na Figura 2.1 está ilustrado um esquema simples para a classificação dos materiais compósitos [6].



Figura 2.2. Classificação para os vários tipos de compósitos [6].

2.1.1. Compósitos Reforçados com Fibras

Em engenharia, os compósitos mais importantes são aqueles em que a fase dispersa encontra-se na forma de fibra, o que se deve ao facto de este tipo de compósitos apresentarem resistência e/ou rigidez elevada em relação ao seu peso. Como foi observado na Figura 2.2, os materiais compósitos podem subdividir-se consoante o comprimento e orientação das suas fibras. Um certo comprimento de fibra é necessário para que exista um efetivo aumento da resistência e da rigidez do material compósito. Da mesma forma, o arranjo ou orientação das fibras em relação umas às outras, a concentração das fibras e a sua distribuição, têm influência significativa na resistência e noutras propriedades dos compósitos reforçados com fibras. A melhor combinação geral das propriedades é obtida quando a distribuição das fibras é uniforme [5].

No caso dos compósitos reforçados com fibras, a fase matriz tem várias funções: ligar as fibras umas às outras e atuar como o meio através do qual uma tensão aplicada externamente é transmitida e distribuída para as fibras. Apenas uma porção muito pequena da carga aplicada é suportada pela matriz. Tem ainda a função de proteger as fibras individuais contra danos superficiais, como resultado de condições exteriores desfavoráveis. Por fim, a matriz separa as fibras umas das outras e previne a propagação de fendas de uma fibra para outra, o que poderia resultar numa falha catastrófica. É essencial que as forças de ligação adesivas entre fibra e a matriz sejam grandes. A resistência final do compósito depende em grande parte da magnitude dessa ligação, sendo que, uma ligação adequada é essencial para maximizar a transmissão da tensão de uma matriz mais fraca para as fibras mais fortes [5].

2.1.1.1. Reforço

O reforço é a fase descontínua e geralmente responsável pelas propriedades finais do compósito, uma vez que é a fase que suporta grande parte das cargas aplicadas ao material. Pode existir em diferentes formas, sendo a classificação mais geral feita em três categorias: compósitos particulados, compósitos de fibras descontínuas e compósitos de fibras contínuas.

Os constituintes do reforço dos compósitos proporcionam força e rigidez, mas também aumentam a resistência ao calor, corrosão e condutividade. Para que represente uma

vantagem para o compósito, o reforço deve ser mais resistente e rígido que a matriz. A boa interação entre a matriz e o reforço deve ser mantida, através de uma interface entre ambos que possa adequar a rigidez do reforço com a ductilidade da matriz [6].

Os materiais que são classificados como fibras são materiais policristalinos ou amorfos, possuem diâmetros pequenos e são geralmente polímeros ou cerâmicos [5]. As fibras proporcionam o aumento da força da matriz e, portanto, constituem uma classe importante de reforço [3]. No caso de materiais plásticos, podem ser usados três tipos de fibras sintéticas: fibras de vidro (mais baratas e mais usadas); fibras de aramido; e fibras de carbono (preço mais elevado, mas ainda assim muito utilizadas devido às suas boas propriedades mecânicas) [3].

Como já foi referido anteriormente, o desempenho dos materiais compósitos reforçados com fibras é avaliado pelo comprimento, forma, orientação e composição das fibras. O arranjo de umas fibras em relação às outras, a sua concentração e distribuição influenciam significativamente a resistência e outras propriedades do compósito [6]. Na Figura 2.3 está representado um esquema das orientações possíveis num material compósito reforçado com fibras.

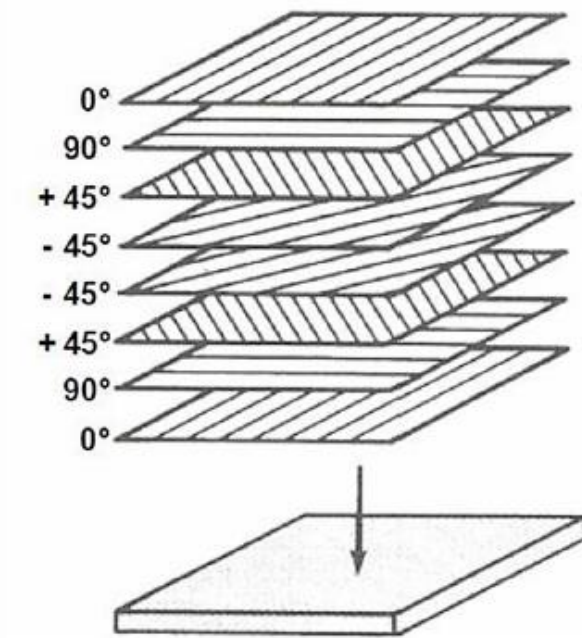


Figura 2.3. Orientação das camadas de um compósito reforçado com fibras [7].

O reforço usado no compósito do presente estudo é a fibra de vidro E, que tem como vantagens [3]:

- Elevada resistência específica;
- Boa estabilidade dimensional;
- Boa resistência ao calor a baixas temperaturas;
- Boa resistência à humidade e à corrosão;
- Boas propriedades de isolamento elétrico;
- Facilidade de fabrico;
- Custo relativamente baixo.

No entanto, a fibra de vidro apresenta também desvantagens como [8]:

- Reduzido módulo de elasticidade;
- Elevada massa específica;
- Sensibilidade à abrasão;
- Baixa resistência à fadiga.

2.1.1.2. Matriz

A fase matriz é a fase contínua do compósito e tem como objetivos: fazer a distribuição do carregamento através do reforço e envolver o reforço preenchendo as lacunas, mantendo-o, assim, na mesma posição de forma a conceder a estrutura ao compósito e proteger o reforço das condições exteriores a que estará sujeito. Pode ser feita constituída por vários tipos de materiais tais como: metais, polímeros ou cerâmicos. Em geral, os metais e os polímeros são usados como materiais da matriz, quando é desejável alguma ductilidade; os cerâmicos são usados quando se pretende obter resistências a altas temperaturas e boa resistência à oxidação [5], [6].

Neste estudo, os compósitos usados possuem matriz polimérica, que apresenta as seguintes vantagens [3]:

- Leveza e facilidade de transporte;
- Boa resistência química;
- Durabilidade;
- Fácil manutenção;
- Flexibilidade de moldação;

As desvantagens deste tipo de materiais são, entre outras, o elevado custo de transformação e a sensibilidade a fissuração [8].

2.1.1.3. Compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro

Os compósitos com matriz de polímero consistem numa resina polimérica como a fase matriz podendo apresentar fibras como meio de reforço. São usados devido às suas boas propriedades mecânicas à temperatura ambiente, facilidade de fabricação e custo. As fibras de vidro, contínuas ou descontínuas, são geralmente usadas como reforço no interior de uma matriz polimérica por diversas razões:

- São facilmente estiradas na forma de fibra de alta resistência a partir do seu estado fundido;
- O vidro é relativamente forte e, quando inserido no interior de uma matriz polimérica, produz um compósito que possui resistência específica muito alta;
- Quando associadas com diferentes polímeros, as fibras de vidro possuem inércia química que torna o compósito útil para aplicação em ambientes corrosivos.

Contudo, existem várias limitações neste grupo de materiais. Apesar de possuírem elevadas resistências, não são materiais muito rígidos [5].

2.1.2. Vantagens e Desvantagens

A utilização de materiais compósitos tem aumentado exponencialmente pelo facto de este tipo de materiais apresentar características importantes na integridade estrutural dos seus componentes. As principais vantagens dos compósitos são, conforme já referido: elevada rigidez específica, elevada resistência específica, elevada resistência à fadiga, estabilidade térmica, baixa condutividade e amortecimento de vibrações. No entanto, o uso de materiais compósitos traz algumas desvantagens. Por ser resultado da conjugação de mais do que um tipo de material, existe uma grande dispersão nas propriedades que apresenta. São materiais heterogêneos e anisotrópicos e ostentam um comportamento não linear, o que torna a sua análise mais complexa em comparação com outros materiais. Outra desvantagem dos materiais compósitos é a sensibilidade aos processos de produção [3].

A vantagem na utilização de materiais compósitos torna-se mais evidente fazendo a comparação com outros materiais. Na Figura 2.4 analisam-se as propriedades de três tipos de materiais e observa-se que, globalmente, os materiais compósitos apresentam

melhores propriedades mecânicas em termos específicos em comparação com os restantes, frequentemente utilizados.

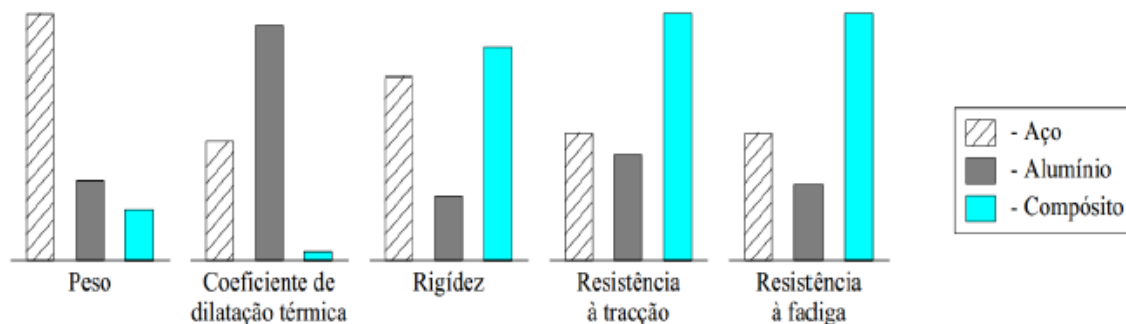


Figura 2.4. Comparação de propriedades entre o aço, o alumínio e um compósito [9].

2.1.3. Aplicações de Materiais Compósitos

Como foi verificado anteriormente, os materiais compósitos tornaram-se uma mais-valia em diversas áreas por apresentarem propriedades únicas, capazes de resolver problemas sem solução até então. Na área da saúde, por exemplo, tem havido uma grande aposta na utilização de compósitos, tanto na medicina como na medicina dentária, por serem materiais leves e, geralmente, biocompatíveis. A indústria aeroespacial e aeronáutica são das principais áreas de aplicabilidade dos compósitos, usando este material como alternativa ao tradicional alumínio. Na construção civil os materiais compósitos começaram a ser usados como armaduras não metálicas em casos de reabilitação de estruturas de betão armado [9].

Muitas aplicações das fibras de vidro são familiares: carcaças de meios de transporte rodoviários e marítimos, tubulações de plástico, recipientes para armazenamento e pisos industriais. As indústrias de transporte utilizam quantidades cada vez maiores de plásticos reforçados com fibras de vidro com o intuito de reduzir o peso dos veículos e aumentar a eficiência dos combustíveis [5].

2.1.4. Processos de Fabrico

Os processos para obtenção de um compósito podem dividir-se em dois grandes grupos: processos de molde aberto e processos de molde fechado. No primeiro apenas uma das superfícies tem bom acabamento superficial, o que pode ser vantajoso no caso de se pretenderem produzir componentes de grandes dimensões e geometria complexa. Os processos de molde fechado apresentam excelentes acabamentos superficiais em ambas as

superfícies, ótima reprodutibilidade e menor inibição de produtos voláteis. Na Figura 2.5 é possível observar os diferentes processos de moldação, quer para resinas termoplásticas quer para resinas termoendurecíveis [10].

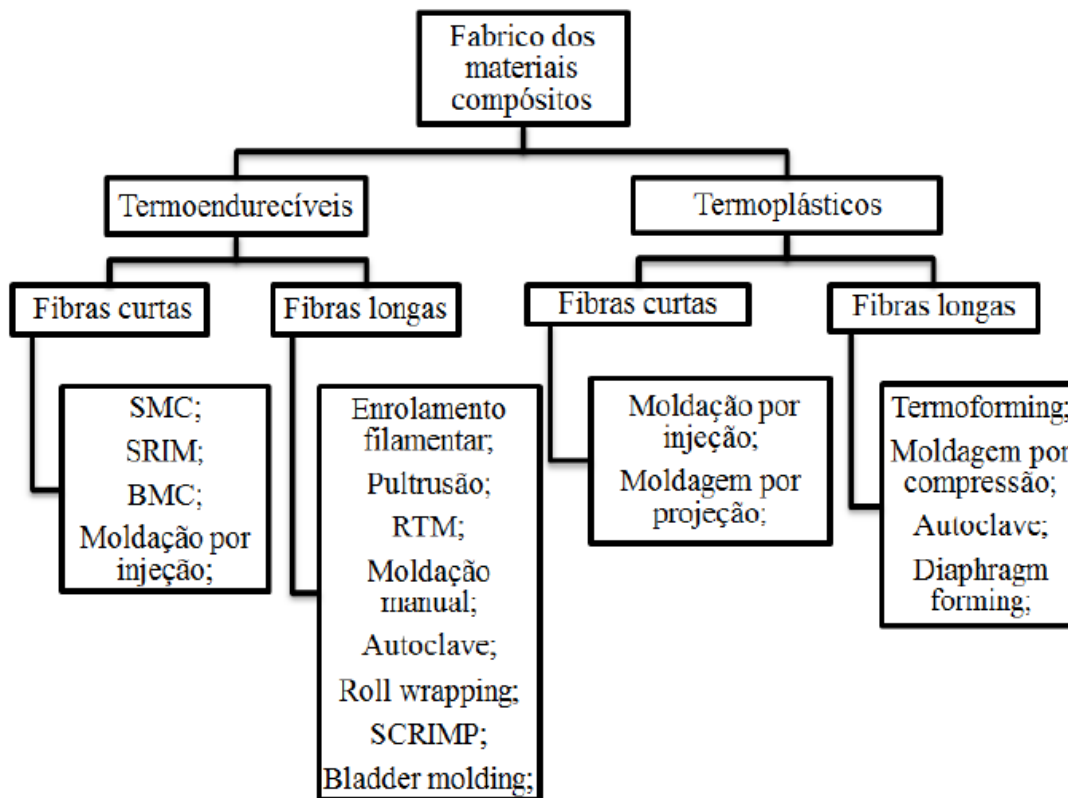


Figura 2.5. Classificação dos processos de fabricação em função do tipo de resina utilizada [10].

Neste estudo, foram usados compósitos produzidos por moldação em autoclave e, por isso, será dado mais destaque a este tipo de processo.

2.1.4.1. Moldação em autoclave

O processo de moldação em autoclave é geralmente usado no fabrico de laminados de elevado desempenho, como é o caso dos utilizados pelas indústrias aeronáuticas e espaciais. Este processo consiste na consolidação de um componente pré-formado através da aplicação simultânea de temperatura, pressão e vácuo, estágios que dependem do material a moldar, o que implica uma subida gradual de temperatura, estágio a valores constantes e diminuição também gradual. Na primeira fase procura-se baixar a viscosidade da resina para a eliminação de voláteis e promover o fluxo da resina, de modo a

garantir teores de fibra elevados e homogêneos. A segunda etapa é a cura e consolidação do componente, na qual a pressão desempenha o papel mais relevante [3], [10].

Este processo de moldação está frequentemente associado a materiais compósitos laminados. Para a obtenção desses laminados, um pré-impregnado é cortado e empilhado sobre o molde na sequência pretendida, e até se atingir a espessura desejada. Seguidamente, o conjunto é inserido num saco de vácuo e sujeito a um ciclo de pressão e temperatura definidos. Na Figura 2.6, representa-se a moldação em saco de vácuo [10]. Posteriormente, o molde juntamente com o impregnado são colocados num autoclave, de modo a consolidar o componente pré-formado através da aplicação simultânea de pressão, temperatura e vácuo. Por fim, procede-se à separação da peça e acabamento final [3], [10].

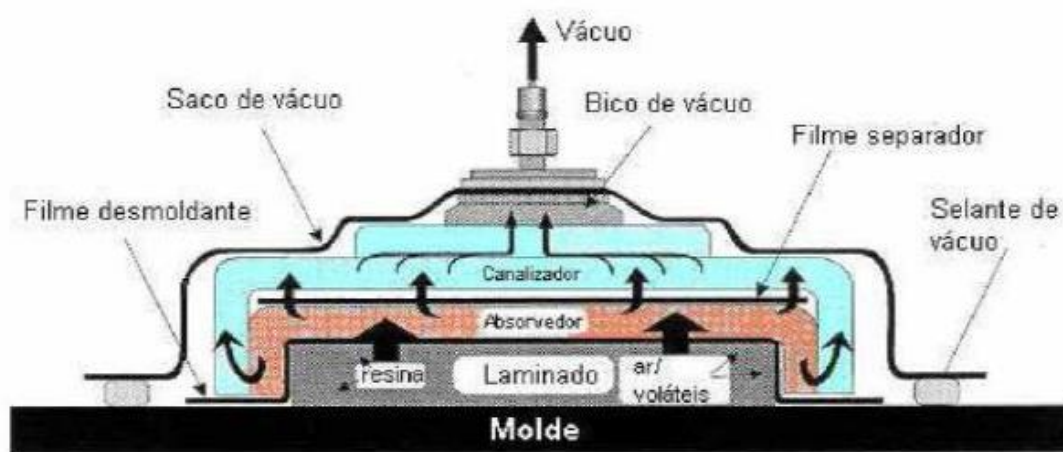


Figura 2.6. Representação do saco de vácuo [10].

As principais desvantagens deste tipo de moldação é o forte investimento inicial e o tempo necessário para a obtenção das peças, o que faz com que o processo não seja adequado para um grande número de séries [10].

2.2. Degradação em Materiais Compósitos

Tal como acontece para outros materiais, a utilização de compósitos está condicionada pelas solicitações e condições exteriores a que o componente está sujeito. Neste sentido, com o aumento do uso de materiais compósitos, cada vez mais estudos sobre diferentes tipos de degradação nestes materiais têm sido realizados. Pretende-se prever o comportamento dos compósitos e a sua vida útil, simulando as condições de serviço a que estariam sujeitos.

Por degradação de materiais entende-se qualquer reação destrutiva que possa ser causada por agentes químicos, físicos, mecânicos ou em simultâneo. Assim, pode existir uma modificação irreversível dos materiais, e portanto, uma deterioração progressiva nas suas propriedades mecânicas [11].

São inúmeros os agentes exteriores que podem provocar alterações num material e podem estar presentes em várias situações. A água do mar, por exemplo, é um agente de degradação muito forte e que afeta o desempenho do casco dos barcos, hoje em dia feitos com recurso a materiais compósitos. Soluções químicas, ácidas ou alcalinas, óleos ou humidade, também provocam degradação nos materiais. Para esta dissertação, os estudos com soluções químicas e diferentes temperaturas e teores de humidade são os de maior interesse.

2.2.1. Temperatura

No caso dos materiais compósitos poliméricos, as mudanças de temperatura que possam surgir durante o seu uso tornam-se determinantes, pois o seu campo de aplicação encontra-se bem limitado [11].

Nos polímeros, existe uma temperatura limite designada por temperatura de transição vítrea (T_g) que proporciona a passagem de um estado vítreo e frágil para um sólido elástico e dúctil. A aproximação da temperatura do compósito para o nível do valor T_g torna a componente polimérica muito macia e as principais propriedades mecânicas, como a resistência e a rigidez, diminuem acentuadamente. Na Figura 2.7 está representada a variação do módulo de elasticidade com a temperatura, assim como o comportamento da curva do coeficiente de perda ($\tan \delta = E''/E'$) em que E'' representa o módulo de perda e E' o módulo de ganho [12].

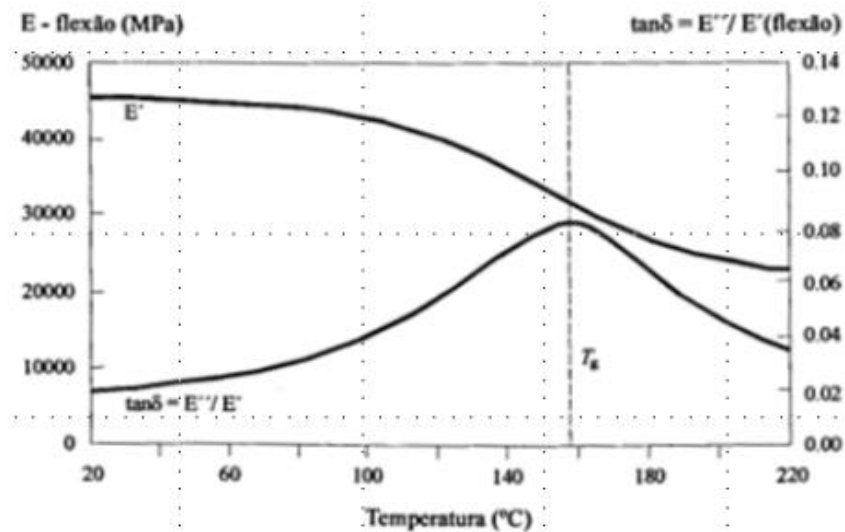


Figura 2.7. Efeito da temperatura no comportamento dinâmico de uma resina [12].

Geralmente, a condutividade ao longo das fibras é maior do que a condutividade através da espessura levando a um aumento de fluxo de calor para, ou a partir, dos extremos dos laminados. Observa-se, assim, que as camadas superficiais são as mais afetadas e que as dilatações térmicas produzem grandes danos no polímero. Também se verifica que, devido à incompatibilidade do coeficiente de expansão térmica, criam-se tensões internas entre camadas que, quando excedem a resistência mecânica do material, conduzem a fissuras na matriz [11]. Conclui-se então que, o aumento da temperatura irá provocar uma diminuição nas propriedades mecânicas do material.

Por outro lado, quando os compósitos são expostos a baixas temperaturas, propriedades como a resistência e a rigidez do material compósito mantêm-se inalteráveis [12].

2.2.2. Humidade

A humidade condiciona severamente o uso de materiais compósitos, pois afeta a matriz e as fibras. Além disso, pode ainda afetar a aderência matriz/fibra, alterando a integridade estrutural do material. A água é conduzida para o interior do material através das fibras, da interface matriz/fibra, da natureza hidrófila das matrizes, dos defeitos que possam ter ocorrido durante o fabrico, dos poros existentes na matriz ou das fissuras provocadas por fatores ambientais ou de serviço [11].

No que diz respeito à matriz polimérica, a absorção de humidade dá origem a uma redução do valor da temperatura de transição vítrea e das suas propriedades mecânicas [12]. Na figura 2.8 estão representados os efeitos higrotérmicos na T_g e na rigidez de uma matriz polimérica. Para cada 1% de ganho em peso ocorre uma redução da T_g entre os 10 e os 20 °C [11].

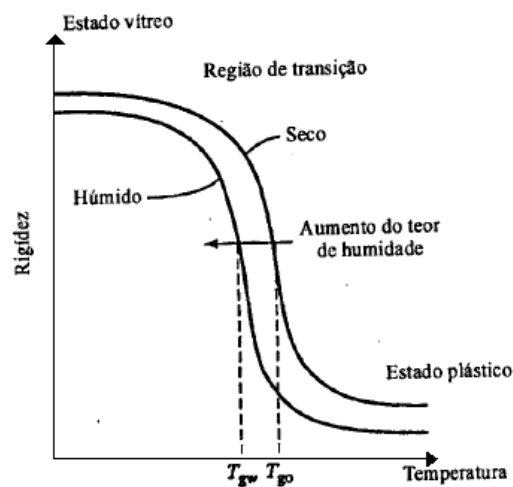


Figura 2.8. Variação da rigidez e do T_g com os efeitos higrotérmicos (T_{gw} - T_g húmido, T_{g0} - T_g seco) [12].

Ao promover a dilatação do compósito a humidade induz tensões internas que, ao excederem as forças de ligação da matriz, promovem fissuras normalmente na camada exterior. Com isto, as propriedades mecânicas são novamente afetadas, estando criadas condições para uma maior absorção de água [11].

A T_g é um parâmetro muito importante nos compósitos de matriz polimérica pois é o que define a gama de temperaturas em que se pode trabalhar com este material, sem que haja degradação prematura do mesmo.

Huang e Sun [13] estudaram as propriedades mecânicas de compósitos laminados de fibra de vidro/poliéster imersos em água, à temperatura de 30°C durante 7, 14 e 21 dias. Observaram que a estrutura do laminado tende a plastificar com o aumento do tempo de imersão, aumentando a sua resistência à flexão. Concluíram, assim, que depois de algum tempo de imersão, as propriedades dos compósitos se alteraram.

Num outro estudo, Botelho *et al* [14] analisaram o efeito do condicionamento higrotérmico nas propriedades elásticas de compósitos de fibra de vidro/epóxi nas condições

de 80°C, 90% de humidade relativa e período de exposição de 6 semanas. Verificaram que, após este período, havia um decréscimo da resistência à tração, resistência à compressão e módulo de elasticidade à tração de 22%, 18% e 12,4%, respetivamente, em relação às amostras de teste. Concluíram, assim, a degradação observada resultou da plastificação da matriz devido à temperatura e humidade a que os compósitos estavam expostos.

2.2.3. Soluções Corrosivas

Hoje em dia, como já foi referido anteriormente, o uso de materiais compósitos para o transporte de matérias corrosivas tem aumentando significativamente. Neste sentido têm sido realizados mais estudos nos quais se analisa o efeito tanto de soluções alcalinas como de soluções ácidas nas propriedades de compósitos. Mahmoud *et al.* [15] concluíram que as alterações na resistência à flexão, dureza e resistência ao impacto nos ensaios de *Charpy* dependem do tipo de ácido e do período de imersão. Stamenovic *et al.* [15] estudaram o efeito de soluções alcalinas e ácidas, e concluíram que a solução alcalina diminuía a resistência à tração e que esta tendência se agravava com o aumento do pH da solução. Kawada e Srivastava [17] concluíram que a fissuração por tensões corrosivas em componentes plásticos reforçados com fibra de vidro ocorre como resultado da combinação das cargas e da exposição a ambientes corrosivos. Fissuras pontiagudas iniciam-se e propagam-se através do material como consequência direta do enfraquecimento das fibras de vidro causado pelo ácido.

As soluções corrosivas provocam degradação das propriedades mecânicas dos compósitos, sendo as soluções alcalinas as que apresentam piores resultados. A força máxima e a energia elástica diminuem com o tempo de imersão, enquanto que o deslocamento máximo e a área afetada aumentam [18].

Num estudo realizado por Amaro *et al* [18], os provetes foram imersos em ácido clorídrico (HCl) e ácido sulfúrico (H₂SO₄), com concentração de 10% , nível de pH de 1,5, temperatura de 25°C e o tempo de exposição foi de 12, 24 e 36 dias. Para ambas as soluções e para todos os períodos de imersão, observaram que o dano principal ocorre por fratura das fibras na superfície, seguida de delaminação entre camadas, que cresce com o aumento do tempo de imersão. Verificaram-se que, independentemente da solução, há uma diminuição significativa da resistência à flexão e do módulo à flexão com o tempo de imersão. No entanto, para longos períodos, os provetes sob a ação de HCl apresentam os valores mais

baixos. Do mesmo estudo foi possível concluir-se que a solução de HCl é responsável por um maior decréscimo das propriedades mecânicas à flexão, o que está de acordo com estudos anteriormente realizados [18].

Relativamente à variação de massa, depois dos 36 dias de exposição, as amostras apresentam um ganho de massa em ambas as soluções. Constata-se que a absorção das soluções leva à expansão da matriz e aparecimento de cavidades e/ou o desenvolvimento de micro tensões. A nível da rugosidade, esta aumenta com o período de imersão. Ao fim dos 36 dias, o valor de Rz (média da altura pico a vale) é ligeiramente superior para HCl. A dureza da matriz polimérica aumenta após o período de imersão relativamente às amostras de controlo [18]. Mahmoud *et al* [15] mostrou num outro estudo que a diminuição das propriedades mecânicas pode ser explicada pela absorção, penetração e reação que ocorre entre as soluções e os constituintes dos compósitos.

Ainda nesse estudo foram efetuados ensaios de impacto a baixa velocidade com múltiplos impactos. O primeiro impacto foi realizado com energia de impacto de 8J e os seguintes energia de impacto de 4J. Estes autores concluíram, comparando as amostras de controlo com as amostras imersas em H_2SO_4 durante 12 dias, que a força máxima diminui e o deslocamento aumenta, sendo observada a mesma tendência para os provetes imersos em HCl. Neste tipo de ensaios, o tempo de imersão mostrou-se determinante. Comparando os valores entre 12 e 36 dias de exposição, observa-se uma degradação das propriedades superiores para os provetes imersos durante um maior período de tempo [18].

Para ambas as soluções, a rigidez à flexão por impacto diminui relativamente às amostras de controlo e depende muito do tempo de exposição. O número de impactos até à rotura do material depende do tipo de solução em que os provetes foram imersos, bem como do tempo de exposição. É considerada rotura total do provete quando ocorre perfuração completa. Mais uma vez, a solução de HCl foi responsável pela pior resistência ao impacto do material [18].

Num outro estudo [1] as amostras foram imersas numa solução de ácido clorídrico (HCl) e hidróxido de sódio (NaOH) ambas com concentração de 10%, pH de 1,5 e 13, respetivamente, temperatura de 25°C e o tempo de exposição foi de 12, 21 e 36 dias. Fizeram-se, também, ensaios à flexão e de impacto a baixa velocidade. Após observar os compósitos depois do tempo de imersão, novamente para todos os laminados, soluções e períodos de imersão, verificaram que o principal dano ocorria por fratura das fibras na

superfície de tração seguida de delaminação entre camadas. Estas delaminações, independentemente das soluções, aumentavam com o tempo de imersão e, para todos os períodos de imersão estudados, eram maiores no meio alcalino. Observaram que, independentemente da solução, a resistência à flexão e o módulo à flexão diminuí com o tempo de exposição das amostras. No caso de NaOH, a resistência à flexão diminuiu 5,8%, 11,1% e 22% para 12, 21 e 36 dias de exposição, respetivamente. Relativamente ao HCl, a resistência à flexão diminuiu, respetivamente, para os mesmos tempos de exposição, cerca de 2,9%, 9,0% e 16,2%. A mesma tendência ocorre no módulo à flexão. Do referido estudo verificou-se que as soluções alcalinas promovem maior decréscimo das propriedades à flexão, comparativamente com o promovido pela imersão na solução ácida [1]. Anteriormente, Banna et al [2] tinha estudado a degradação de materiais compósitos usando ensaios de tração e flexão e concluíram que este último era mais sensível à alteração das condições a que as amostras estavam expostas.

Na variação da massa, ao fim de 36 dias, verifica-se o aumento de massa o que, de novo, traduz um aumento da matriz com ocorrência de cavidades e desenvolvimento de micro tensões nos compósitos [1].

Em termos de rugosidade, esta aumenta com o tempo de exposição sendo superior para os provetes imersos na solução alcalina. Quanto à dureza, observa-se um aumento em ambas as soluções, sendo que o maior valor é obtido aos 12 dias, levando a um aumento de 20,8% para laminados imersos em NaOH e 12,5% nos imersos em HCl [1].

Para ambas as soluções, os referidos autores [1] constataram que a rigidez à flexão por impacto diminuiu relativamente ao valor obtido na amostra de controlo, e que é altamente dependente do tempo de exposição. Verificaram ainda que a resistência dos laminados a impactos repetidos a baixa velocidade é muito influenciada por ambientes corrosivos e pelo tempo de exposição. Após 36 dias, a resistência ao impacto tinha diminuído cerca de 64,3% para as amostras imersas em NaOH e 35,7% para os provetes sob a ação da solução de HCl, quando comparado com as amostras de controlo. Esta tendência era o esperado devido ao maior dano que o NaOH provoca devido a ser altamente corrosivo [1].

2.3. Impacto em materiais compósitos

De acordo com o já referido este trabalho tem como objetivo avaliar a resistência ao impacto de compósitos expostos a ambientes corrosivos. A vulnerabilidade dos materiais compósitos ao impacto é amplamente conhecida. O dano provocado por um impacto a baixa velocidade, ainda que imperceptível exteriormente, pode reduzir a resistência à compressão pós-impacto até cerca de 70% [19].

As propriedades de impacto de um material representam a capacidade que este apresenta para absorver e dissipar energias em casos de impacto, que podem ser provocados acidentalmente, por exemplo, devido a uma queda acidental de ferramentas ou colisões a velocidades elevadas durante o seu fabrico e/ou transporte. As consequências dos impactos podem ir desde danos localizados até à desintegração completa do material [4].

Apesar de não existir concordância em relação ao modo de classificar os impactos, a maioria dos autores dividem a classificação destes em dois grupos: impactos de baixa velocidade e impactos a alta velocidade. Os primeiros são caracterizados por terem velocidades inferiores a 10 m/s (valor também não consensual entre autores), e podem reduzir drasticamente as propriedades mecânicas do compósito. O dano que é provocado no compósito após este tipo de impacto é considerado um dos tipos de dano mais perigosos. As alterações das propriedades mecânicas verificam-se devido ao rompimento de algumas fibras ou rutura da matriz. Os impactos a alta velocidade, como é o caso de um disparo de uma pistola, caracterizam-se por velocidades superiores a 10 m/s. O impacto pode provocar o rompimento do material e, sendo o dano visível, pode-se proceder rapidamente à substituição do componente em causa [8].

Os métodos utilizados para avaliar o comportamento ao impacto de um material são geralmente destrutivos, sendo os mais comuns os ensaios de *Charpy* e *Izod* que são dispositivos pendulares. Existem ainda dispositivos baseados na queda livre de um peso, com energia e velocidade previamente definidos pelo operador [4], [8].

2.3.1. Dano

De entre os vários tipos de dano que os compósitos laminados podem sofrer, o resultante do impacto é um dos mais perigosos. Estes materiais dissipam a energia do

impacto pela combinação do dano da matriz, rotura das fibras e descolagem fibra-matriz [19].

A resistência ao dano é a capacidade do material de resistir ao defeito, isto é, a capacidade que o material tem de não permitir a existência de dano com uma certa força de impacto ou de minimizar a existência daquele. Enquanto a tolerância ao dano é a capacidade do material continuar a suportar os esforços para os quais foi projetado depois da presença do mesmo [20].

No caso de compósitos laminados, quando o impacto afeta a integridade da ligação matriz/reforço ou apenas a matriz e esta cede às forças a que a peça está sujeita no momento, existe delaminação na camada afetada e possível falha de todo o sistema [20]. A delaminação ocorre quando uma fenda se propaga por uma camada, e se detém quando atinge as fibras de uma camada adjacente. Devido às elevadas tensões de corte adjacentes à crista da fenda, esta divide-se e propaga-se paralelamente ao plano das camadas. É possível identificar três modos diferentes de sollicitação e cedência que originam delaminação e encontram-se esquematizados na Figura 2.9: forças de tração que dão origem a abertura de fendas (Modo I), forças de corte no plano que têm como consequência o deslizamento das camadas (Modo II) e forças de corte exteriores ao plano que provocam arrancamento (Modo III) [4].

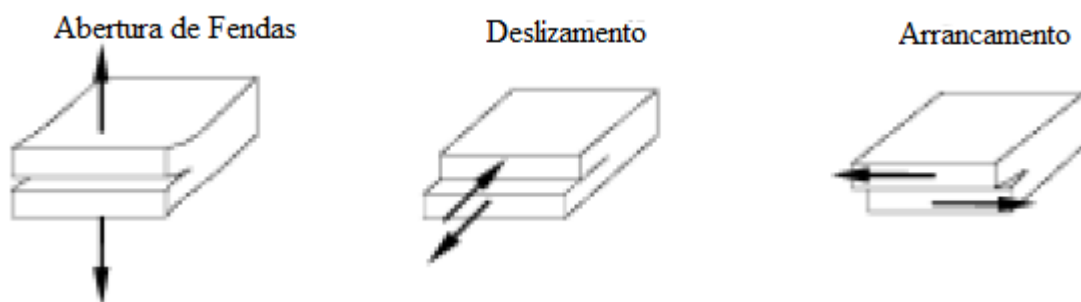


Figura 2.9. Representação dos diferentes modos de cedência [4].

Para além da delaminação, em compósitos laminados, existe também a fissura da matriz, descolagem fibra-matriz e rotura de fibras [20]. A deformação da matriz é um aspeto importante pois é responsável pela rigidez e resistência ao impacto exibidas pelos compósitos [19]. A descolagem fibra-matriz começa por um aumento de carga na fibra e respetiva deformação elástica, altura em que as ligações químicas e físicas são quebradas. Se este tipo de separação for extenso leva a um aumento significativo da energia absorvida durante o impacto. Este aumento de energia pode ainda ser maior com a diminuição da força de ligação nas interfaces, promovendo delaminação e separação fibra-matriz. Este tipo de

dano ocorre quando as fibras são bastante fortes e a matriz frágil [4]. Por fim, outro dano que pode ocorrer é a rotura das fibras. A rotura das fibras pode ter um efeito muito prejudicial tanto na resistência como na rigidez dos materiais compostos laminados [19]. Quando a fenda se propaga numa direção perpendicular à orientação da fibra, estas acabam normalmente por quebrar, levando à separação completa do laminado. As fibras quebram quando atingem o seu limite máximo de deformação. Este é o dano responsável pela maior diminuição da resistência à tração dos compostos [4], [19]. Na Figura 2.10 está esquematizada a propagação de uma fenda num material composto.

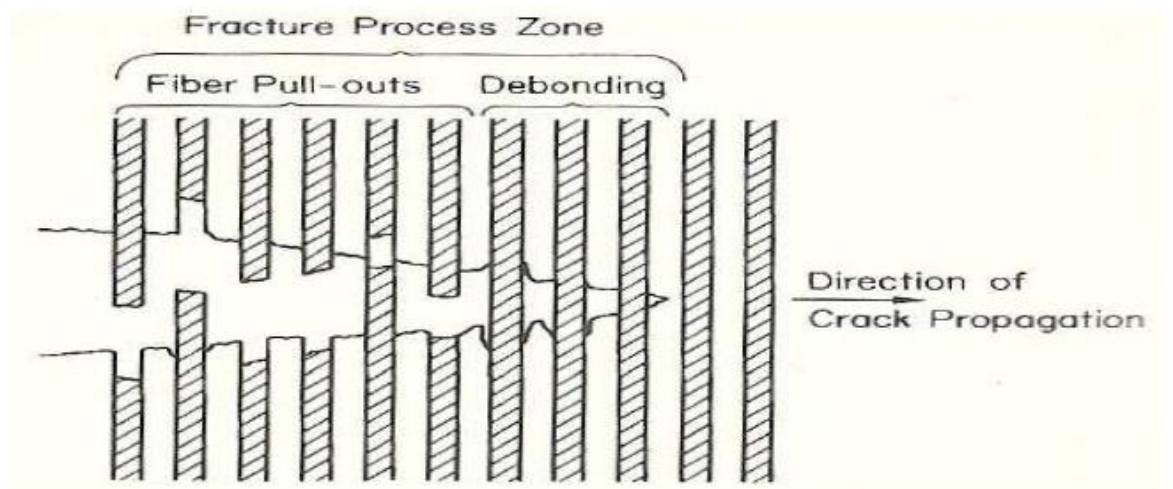


Figura 2.10. Esquema de efeitos locais num composto fibroso devido à propagação de fenda [4].

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são descritos os materiais utilizados no presente estudo, assim como todos os ensaios ou outros procedimentos laboratoriais efetuados.

3.1. Produção de Compósitos Laminados

As amostras de material compósito foram produzidas, em forma de placa, no Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica (INEGI), no Porto. Como referido anteriormente, a matriz polimérica utilizada neste estudo foi a resina epóxi, cuja temperatura de transição vítrea é de 114°C. O tamanho inicial das placas é de 300×300 [mm].

O processo de moldação foi por autoclave, com o ciclo de cura representado na Figura 3.1. A taxa de aquecimento foi de 3°C/min desde a temperatura ambiente até 130°C. O patamar isotérmico foi de 1h. Após este período o arrefecimento até à temperatura ambiente, aproximadamente 25°C, ocorreu à mesma velocidade do aquecimento. O valor de pressão selecionado para este ciclo foi de 2 bar. As placas possuíam no total 8 camadas cuja sequência de empilhamento era do tipo $[0_2, 90_2]_s$, como resultado da sobreposição alternada de resina e respetivo reforço. Assim, obtiveram-se placas de dimensões típicas 300×300×1,2 mm. Os provetes ensaiados foram obtidos por corte destas placas.

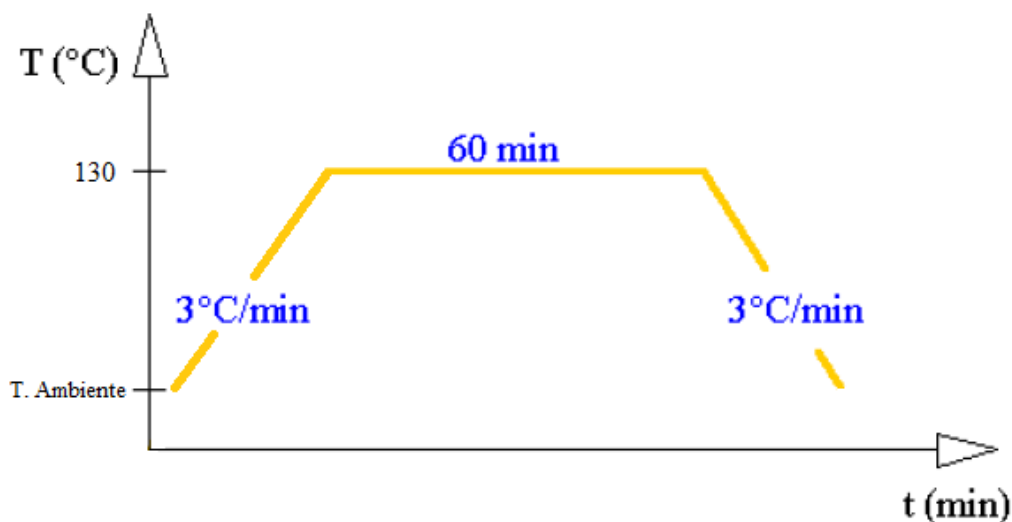


Figura 3.1. Ciclo de cura das placas laminadas [19].

3.2. Conceção dos provetes

As placas de laminados foram posteriormente seccionadas em dois tipos de provetes, função do tipo de ensaio a realizar. As normas que suportam cada ensaio experimental ditam as dimensões dos provetes.

Para melhor compreensão é feita, de seguida, uma breve descrição da conceção dos provetes.

3.2.1. Ensaio de Impacto Transversal

O ensaio de impacto transversal, também denominado ensaio *Charpy*, segue a norma ISO 179. Nesta está estabelecido que a largura dos provetes deverá ser inferior a 15 mm e o comprimento deverá ser superior a 60 mm. Este último valor está condicionado com a distância entre os apoios. Tendo em conta estas especificações, os provetes foram maquinados com 80 mm de comprimento e 10 mm de largura.

O processo de corte foi efetuado por recurso a serra elétrica, como se mostra na Figura 3.2.a). Com este procedimento evita-se a danificação do reforço, levantamento/arrancamento de fibras. Com o objetivo de remover eventuais rebarbas ou imperfeições nas arestas resultantes do processo de corte, retificam-se os provetes num equipamento de polimento, como se mostra Figura 3.2.b).



a)



b)

Figura 3.2. a) Serra elétrica de corte com disco (2mm) diamantado; b) Equipamento de polimento com lixas de SiC (320 mesh) e água como lubrificante.

3.2.2. Ensaio de Impacto Longitudinal

O ensaio de impacto longitudinal segue a norma ISO 8256 método A geometria dos provetes para este ensaio encontra-se representada na Figura 3.3, e as respectivas dimensões, de acordo com a legenda, estão compiladas na Tabela 3.1. Os provetes foram seccionados utilizando o equipamento de Controlo Numérico Computorizado (CNC) da Marca MIKRON modelo VCE500, disponível no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra (DEM-UC).

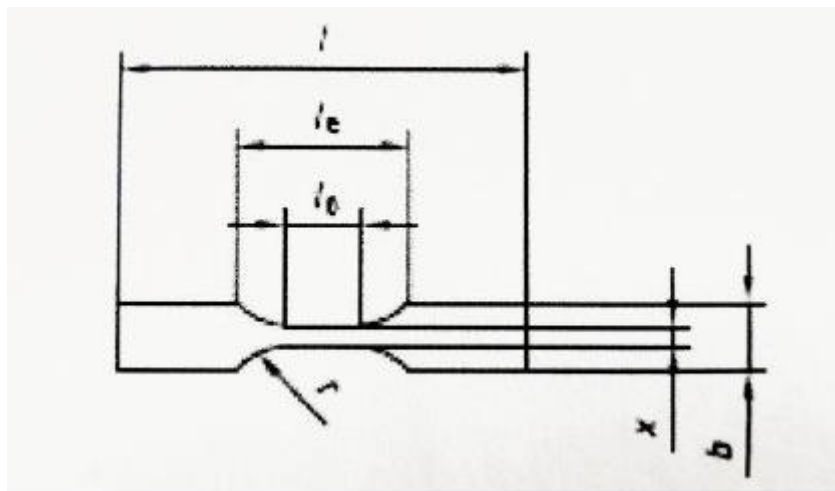


Figura 3.3. Dimensões do provete tipo 2, segundo a norma ISO 8256 método A [21].

Tabela 3.1. Dimensões dos provetes do tipo 2.

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

3.2.3. Ensaio de Flexão em Três Pontos

Os provetes utilizados no ensaio de flexão foram dimensionados de acordo com a norma ASTM D790-2. Esta norma refere que:

- i. Provetes de espessura inferior a 1,6 mm devem possuir comprimento e largura de 50,8 mm e 12,7 mm, respetivamente;
- ii. O valor da distância entre apoios deverá ser 16 vezes superior ao valor da sua espessura.

O ensaio de flexão foi realizado em provetes excedentários do ensaio de impacto transversal. Tal significa que as dimensões dos provetes testados eram superiores às previstas

pela norma do ensaio à flexão. Assim, os resultados obtidos permitiram o estudo comparativo entre propriedades mecânicas. De salientar que este estudo recaiu apenas numa das várias condições de estudo: soluções a 10% com tempo de imersão 60 dias.

3.3. Imersão dos Provetes em Soluções Aquosas

Os provetes foram imersos em dois tipos de soluções aquosas: alcalina, de hidróxido de sódio (NaOH), e ácida, de ácido clorídrico (HCl). As concentrações selecionadas, em peso/volume, foram as mesmas, isto é, de 10, 20 e 30%.

Tal como se mencionou anteriormente, pretende estudar-se a influência do tipo de solução, bem como, a sua concentração no comportamento mecânico dos materiais compósitos produzidos (subcapítulo 3.1). Neste estudo também se selecionaram duas outras variáveis, o tempo e a temperatura de imersão em solução.

O procedimento anterior à imersão dos provetes nas várias soluções consistiu em aquecimento numa mufla à temperatura de 25°C durante 3 horas. O objetivo deste pré-tratamento é diminuir o teor em humidade dos provetes. Identificaram-se a seguir todos os provetes, retificaram-se as suas dimensões e respetiva massa.

Posteriormente, os provetes foram colocados em recipientes contendo as soluções a 10, 20 e 30% de concentração. A Figura 3.4 ilustra o procedimento experimental de imersão na solução alcalina (Figura 3.4.a) e ácida (Figura 3.4.b)). Note-se que, neste trabalho, a imersão foi completa, isto é, ambas as faces dos compósitos estavam em contacto com as soluções. No entanto, em situações reais, apenas uma está em contacto com ambientes agressivos.

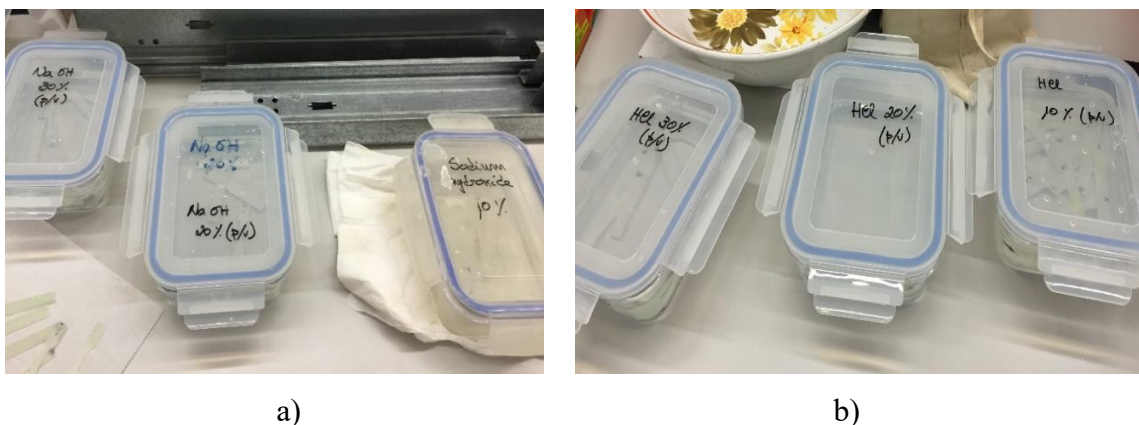


Figura 3.4. Provetes imersos em: a) soluções de hidróxido de sódio (NaOH); b) soluções ácido clorídrico (HCl).

A duração do tempo de imersão variou consoante a concentração da solução. Para 10%, alcalina ou ácida selecionaram-se quatro tempos: 15, 30, 60 e 90 dias. Para 20%, alcalina ou ácida, os tempos de imersão foram de 15 e 30 dias. De salientar que para este valor de concentração fez-se ainda o estudo do efeito da temperatura. Assim, para as imersões de 15 dias utilizaram-se duas temperaturas, abaixo e acima da temperatura ambiente, 8 e 40°C, respetivamente. Finalmente, para 30% de concentração apenas se utilizou um tempo de imersão, 30 dias, e uma temperatura, temperatura ambiente. A Tabela 3.2 mostra, resumidamente, as condições de imersão dos provetes.

Tabela 3.2. Condições de imersão dos provetes.

<i>Temperatura</i> [°C]	<i>Tempo</i> [dias]	<i>Concentração</i> [%]	<i>pH básico</i>	<i>pH ácido</i>
25	15	10	13,4	0,8
25	30	10	13,4	0,8
25	60	10	13,4	0,8
25	90	10	13,4	0,8
8	15	20	13,7	0,6
40	15	20	13,7	0,6
25	30	20	13,7	0,6
25	30	30	13,9	0,3

O número total de provetes ensaiados neste estudo foi de aproximadamente 108. A distribuição destes provetes pelos dois tipos de soluções e ensaios mecânicos é mostrada na Tabela 3.3.

Após cada período de imersão, os compósitos laminados foram secos recorrendo a folhas de papel e, novamente pesados e, posterior, ensaiados mecanicamente.

Tabela 3.3. Distribuição dos provetes pelas soluções e ensaios.

	<i>Solução</i>	<i>Impacto</i>		<i>Flexão em Três</i>	
		<i>Transversal</i>	<i>Longitudinal</i>	<i>Pontos</i>	<i>Total</i>
NaOH	10%	12	12	9	33
	20%	3	12	0	15
	30%	3	3	0	6
HCl	10%	12	12	9	33
	20%	3	12	0	15
	30%	3	3	0	6
					108

Neste estudo realizaram-se também ensaios mecânicos em provetes de controlo, isto é, provetes que não foram submetidos a qualquer tipo de exposição agressiva, utilizando-se três espécies por cada ensaio mecânico. Este procedimento permite fazer o estudo comparativo dos materiais compósitos sem e com imersão em soluções aquosas. De referir que a dureza e a rugosidade foram também avaliadas em provetes de controlo.

3.4. Avaliação da Massa

A massa de todos os provetes foi registada antes e após imersão, de modo a aferir-se o ganho ou perda de massa. Esta avaliação foi feita com o auxílio da balança digital da marca AND modelo GH-202, que efetua medições com precisão até à décima de micrograma, mostrada na Figura 3.5, pertencente ao DEMUC.



Figura 3.5. Balança

A variação de massa, m_r , foi obtida por recurso à Equação 3.1 [1].

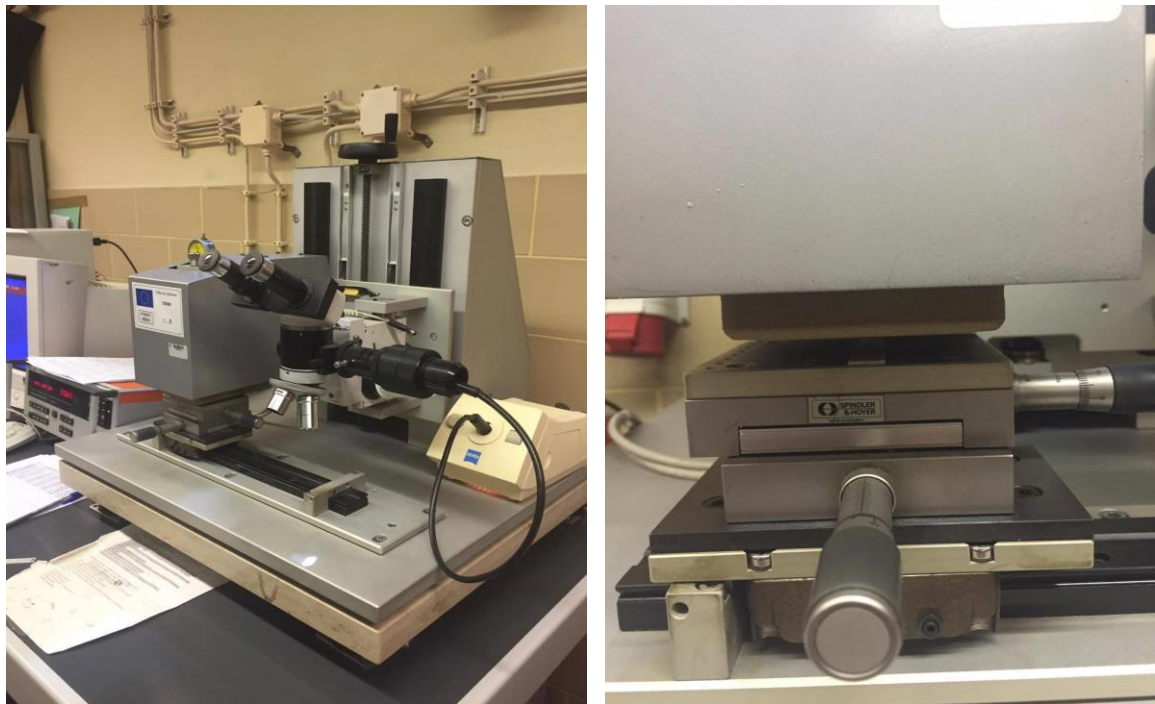
$$m_r[\%] = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100 \quad (3.1)$$

em que m_f – massa final do provete, após imersão
 m_i – massa inicial provete.

3.5. Avaliação da Dureza

A dureza, definida como a resistência à deformação plástica de um material, foi obtida por ultramicroidentação *Vickers*. O equipamento utilizado (Figura 3.6) é da marca Fisherscope H100 e pertence ao DEM-UC. Para isso, é usado um material com uma resistência à deformação plástica (dureza) superior à do material que se pretende estudar. De referir que durante o processo de focagem, evitou-se a presença do reforço, avaliando-se somente a matriz.

O ensaio de dureza *Vickers* é muito utilizado pois, além do seu procedimento ser bastante simples, este ensaio não necessita da destruição das amostras.



a)

b)

Figura 3.6. a) Equipamento de ultramicroidentação de *Vickers*. b) Provete sujeito a indentação.

O procedimento deste ensaio divide-se em três fases de carregamento: aplicação da carga, indentação e descarga. O valor da carga foi de 150 mN e a indentação foi de 30 segundos, procedendo-se, de seguida, à descarga. Em cada provete foram realizadas, em média, 11 passagens.

3.6. Avaliação da Rugosidade

Depois da exposição a soluções corrosivas, função da concentração, tempo e temperatura, avaliou-se a rugosidade dos provetes utilizando o equipamento Mitutoyo, modelo SJ-500 (Figura 3.7 a)). Para se obterem os parâmetros de rugosidade foram feitas várias passagens em diferentes zonas de cada provete. A Figura 3.7. b) ilustra uma dessas passagens.

Os valores obtidos referem-se à rugosidade média, R_a , rugosidade média quadrática, R_q , e altura média pico a vale, R_z , [7]. Estes ensaios decorreram no Laboratório de Construções Mecânicas do DEM-UC.

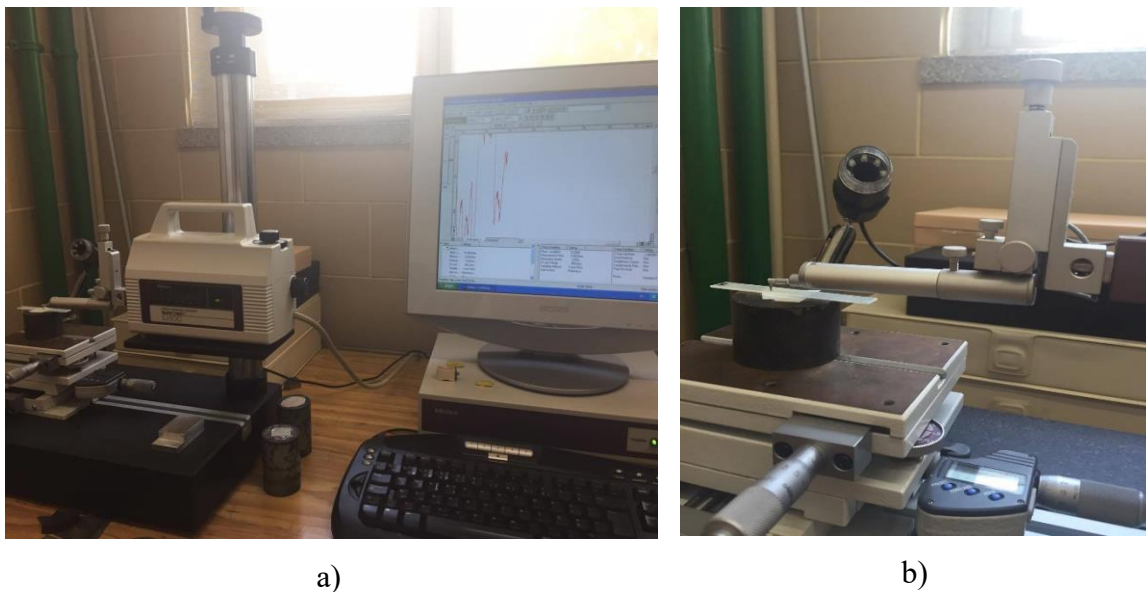


Figura 3.7. a) Equipamento de ensaio de rugosidade. b) Provette sujeito a uma passagem do rugosímetro.

3.7. Avaliação da Resiliência

A avaliação da resiliência foi conseguida recorrendo a dois ensaios mecânicos: impacto transversal e impacto longitudinal. Para tal utilizou-se o mesmo equipamento fabricante INSTRON, modelo CEAST 9050, disponível no Laboratório de Construções Mecânicas do DEM-UC. Ambos os ensaios permitem quantificar a capacidade de absorção de energia pelo provete até à rotura e avaliar a sua resistência ao impacto e respetiva resiliência.

Os ensaios de impacto transversal foram realizados em ambiente laboratorial, à temperatura ambiente, e regidos pela norma ISO 179. O martelo impactor pendular estava munido da referência M2129, designado com o código 7601.005.1, com uma energia de 5J e com uma velocidade impacto de 2,9 m/s. Antes da realização dos ensaios foi efetuada a calibração do equipamento. Assim que este estiver pronto para ser utilizado inserem-se as dimensões dos provetes e escolhem-se os parâmetros de teste no programa da CEAST. De seguida coloca-se o provete a ensaiar no suporte fixo do equipamento, ficando o provete apoiado nas suas extremidades conforme se vê na Figura 3.8 Por fim, solta-se o martelo impactor e este deve incidir na secção média do provete. O martelo encontra-se posicionado a 150°.



a)



b)



c)

Figura 3.8. a) Martelo e suporte do provete; b) Equipamento do ensaio de impacto transversal; c) Posicionamento dos provetes no suporte do equipamento.

Em relação aos ensaios de impacto longitudinal, os provetes são tracionados seguindo a norma ISO 8256. Tal como no caso anterior, também estes ensaios foram realizados em ambiente laboratorial, à temperatura ambiente. O martelo impactor utilizado tinha o código 7600.325, com energia de 25J. Após calibração da máquina, o provete é posicionado, fixando-o numa das suas extremidades e na outra foi colocado um componente onde o martelo vai embater provocando a tração do provete, como se vê na Figura 3.9. Na Figura 3.9.c) pode ver-se em detalhe o posicionamento do provete no suporte. O martelo impactor encontra-se posicionado a 150° e é solto para, ao incidir na amarra que segura o provete, o levar à rotura. Os dados resultantes dos ensaios foram obtidos através do próprio equipamento que possui um ecrã táctil onde foram também inseridas as dimensões dos provetes.



a)



b)



c)

Figura 3.9. b) Martelo prestes a embater no suporte móvel do provete; c) Fixação do provete com recurso a uma peça auxiliar.

3.8. Avaliação da Resistência à Flexão

A tensão máxima de flexão foi obtida através do ensaio de flexão em três pontos. O equipamento utilizado para a realização destes ensaios foi o SHIMADU AG-10, equipado com uma célula de carga de 5kN e com uma taxa de deslocamento de 5mm/min (Figura 3.10.a)). Estes ensaios foram realizados segundo a norma ASTM D790-2 e o *software* usado para a recolha de dados foi o TRAPEZIUM. A distância entre os pontos de apoio 2 e 3 (Figura 3.10.c)) foi de, 21,5 mm, valor estipulado tendo em conta a espessura dos provetes de cerca de 1,2 mm. A carga P [N] é aplicada no ponto 1. Na Figura 3.10 b) apresenta-se um provete sujeito ao ensaio de flexão em três pontos. Os ensaios realizaram-se no DEM-UC, à temperatura ambiente.

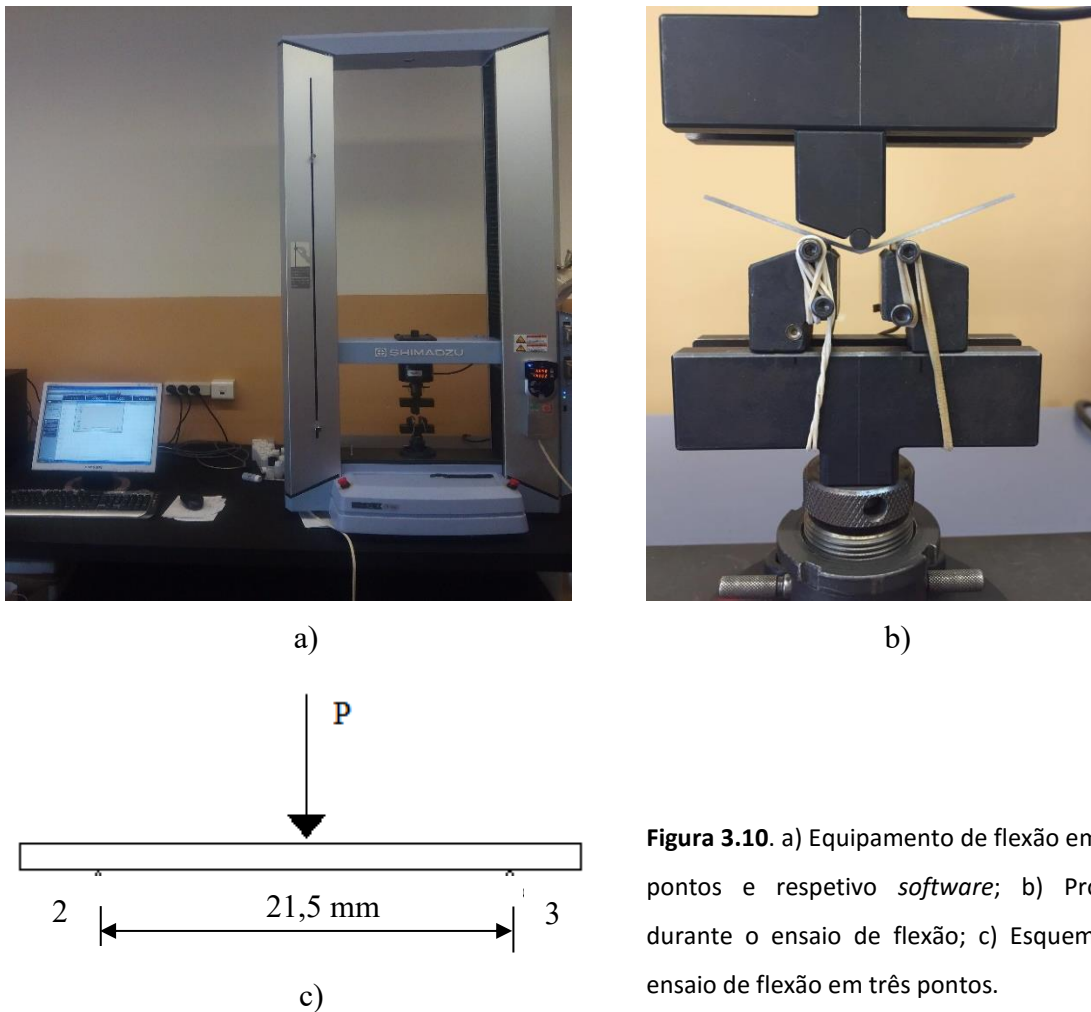


Figura 3.10. a) Equipamento de flexão em três pontos e respetivo *software*; b) Provete durante o ensaio de flexão; c) Esquema do ensaio de flexão em três pontos.

A resistência à flexão foi determinada através do cálculo da tensão de flexão na secção transversal, σ , utilizando o valor máximo da carga obtida, P . A tensão de flexão foi calculada com recurso à Equação 3.2.

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

em que P [N] representa a carga máxima, L [mm] a distancia entre os apoios, ou seja, entre os pontos 2 e 3 (ver Figura 3.10.c)), b [mm] a largura do provete e h [mm] a espessura do provete.

3.9. Visualização do dano

A visualização do dano sofrido pelos provetes após os ensaios destrutivos foi feita com o auxílio de um microscópio estereoscópio trinocular do fabricante Carl ZEISS,

modelo Stemi 2000-C, com ampliação 5X e dupla focagem (macrométrica e micrométrica). A este equipamento, encontra-se conectada uma câmara fotográfica digital do fabricante CANON, modelo POWERSHOT G5 com ampliação de 16X para a obtenção das imagens. O microscópio encontra-se ainda ligado a um computador, que possui o programa do microscópio e que permite a visualização das imagens (Figura 3.11). Desta forma, a análise do dano pode ser feita sem ter de recorrer ao binóculo do microscópio. Este equipamento encontra-se no Laboratório de Tecnologia Mecânica do DEM-UC.



Figura 3.11. Conjunto de equipamentos para a visualização do dano.

A diferença entre microscópio estereoscópio trinocular e binocular está na adaptação da câmara fotográfica. A visualização tridimensional é particularmente benéfica para análise de amostras opacas.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Tal como foi mencionado anteriormente, é objetivo deste trabalho estudar o efeito da imersão em soluções aquosas alcalinas e ácidas nas propriedades mecânicas de materiais compósitos laminados.

Optou-se por apresentar e discutir os resultados em função das variáveis experimentais, isto é, efeito do tempo de imersão, efeito da concentração das soluções NaOH e HCl e ainda o efeito da temperatura da solução.

4.1. Efeito do Tempo de Imersão

Os períodos de tempo estabelecidos para a imersão dos provetes foi de 15, 30, 60 e 90 dias. No fim de cada período retirou-se um grupo de três provetes de cada uma das soluções de NaOH e HCl (ver Tabela 3.3). De referir que o efeito do tempo de imersão foi estudado para as soluções de concentração 10% em NaOH e HCl. Optou-se por apresentar os resultados obtidos no provete de controlo adstritos a tempo nulo.

4.1.1. Variação de Massa

O efeito do tempo de imersão na gama 15-90 dias é iniciado pela apresentação da variação de massa dos provetes, já que esta resposta poderá ajudar a compreender o comportamento mecânico dos materiais em estudo.

A Figura 4.1 apresenta a variação de massa dos provetes nas duas soluções a 10%, função do tempo de imersão. A análise desta figura permite concluir que o efeito do tempo de imersão na variação de massa até 60 dias é similar para os dois tipos de solução. A diferença de comportamento só ocorre após este período. Os provetes imersos em solução 10% HCl apresentam aproximadamente o dobro do aumento obtido para a solução alcalina à mesma concentração.

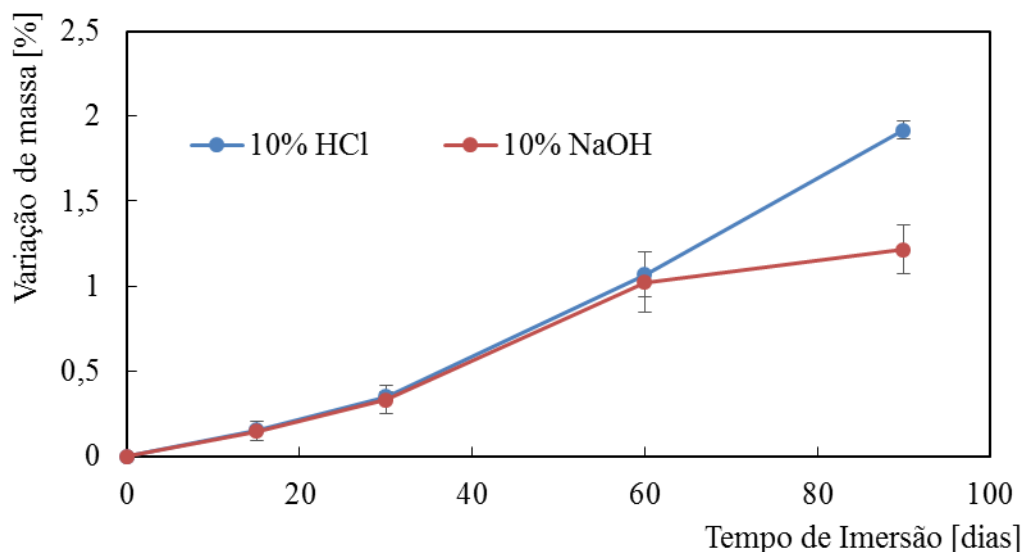


Figura 4.1. Variação da massa dos provetes na gama de tempo de imersão 15-90 dias.

4.1.2. Ensaio de Rugosidade

Os resultados da medição da rugosidade dos provetes, em valor médio, em função da solução e ao longo do tempo de imersão, estão apresentados na Tabela 4.1. Como foi já referido no subcapítulo 3.6, os parâmetros de rugosidade determinados foram a rugosidade média, R_a , a rugosidade média quadrática, R_z , e a altura média pico a vale, R_q . Sendo as evoluções bastante similares optou-se discutir a variação de R_q .

Tabela 4. 1. Rugosidade medida nos provetes, ao longo dos períodos de imersão.

Solução	Período	R_a [μm]	R_q [μm]	R_z [μm]
	Controlo	$2,63 \pm 0,34$	$3,34 \pm 0,38$	$15,25 \pm 0,92$
NaOH	15 dias	$3,19 \pm 0,8$	$4,1 \pm 1,05$	$17,37 \pm 2,89$
	30 dias	$3,36 \pm 0,57$	$4,34 \pm 0,75$	$16,53 \pm 2,07$
	60 dias	$3,69 \pm 0,01$	$4,57 \pm 0,01$	$19,95 \pm 0,01$
	90 dias	$4,17 \pm 0,13$	$5,49 \pm 0,38$	$26,05 \pm 2,84$
HCl	15 dias	$2,73 \pm 0,38$	$3,71 \pm 0,72$	$17,67 \pm 2,23$
	30 dias	$2,79 \pm 0,36$	$3,75 \pm 0,78$	$16,47 \pm 1,67$
	60 dias	$3,02 \pm 0,37$	$4,32 \pm 0,52$	$20,82 \pm 2,31$
	90 dias	$3,09 \pm 0,01$	$4,39 \pm 0,01$	$21,01 \pm 0,01$

Na Figura 4.2 apresenta-se o efeito do tempo no valor da rugosidade média dos provetes imersos em soluções aquosas a 10%.

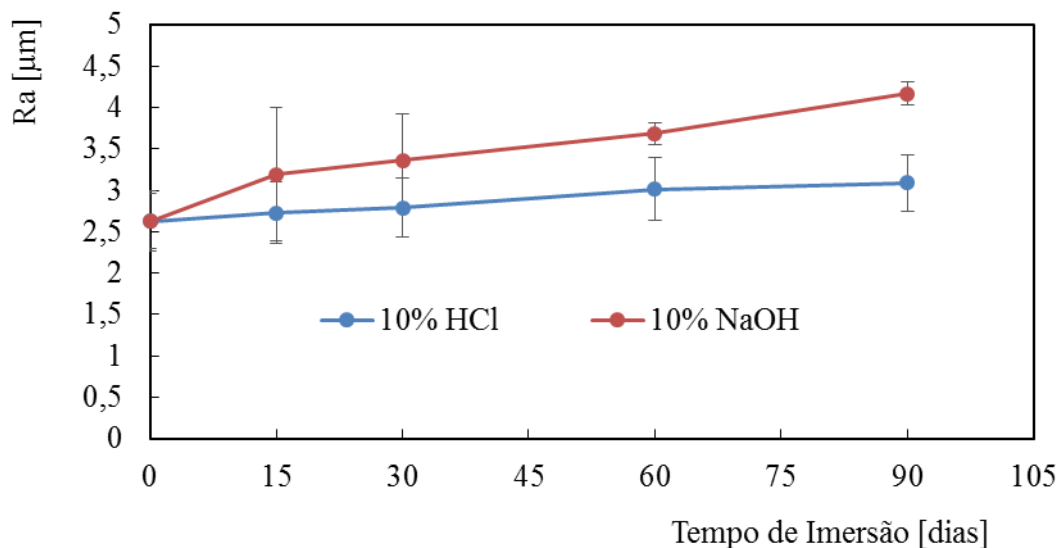


Figura 4.2. Variação da rugosidade média, R_a , ao longo do tempo.

Por análise da Tabela 4.1 é possível afirmar que o contacto com ambas as soluções promove um aumento no valor da rugosidade média dos provetes. Este incremento é superior em compósitos imersos em solução alcalina, como se pode observar na Figura 4.2. Os que foram imersos na solução de NaOH apresentam um aumento no valor da rugosidade média de 18% nos primeiros 15 dias de imersão, comparativamente com os provetes de controlo. Depois de 30 e 60 dias de imersão, os provetes apresentam um acréscimo no valor da rugosidade média de 22% e 29%, respetivamente, em relação aos de controlo. Por fim, depois de 90 dias quantificou-se o maior aumento de rugosidade, no total, de 37%, em relação ao provete controlo.

No caso dos provetes imersos em solução aquosa de HCl, a rugosidade média aumenta apenas 4% nos primeiros 15 dias de imersão e, 6 e 13% após 30 e 60 dias, respetivamente. Ao fim do tempo máximo selecionado neste estudo, o valor de rugosidade medido nos provetes controlo tinha aumentado cerca de 15%. Nesta solução, a maior variação no valor da rugosidade ocorreu entre os 30 e 60 dias, com o aumento de 8% deste parâmetro.

Conclui-se assim que, a solução de NaOH a 10% promove superfícies mais rugosas do que as obtidas para a mesma concentração em HCl. Estes resultados estão em

conformidade com os obtidos por Amaro *et al* [1]. Aqueles autores também usaram soluções aquosas a 10% de concentração em gamas de imersão entre 12 e 36 dias.

4.1.3. Ensaio de Dureza

A variação de dureza obtida por ultramicroidentação à carga de 150 mN encontra-se representada na Figura 4.3, função do tempo de imersão nas duas soluções a 10%.

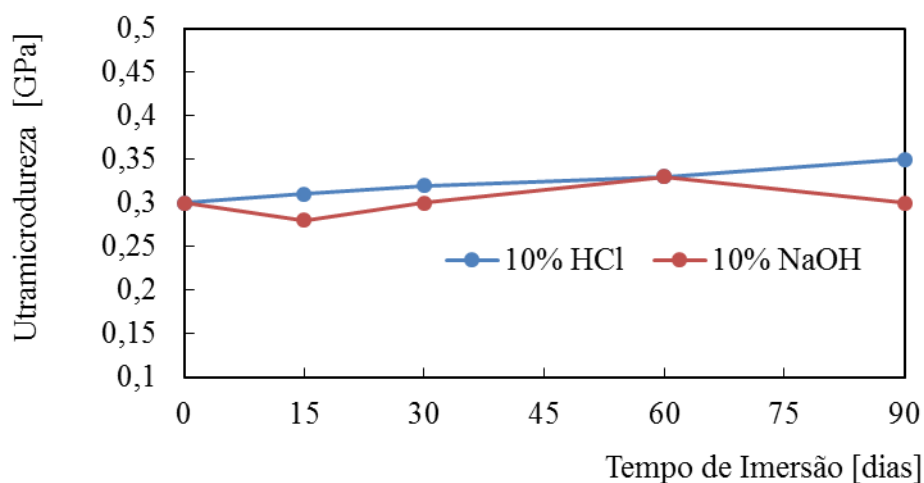


Figura 4.3. Evolução da dureza, função do tempo de imersão nas soluções a 10%.

Como se pode observar na evolução mostrada na Figura 4.3, o compósito base exibe uma dureza de 0,3GPa, valor similar ao obtido em estudos anteriores de compósitos de matriz epóxi [1]. De referir que foi otimizado o valor de carga máxima, de modo a não haver resposta da presença do reforço durante a indentação. Mais ainda, durante o processo de focagem é possível evitar a presença do reforço, tentando avaliar somente a matriz.

O efeito do tempo na evolução da resistência à deformação plástica dos materiais em estudo depende do tipo de solução usada. De fato, enquanto que a dureza aumenta progressivamente com o aumento do tempo de exposição à solução ácida, o mesmo não se pode dizer em relação à solução alcalina. Neste último caso, assiste-se a uma ligeira diminuição da resistência à deformação plástica da matriz ao fim de 15 dias de imersão. A posterior recuperação dá-se entre 30 e 60 dias e ao fim do período máximo de imersão os provetes apresentam o mesmo valor de dureza do de controlo.

Ora esta evolução não é fácil de explicar, principalmente quando ficou demonstrada que havia degradação superficial dos provetes pelo aumento da rugosidade média. Atendendo a que as diferenças de valores não são significativas, poderá, sem grande erro, afirmar-se que a solução aquosa de NaOH a 10% não altera a dureza da matriz polimérica de resina epóxi.

4.1.4. Ensaio de Impacto Transversal

A Figura 4.4 ilustra a evolução da resiliência dos compósitos em estudo, para as duas soluções a 10%, em função do tempo de exposição aquosa. Como se pode concluir da análise desta figura, o aumento do tempo de imersão, independentemente do tipo de solução, conduz a uma diminuição gradual da capacidade de resposta do compósito às solicitações por impacto transversal.

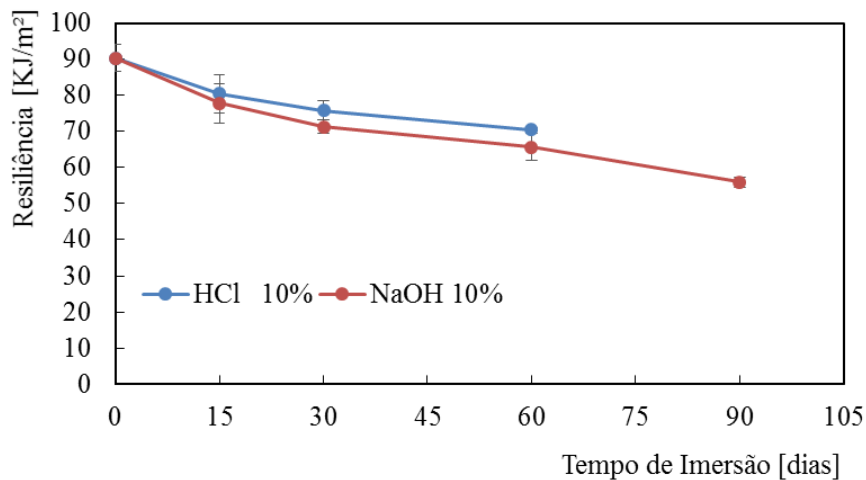


Figura 4.4. Variação da resiliência em provetes sujeitos a ensaios de impacto transversal ao longo do tempo de imersão.

A solução aquosa que origina maior perda desta propriedade mecânica é a solução alcalina. Este comportamento está em conformidade com o apresentado na Figura 4.2, relativamente à variação da R_a dos provetes. Assim, a degradação superficial dos provetes associada ao aumento de massa podem explicar a diminuição da resiliência com o aumento do tempo de imersão.

Analisando a figura anterior conclui-se que ambas as soluções provocam uma diminuição na capacidade do compósito de responder a solicitações por impacto transversal. O que se deve ao fenómeno de degradação que acontece devido à exposição a soluções corrosivas. Os provetes que foram imersos na solução de NaOH, ao fim de 90 dias, apresentam um decréscimo no seu valor de resiliência de cerca de 32% em relação aos provetes de controlo. Ao longo do tempo, verificou-se sempre uma diminuição no valor desta propriedade, no entanto, entre os 15 e 30 dias esta variação foi menos notória. No caso da solução de HCl apenas foi possível a análise até 60 dias. Durante a realização dos ensaios ocorreu um problema que inviabilizou a medição da resiliência dos provetes imersos em solução ácida durante 90 dias. Por escassez de tempo não foi possível repetir este procedimento. Ao fim de 60 dias de imersão em HCl, o valor da resiliência diminuiu cerca de 22% relativamente ao provete controlo.

As variações descritas anteriormente podem ser também sustentadas pela análise de dano dos provetes. O dano obtido para o provete controlo e para os provetes imersos ao fim de 15, 30 e 60 dias é similar. Para o valor de energia de 5J, os provetes não mostram falha por fratura. O mesmo foi constatado para os provetes imersos na solução de HCl, para o mesmo período. Para 90 dias de imersão em solução de NaOH, é ilustrada na Figura 4.5 a análise visual da morfologia do dano. Neste caso a ruína já é visível, observando-se rotura da matriz, fissuração de fibras e delaminação. Conforme descrito anteriormente, este é o período de menor resiliência do compósito após o impacto.

A ausência de falha no período de 60 dias de imersão pode dever-se ao tipo de empilhamento do laminado, que confere um carácter elástico ao mesmo.

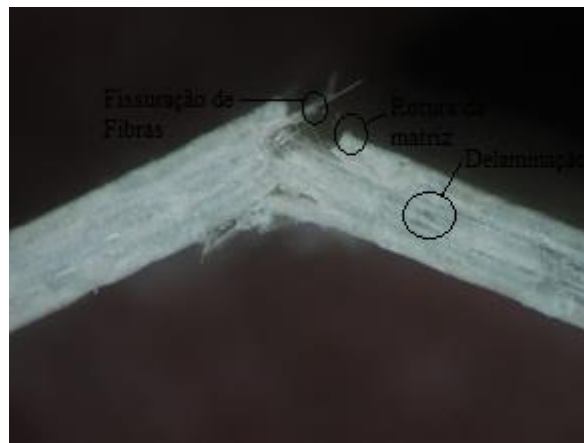


Figura 4.5. Dano em provetes imersos na solução de NaOH, após ensaios de impacto transversal, durante 90 dias.

A partir destes resultados, pode-se concluir que ambas as soluções corrosivas provocam degradação nas propriedades dos laminados quando sujeitos a impacto transversal. E que, a solução de NaOH é a mais agressiva, verificando-se nestes provetes um menor valor de resiliência. Estas conclusões estão de acordo com o verificado por Amaro *et al* [1], onde os provetes imersos na solução alcalina apresentam pior desempenho.

4.1.5. Ensaio de Impacto Longitudinal

O ensaio de impacto longitudinal permitiu descrever o desempenho do material quando sujeito a impacto na direção longitudinal. Os resultados obtidos para a resiliência dos compósitos estão representados graficamente na Figura 4.6.

Ao longo dos 90 dias, independentemente do tipo de solução, assiste-se a uma diminuição no valor da resiliência. O decréscimo desta propriedade é mais notório para a solução alcalina, confirmando os andamentos anteriormente apresentados. Neste caso, a diminuição de resiliência atinge cerca de 54%, comparativamente com os provetes controlo. Para o caso da solução de HCl o decréscimo foi muito menor, tendo a resiliência diminuído apenas cerca de 8%. Estes resultados comprovam mais uma vez o efeito de degradação que as soluções provocam nos materiais. No entanto, neste caso, o nível de pH (ver Tabela 3.2) da solução cria grandes diferenças. Entre os 30 e 90 dias, o valor obtido para a solução ácida mantem-se praticamente constante. Em oposição, a solução alcalina exibe uma diminuição de 50% para o mesmo período de tempo.

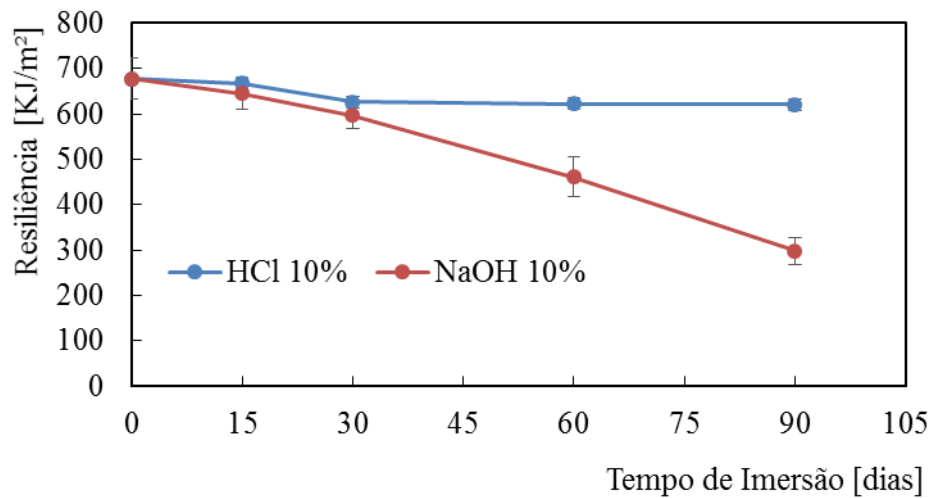
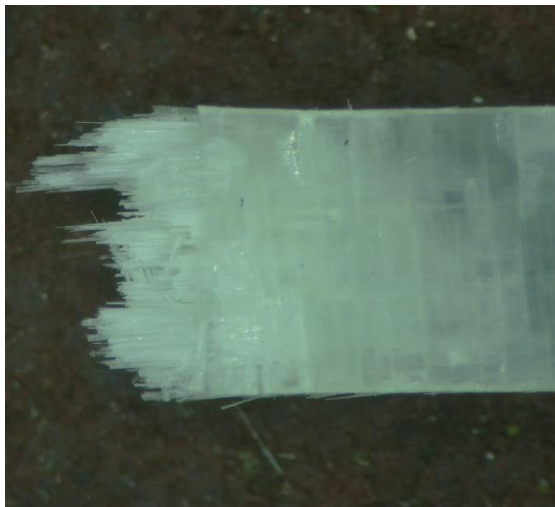


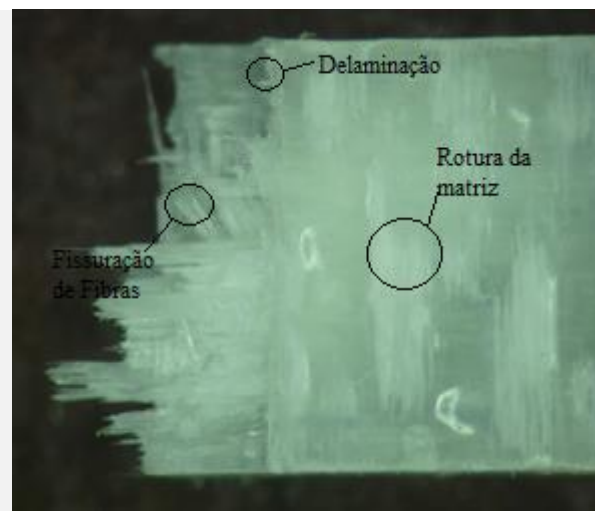
Figura 4.6. Variação da resiliência em provetes sujeitos a ensaios de impacto longitudinal ao longo do tempo de imersão.

Na Figura 4.7 pode observar-se o dano visível ao fim de 90 dias de imersão nos dois tipos de soluções e no provete controlo. Contrariamente ao ensaio de impacto transversal (Figura 4.5), no impacto em direção longitudinal, os provetes apresentam fratura em todos os períodos de imersão, incluindo o próprio provete de controlo.

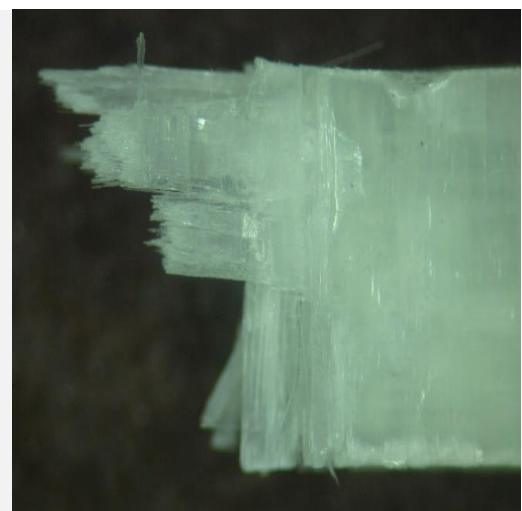
Analisando a Figura 4.7, verifica-se que o maior dano ocorreu nos provetes imersos em NaOH (Figura 4.7.b)), onde é visível rotura da matriz, fissuração de fibras e delaminações mais significativas do que as obtidas nos provetes controlo (Figura 4.7.a)) e na solução de HCl (Figura 4.7.c)). Assim, será de esperar que os provetes imersos em solução de NaOH apresentem os valores de resiliência mais baixos, o que está de acordo com o apresentado na Figura 4.6. Esta diferença de dano após imersão em duas soluções distintas é também evidente para os restantes períodos de tempo, sendo que, quanto mais tempo os provetes estiveram expostos à solução, mais significativa é esta variação.



a)



b)



c)

Figura 4.7. Dano em provetes sujeitos a ensaios de impacto longitudinal, a) Controlo; e após 90 dias de imersão b) Solução de NaOH; c) Solução de HCl.

Este ensaio permitiu concluir que, tal como visto anteriormente, a solução de NaOH provoca mais degradação nos laminados do que em solução ácida. Mas também que, a integridade estrutural dos compósitos imersos em solução alcalina a 10% NaOH está mais debilitada se o material estiver sujeito a impactos na direção longitudinal do que na direção transversal.

4.1.6. Ensaio de Flexão em Três Pontos

Com a realização do ensaio de flexão em três pontos determinou-se o valor da tensão de flexão, de acordo com a equação anteriormente apresentada, Equação 3.2. Os valores de tensão de flexão máxima ao longo do tempo de imersão, para as duas soluções, encontram-se representados na Figura 4.8. Neste caso, o tempo máximo selecionado foi de 60 dias.

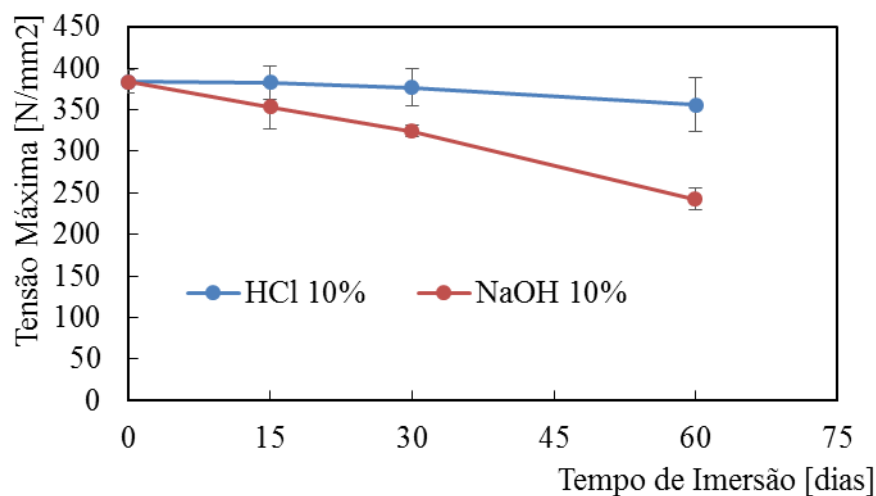


Figura 4.8. Variação da tensão de flexão máxima em provetes sujeitos a ensaios de flexão em três pontos, ao longo do tempo de imersão.

Como se pode observar na figura anterior, o valor da tensão máxima de flexão diminui após contacto com as duas soluções, apresentando os provetes imersos na solução de NaOH a maior variação no valor desta tensão. No período máximo de 60 dias, existe uma redução no valor da tensão, comparando com os provetes controlo, de cerca de 37% e, no caso da solução de HCl, a redução do valor da tensão foi de, aproximadamente, 7%.

Na Figura 4.9 apresenta-se o valor da tensão em função do deslocamento dos provetes imersos na solução de NaOH, ao longo dos vários períodos de exposição. A escolha da solução alcalina para mostrar o comportamento da tensão deveu-se apenas ao facto de ser esta solução a mais desfavorável para o material, tal como se observou na Figura 4.8.

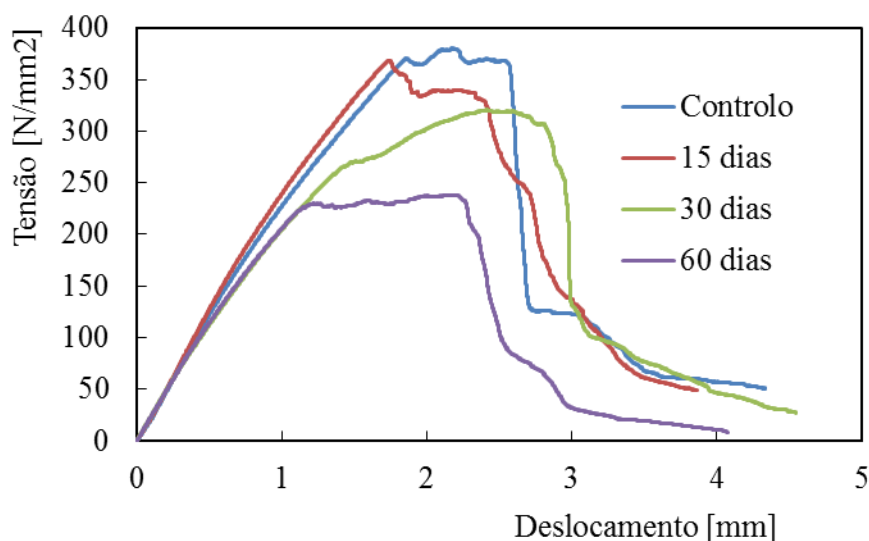


Figura 4.9. Variação do valor da tensão com o deslocamento em provetes sujeitos a ensaios de flexão em três pontos, imersos em solução de NaOH 10%.

A figura anterior está em conformidade com o que tinha sido observado na Figura 4.8 onde, tal como aqui, a maior diferença de comportamento das curvas tensão-deslocamento acontece no período entre 30 e os 60 dias. A semelhança de comportamento das curvas revela que o dano sofrido foi também semelhante.

A Figura 4.10 mostra as imagens obtidas por microscopia. Relativamente ao provete de controlo, observa-se que não ocorre fratura completa quer da matriz quer do reforço (Figura 4.10.a)). Comparando este dano com o obtido após 15 dias de imersão em solução de NaOH, Figura 4.10.b), verifica-se que não há diferenças significativas, embora, se deva referir o maior arrastamento de fibras após imersão. Com o aumento do tempo de imersão, Figura 4.10.c) e d), o dano é mais evidenciado, destacando-se rotura na matriz, arrancamento de fibras e ainda delaminação que se propaga ao longo do provete.

Embora não sejam apresentados os danos obtidos com a solução ácida, pode afirmar-se que a ruína é semelhante à da imersão em solução alcalina para o tempo de 30 dias, associada à deformação da matriz e ligeiro arrancamento de fibras. Após o período de 60 dias, embora tenha havido também rotura da matriz e um maior arrancamento de fibras, por prolongamento de tempo de imersão, genericamente a degradação é menor nesta solução.

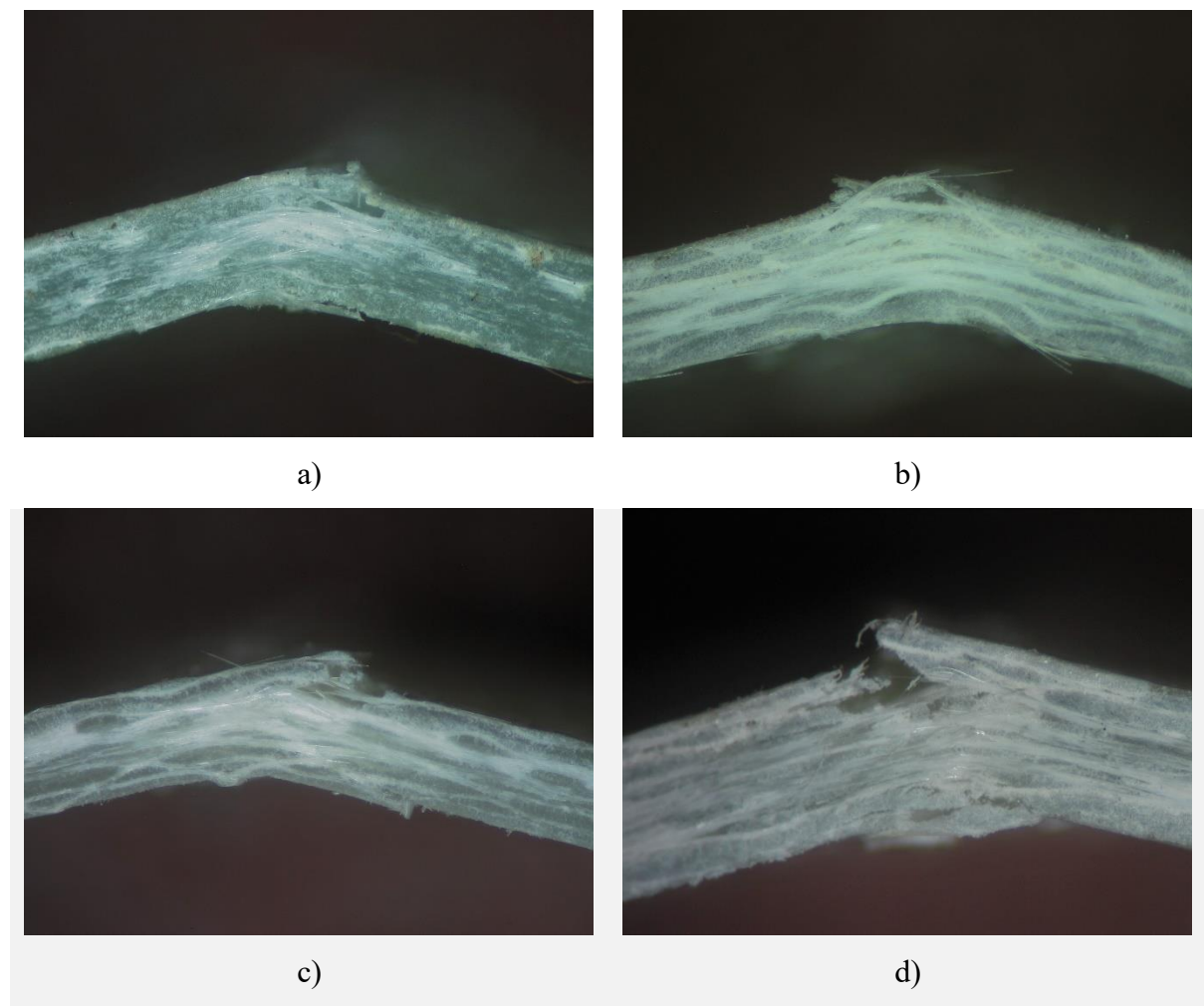


Figura 4.10. Dano em provetes sujeitos a ensaios de flexão em três pontos, a) Controle; em solução alcalina a 10% b) 15 dias; c) 30 dias; d) 60 dias.

O ensaio de flexão em três pontos é bastante sensível à mudança das condições de exposição [2]. Com este ensaio concluiu-se que tanto a solução de NaOH como a de solução de HCl promovem degradação das propriedades à flexão dos compósitos. Sendo que, a solução alcalina é a mais agressiva para o material em estudo. Estes resultados já eram expectáveis, tendo em conta os estudos anteriormente realizados no DEM-UC [1]. Ficou provado que soluções alcalinas promovem maior diminuição das propriedades à flexão do que as obtidas por exposição a soluções ácidas.

4.2. Efeito da Concentração

Com o intuito de avaliar o efeito da concentração das soluções na integridade estrutural dos provetes, foram criadas soluções de 10, 20 e 30% de concentração, tanto de NaOH como de HCl. Conjuntos de seis provetes (três para cada ensaio) foram imersos em cada uma das seis soluções durante 30 dias, à temperatura ambiente. No fim do período de imersão, os provetes foram retirados e ensaiados. Para este estudo, realizaram-se ensaios de impacto transversal, ensaios de impacto longitudinal, medições de massa, dureza e rugosidade, cujos resultados se apresentam nos subcapítulos seguintes.

4.2.1. Variação de Massa

A variação da massa dos provetes, antes e após a imersão nas soluções, é apresentada na Figura 4.11, em função da concentração das soluções.

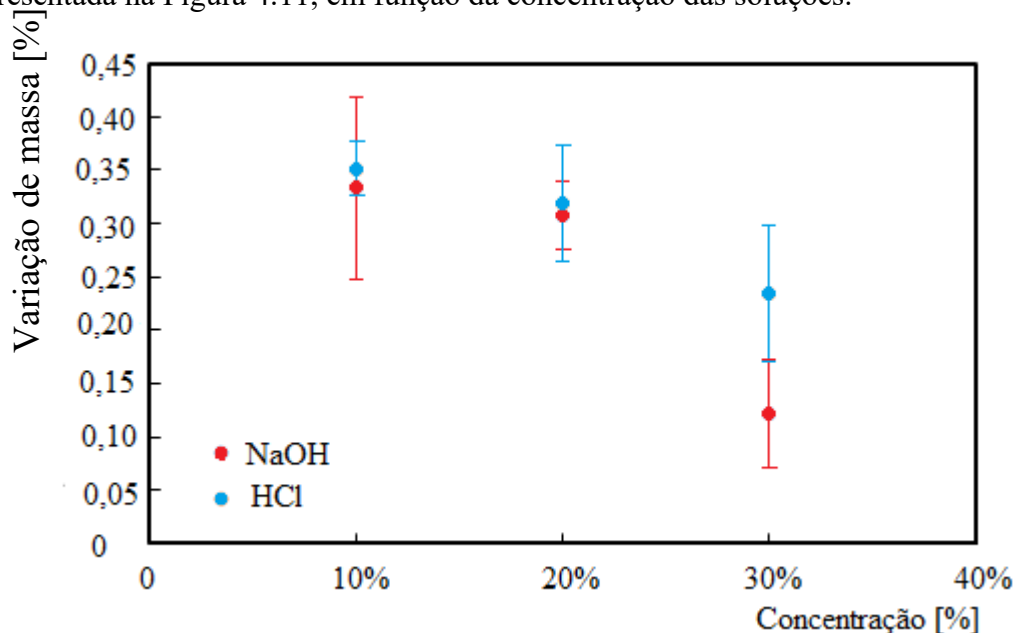


Figura 4.11. Variação da massa dos provetes, em diferentes concentrações.

Os provetes apresentam uma diminuição da percentagem de variação de massa com o aumento da concentração no caso das duas soluções. Os imersos na solução de NaOH têm uma variação de massa menor, especialmente na solução com 30% de concentração, onde a diferença para os provetes imersos em HCl é mais significativa. No entanto, para qualquer solução, as variações de massa são insignificativas, não excedendo os 0,45%. Observa-se então, de novo, uma expansão da matriz como consequência da absorção das soluções.

4.2.2. Ensaio de Rugosidade

Na Tabela 4.2 estão apresentados os resultados, em termos de valor médio, da medição da rugosidade dos provetes, em função da concentração da solução de NaOH e HCl. Tal como no subcapítulo 4.1.2, será dada mais ênfase ao parâmetro de rugosidade média, R_a , para avaliar o efeito da concentração na rugosidade dos provetes.

Tabela 4.2. Rugosidade medida nos provetes, imersos em diferentes concentrações.

Solução	Período	$R_a[\mu\text{m}]$	$R_q[\mu\text{m}]$	$R_z[\mu\text{m}]$
	Controlo	$2,63 \pm 0,34$	$3,34 \pm 0,38$	$15,25 \pm 0,92$
NaOH	10%	$3,36 \pm 0,57$	$4,34 \pm 0,75$	$16,53 \pm 2,07$
	20%	$4,002 \pm 0,2$	$5,56 \pm 0,45$	$27,08 \pm 3,58$
	30%	$4,16 \pm 0,27$	$5,83 \pm 0,51$	$27,29 \pm 2,72$
HCl	10%	$2,79 \pm 0,36$	$3,75 \pm 0,78$	$16,47 \pm 1,67$
	20%	$2,29 \pm 0,27$	$3,25 \pm 0,54$	$15,05 \pm 1,88$
	30%	$2,07 \pm 0,25$	$2,66 \pm 0,3$	$13,1 \pm 0,91$

Na Figura 4.12 estão representadas as evoluções das variações de rugosidade média para diferentes concentrações das soluções em estudo.

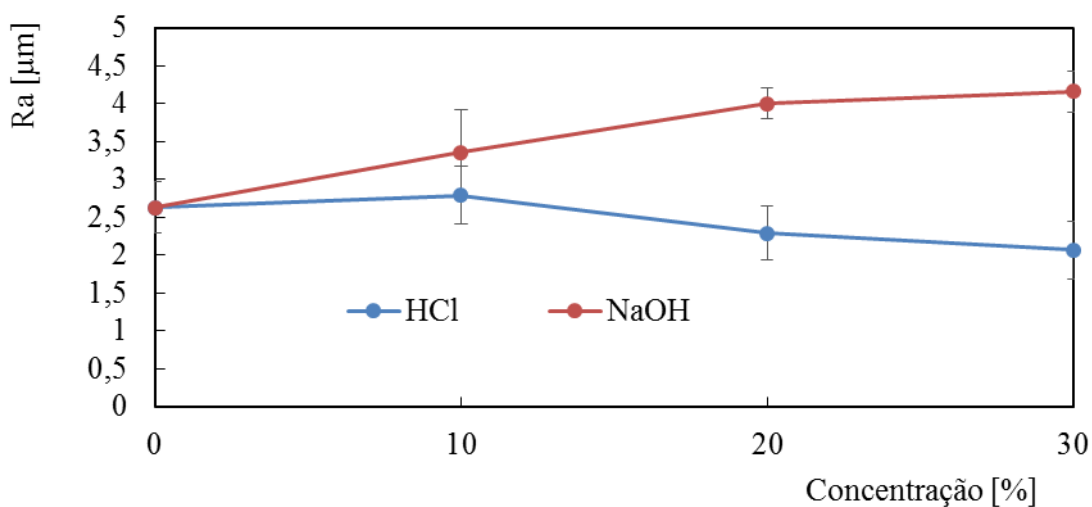


Figura 4.12. Variação da rugosidade média, R_a , em soluções com diferentes concentrações.

Os resultados obtidos permitem concluir que, no caso de provetes imersos em solução de NaOH o valor da rugosidade aumenta com o aumento da concentração da solução. Pelo contrário, na solução de HCl, o aumento da concentração da solução leva a um decréscimo no valor da rugosidade dos provetes. Para a solução alcalina, os valores da rugosidade média, Ra , aumentam 22, 34 e 37% para 10, 20 e 30% de concentração, respetivamente, em relação ao provete controlo. No caso da solução ácida, a exposição do provete com uma solução de apenas 10% de concentração leva a um aumento de 6% no valor da rugosidade média. Estando dentro do valor do desvio padrão, pode dizer-se que este aumento não é significativo. No entanto para valores de concentração de 20 e 30%, o valor da rugosidade média tem um decréscimo de 13 e 21%, respetivamente, em relação ao provete controlo.

Conclui-se então que, o aumento da concentração de NaOH provoca mais dano nos laminados, enquanto a imersão em HCl, para concentrações iguais ou superiores a 20% provoca um alisamento da superfície dos provetes.

4.2.3. Ensaio de Dureza

O efeito da concentração nas soluções aquosas, entre 10 e 30%, no valor dureza, para um tempo de imersão de 30 dias é mostrado na Figura 4.13.

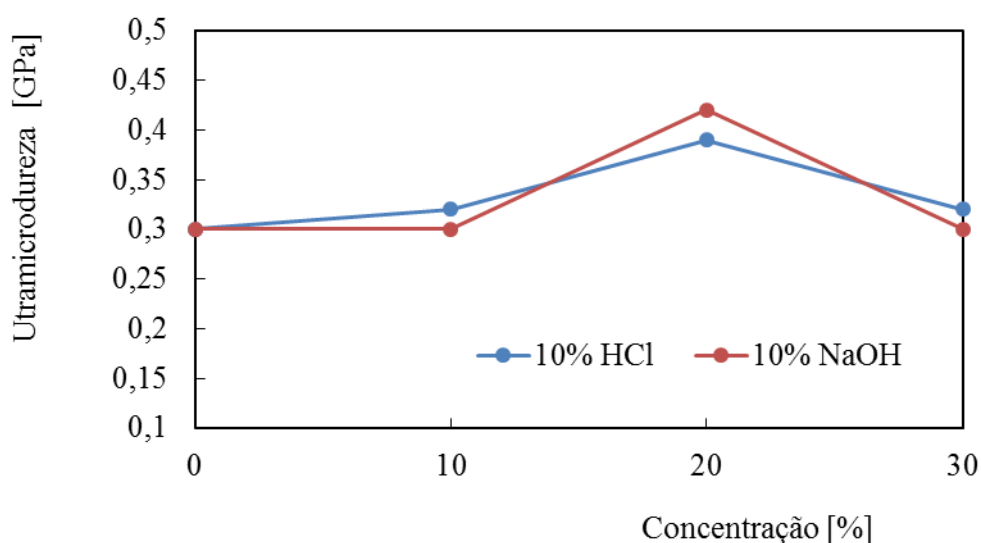


Figura 4.13. Evolução da dureza, função da concentração das soluções.

A análise desta figura permite concluir, genericamente, que as duas evoluções correspondentes ao tipo de solução têm o mesmo andamento. Tal como mostrado na Figura 4.3, os valores de dureza para soluções a 10%, são semelhantes aos dos provete base. O aumento da concentração da solução para 20% conduz ao aumento da resistência à deformação plástica. Neste caso, o valor máximo conseguido é de 0,42 GPa após imersão de 30 dias em solução de NaOH. O efeito de soluções, quer ácidas quer básicas, concentradas a 30% para 30 dias de imersão parece não influir nos resultados de dureza. É de salientar que, durante os ensaios de ultramicroindentação se evitou tanto quanto possível ao nível do operador a influência do reforço na resposta dinâmica. Se o aumento de concentração das soluções conduzisse a um aumento de dureza, então, os resultados obtidos para concentração de 30% são difíceis de explicar. A autora deste trabalho não encontrou bibliografia que sustente estas evoluções.

4.2.4. Ensaio de Impacto Transversal

Com a realização do ensaio de impacto transversal foi possível obter a influência da concentração das soluções na resistência ao impacto dos compósitos Na Figura 4.14 encontra-se representada a variação da resiliência para três concentrações diferentes de cada tipo de solução.

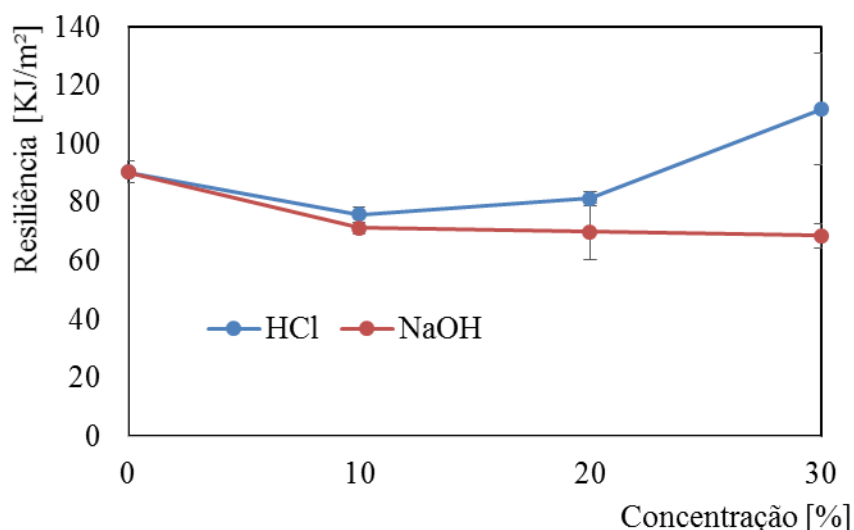


Figura 4.14. Variação da resiliência em provetes sujeitos a ensaios de impacto transversal, imersos em diferentes concentrações da solução.

Na figura anterior verifica-se que o aumento da concentração das soluções provoca um efeito contrário das propriedades mecânicas dos provetes. O aumento de concentração de solução de NaOH leva a uma diminuição no valor da resiliência dos provetes, o que significa que houve maior degradação do compósito com este aumento. No entanto, este decréscimo não é muito significativo. No total, o valor da resiliência diminui 24% e, entre 10 e 30%, diminui apenas 4%. Conclui-se então que, o contacto do provete com a solução de NaOH leva a uma diminuição da resistência ao impacto do provete, no entanto, o aumento da concentração não será muito significativo. No caso do aumento de concentração da solução de HCl, o valor da resiliência aumenta 19% em relação aos provetes de controlo, sendo que, o maior aumento se deu entre os 20 e os 30% de concentração, com o valor da resiliência a aumentar cerca de 27%. O contacto dos provetes com a solução com apenas 10% de concentração leva a degradação das propriedades e o valor da resiliência diminui cerca de 16%. No entanto, uma maior concentração faz aumentar a resistência ao impacto do material.

O dano sofrido pelos provetes neste ensaio é, novamente, pouco visível (Figura 4.5.a)). Não ocorre fissuração da matriz nem arrancamento/fissuração de fibras. Verifica-se apenas um desgaste da matriz na zona de impacto, mais evidente em provetes imersos na solução de 30% de NaOH.

4.2.5. Ensaio de Impacto Longitudinal

O ensaio de impacto longitudinal permitiu descrever a influência da concentração das soluções corrosivas no desempenho do material, quando sujeito a impacto na direção longitudinal. Os resultados obtidos com este ensaio encontram-se na Figura 4.15.

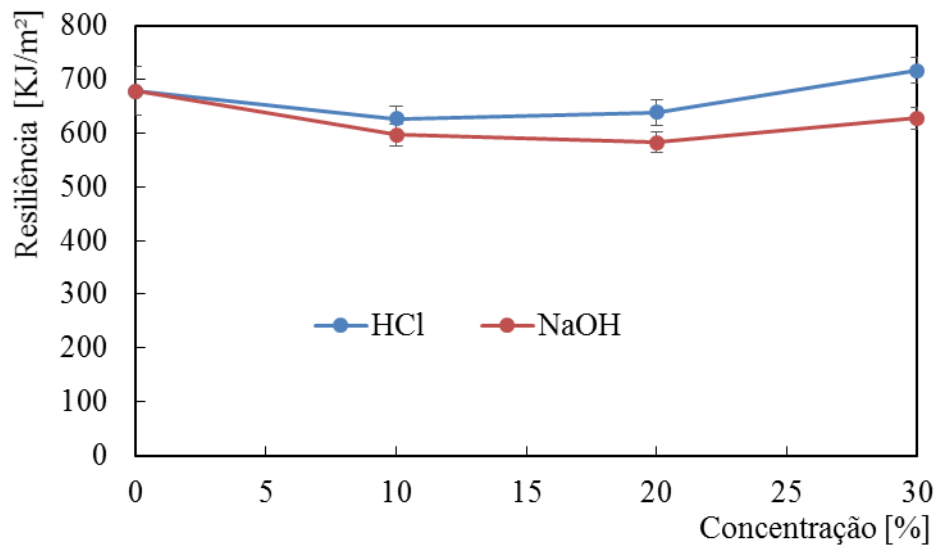


Figura 4.15. Variação da resiliência em provetes sujeitos a ensaios de impacto longitudinal, imersos em diferentes concentrações da solução.

Através da análise da figura anterior verifica-se que, o aumento da concentração da solução de HCl para 30% promove um aumento de aproximadamente 5% no valor da resiliência dos provetes, em comparação com os provetes de controlo. No caso da concentração da solução ser apenas de 10%, a resiliência diminui 7% em relação aos provetes controlo. No entanto, para os casos de 20 e 30% de concentração, o valor desta propriedade aumenta. O que leva a concluir que existe um aumento da rigidez da matriz com a absorção da solução mais concentrada. A maior variação acontece entre os 20% e 30% de solução de HCl, onde o valor da resiliência aumenta 11%. Os resultados obtidos para o aumento da concentração de NaOH não estão em conformidade com o que seria esperado tendo em conta resultados anteriores e a bibliografia existente. Verificou-se um decréscimo no valor da resiliência de cerca de 12 e 14% em relação aos provetes de controlo nos casos das soluções de 10 e 20 de NaOH, respetivamente. Estes resultados permitem afirmar que estas soluções provocaram degradação no material e, conseqüente, redução da sua resistência ao impacto. No entanto, os provetes imersos em solução de 30% de NaOH apresentam uma diminuição de resiliência de apenas 7% em relação aos provetes controlo, tendo-se verificado um aumento de também 7% em relação aos provetes imersos em 20% de NaOH. Não se encontrou uma justificação para este aumento, pelo que, deveriam ter sido realizados mais ensaios para tentar estudar a influência do aumento da concentração deste tipo de solução no valor da resiliência dos compósitos.

Na Figura 4.16 podem-se observar os danos que as soluções de diferentes concentrações provocam no provete após o impacto.

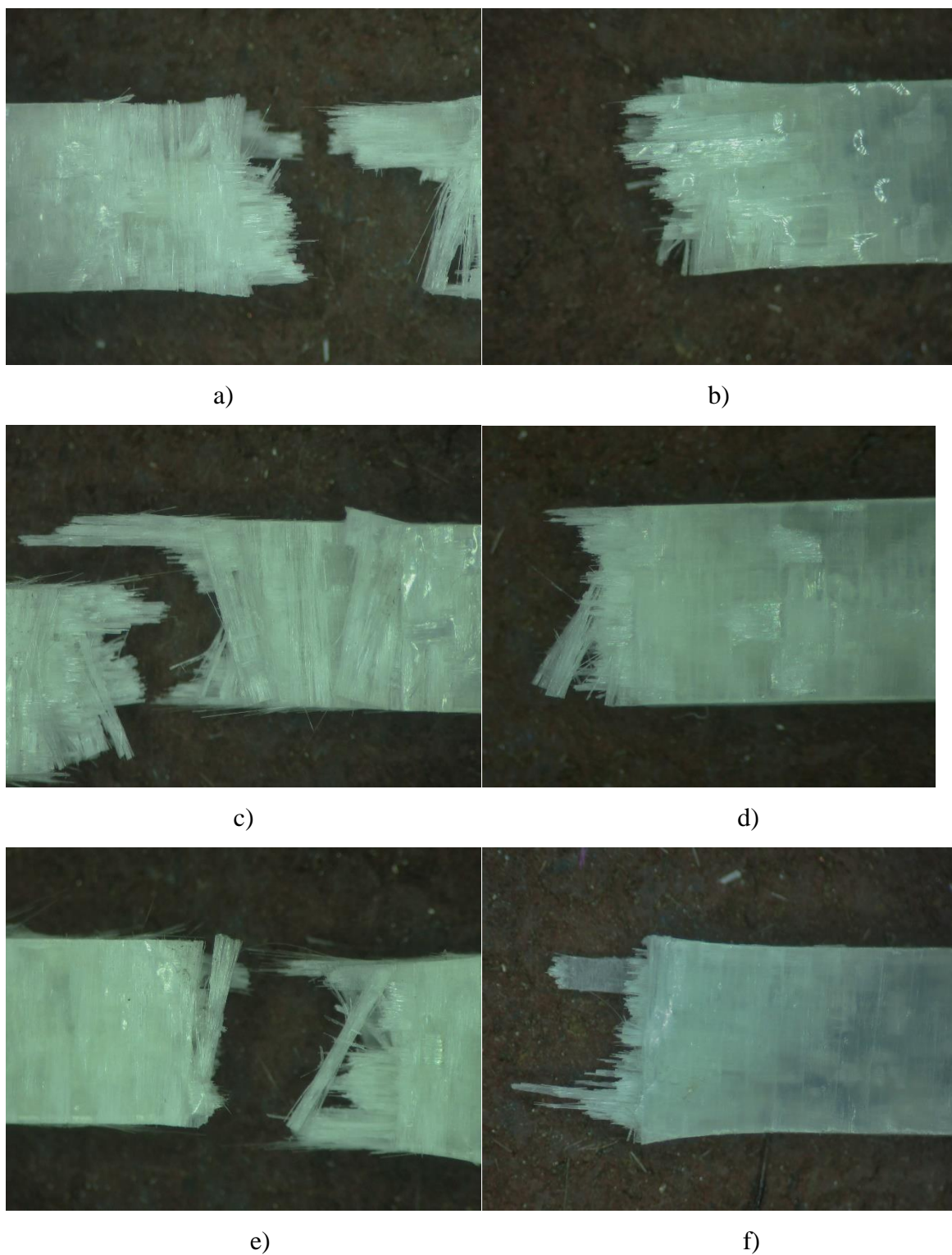


Figura 4.16. Dano em provetes sujeitos a ensaios de impacto longitudinal, imersos durante 30 dias em: a) 10% NaOH; b) 10% HCl; c) 20% NaOH; d) 20% HCl; e) 30% NaOH; f) 30% HCl.

Como foi analisado na Figura 4.7.a), o provete controlo após o ensaio de impacto longitudinal apresenta rotura da matriz e fissuração de fibras. Comparando este provete com os imersos 30 dias em solução de 10% de NaOH (Figura 4.16.a)) e em solução de 10% de HCl (Figura 4.16.b)) verifica-se que o dano é um pouco mais significativo, sendo mais perceptível no provete imerso em NaOH. Esta observação está de acordo com o apresentado na Figura 4.15, onde o valor da resiliência é menor no caso da solução de NaOH. Nas Figuras 4.16.c) e d), encontram-se imagens dos provetes imersos em 20% de solução de NaOH e solução de 20% de HCl, respetivamente. No caso da solução de NaOH, o aumento da concentração de 10% para 20% levou a um aumento da área de dano e de delaminação. Por sua vez, o aumento de concentração de HCl de 10% para 20% levou a uma diminuição do arrancamento de fibras. O aumento de 20 para 30% de concentração da solução de NaOH (Figura 4.16.e)) provocou uma diminuição do arrancamento de fibras e da área de delaminação. Por fim, o dano apresentado pelos provetes imersos em solução de 30% de HCl (Figura 4.16.f)) é ainda menor do que o observado nos provetes controlo (Figura 4.7.a)), havendo menor arrancamento de fibras.

4.3. Efeito da Temperatura

Com o objetivo de avaliar o efeito da temperatura na resistência ao impacto dos laminados vidro/epóxi, foram imersos provetes em três soluções de 20% de NaOH e em três soluções de 20% de HCl. Uma solução de cada composto foi colocada a 8, 25 e 40°C, durante 15 dias. No fim do período de imersão, os provetes foram retirados e sujeitos a ensaios de impacto longitudinal, medição de dureza e rugosidade, cujos resultados se apresentam de seguida.

4.3.1. Ensaio de Rugosidade

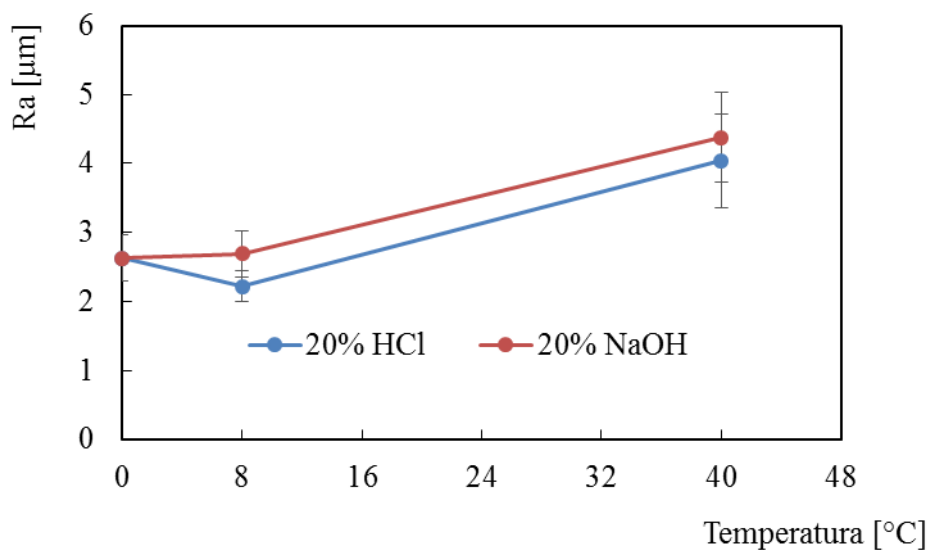
Na Tabela 4.3 apresentam-se os resultados, em termos de valor médio, da medição da rugosidade dos provetes, em função da temperatura.

Tabela 4. 3. Rugosidade medida nos provetes, imersos em diferentes temperaturas.

Solução	Período	$R_a[\mu\text{m}]$	$R_q[\mu\text{m}]$	$R_z[\mu\text{m}]$
	Controlo	$2,63 \pm 0,34$	$3,34 \pm 0,38$	$15,25 \pm 0,92$
NaOH	8°C	$2,69 \pm 0,01$	$3,06 \pm 0,01$	$16,23 \pm 0,01$
	40°C	$4,38 \pm 0,66$	$5,89 \pm 0,76$	$28,2 \pm 3,1$
HCl	8°C	$2,22 \pm 0,23$	$5,53 \pm 0,36$	$14,17 \pm 1,4$
	40°C	$4,04 \pm 0,68$	$5,53 \pm 1,19$	$27,58 \pm 6,92$

A tabela anterior permite concluir que o aumento da temperatura promove um aumento da rugosidade média nos provetes imersos nas duas soluções. No caso da solução de NaOH, os provetes apresentam uma variação de rugosidade insignificante quando estão imersos à temperatura de 8°C. Porém, com o aumento da temperatura para 40°C, o valor da rugosidade média aumenta cerca de 40%. Os provetes imersos em solução de HCl apresentam uma redução de 16%, em comparação com os provetes controlo, do seu valor de rugosidade média a 8°C. Quando imersos a 40°C, os provetes apresentam um aumento no valor da rugosidade de 35%, em relação aos de controlo.

Na Figura 4.17 apresentam-se as evoluções das variações de rugosidade média para diferentes temperaturas.

**Figura 4.17.** Variação da rugosidade média, R_a , em soluções com diferentes temperaturas.

4.3.2. Ensaio de Dureza

O efeito da temperatura da solução, 8 e 40°C, nos valores de ultramicrodureza é mostrado na Figura 4.18.

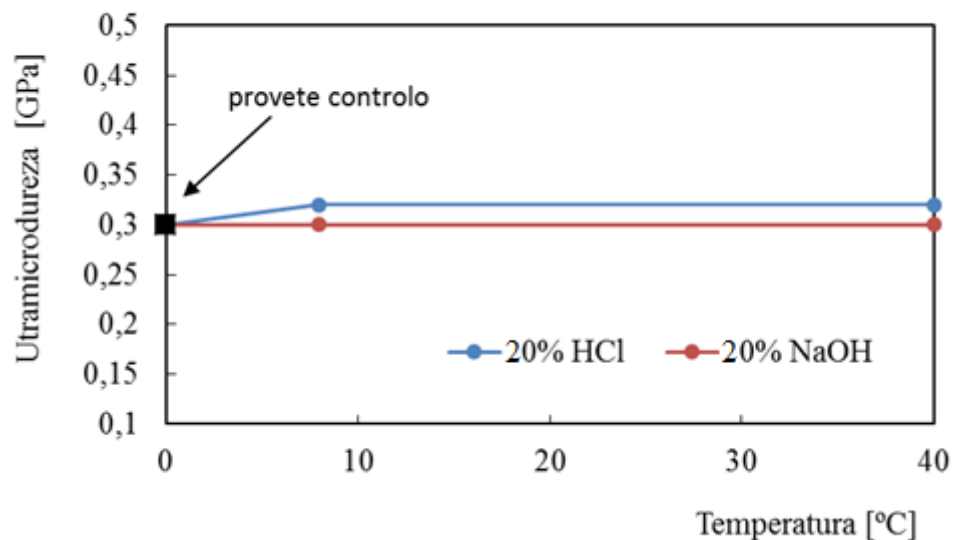


Figura 4.18. Evolução da dureza, função da temperatura.

Pode concluir-se, e em conformidade com todos os resultados desta propriedade mecânica mostrados anteriormente, que, também, a temperatura até 40°C não altera a resistência à deformação plástica da matriz epóxida.

4.3.3. Ensaio de Impacto Longitudinal

Através do ensaio de impacto longitudinal foi possível descrever a influência da temperatura na resistência ao impacto na direção longitudinal de provetes imersos em soluções corrosivas. Os resultados obtidos neste ensaio estão apresentados na Figura 4.19.

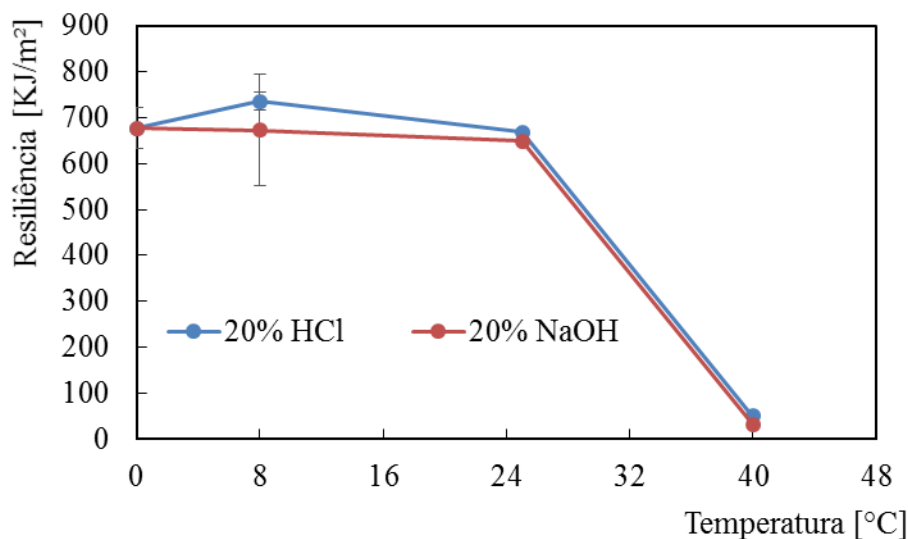


Figura 4.19. Variação da resiliência em provetes sujeitos a ensaios de impacto longitudinal, imersos a diferentes temperaturas.

A figura anterior permite concluir que, independentemente da solução, um aumento da temperatura leva a uma diminuição significativa na resistência do material. No entanto, o comportamento dos provetes nas duas soluções não é idêntico em todas as temperaturas. Quando estes se encontram imersos na solução de HCl a 8°C existe um aumento no valor da resiliência de 8% em relação aos provetes de controlo. À temperatura de 25°C, o valor da resiliência é muito semelhante ao dos provetes controlo, aumentando apenas 2%. A maior variação deu-se nos provetes imersos a 40°C de temperatura onde, em comparação com os provetes controlo, o valor da resiliência diminuiu cerca de 93%. Estes resultados permitem concluir o aumento para uma determinada gama de temperaturas provoca uma degradação significativa nestes compósitos. No caso dos provetes imersos em NaOH, tanto quando a temperatura atinge os 8°C como quando atinge os 25°C, existe uma pequena redução no valor da resiliência em relação aos provetes controlo de 1 e 4%, respetivamente. Porém, para a temperatura de 40%, os provetes apresentam um decréscimo no valor da resiliência em relação aos provetes de controlo de 94%. Este valor é muito significativo e permite concluir que estas condições de exposição se tornam num fator de degradação muito forte no material, diminuindo substancialmente a sua resistência ao impacto. Estes resultados estão em conformidade com o estudo realizado por Botelho *et al* [14] que concluiu que o aumento da temperatura e humidade em compósitos de fibra de vidro/epóxi levava a degradação resultante da plastificação da matriz em ensaios à tração.

Na Figura 4.20 é possível visualizar o dano obtido pelos provetes, imersos a diferentes temperaturas, após o impacto.

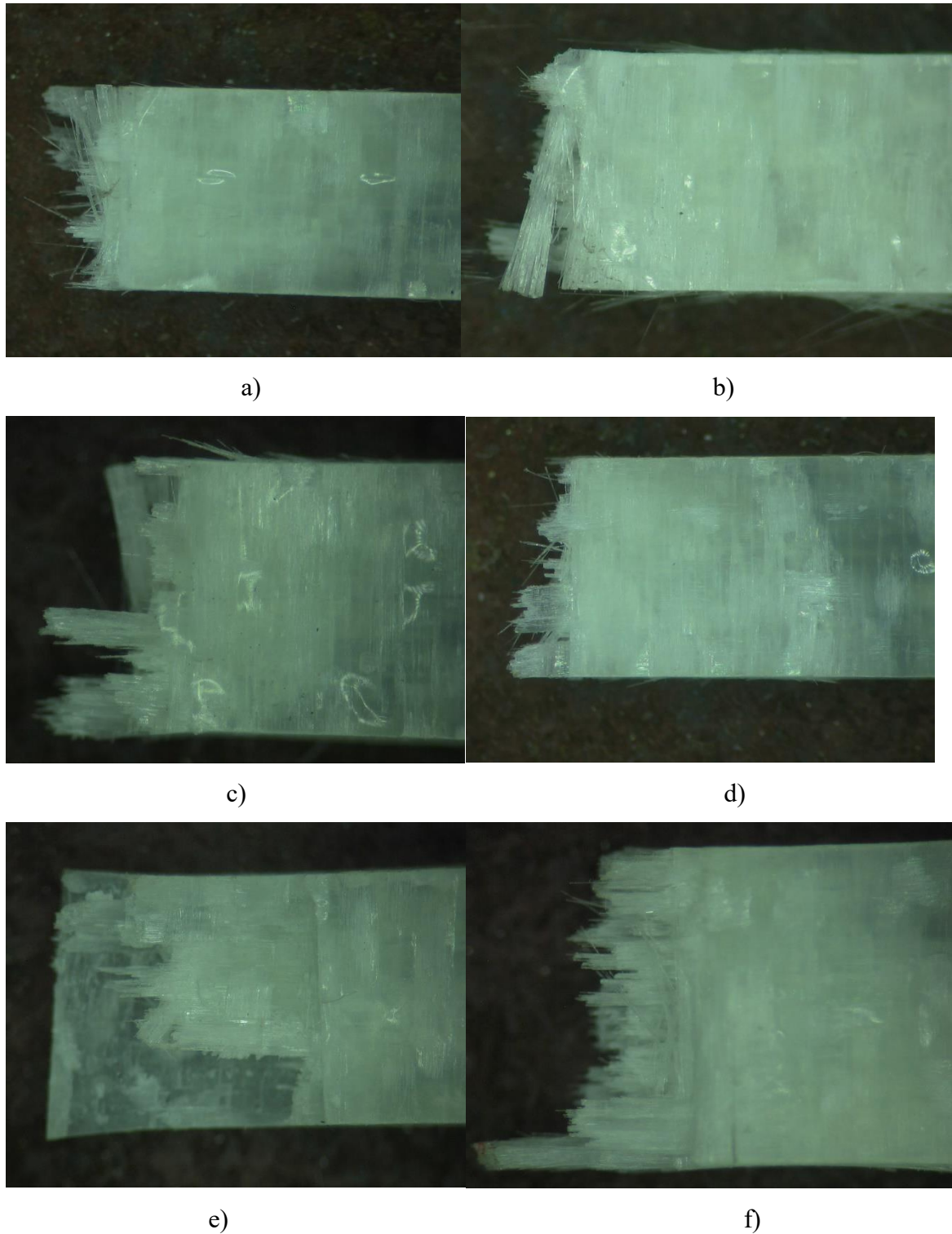


Figura 4.20. Dano em provetes sujeitos a ensaios de impacto longitudinal, imersos durante 30 dias em: a) NaOH a 8°C; b) HCl a 8°C; c) NaOH a 25°C; d) HCl a 25°C; e) NaOH a 40°C; f) HCl a 40°C.

O provete controlo (Figura 4.7.a)), após o ensaio de impacto longitudinal, apresenta rotura da matriz e fissuração de fibras. Comparando este provete com o imerso 15 dias em solução de 20% de NaOH a 8°C (Figura 4.20.a)) e a 25°C (Figura 4.20.c)) verifica-se que o dano é um pouco mais significativo. No caso do provete imerso a 40°C (Figura 4.20. e)), o dano é mais evidente, sendo visível, além do arrancamento de fibras, uma grande área de delaminação ao longo do provete. Este seria o dano expectável, tendo em conta que o aumento da temperatura levou a uma diminuição significativa das propriedades mecânicas do material (Figura 4.19). O provete imerso em solução de 20% de HCl, 15 dias, a 8°C (Figura 4.20.b)) apresenta um dano semelhante ao provete controlo, assim como o imerso a 25°C (Figura 4.20.d)). No entanto, no caso do provete imerso nesta solução a 40°C (Figura 4.20.f)), o dano é mais evidente havendo arrancamento de fibras e delaminação. As fissuras na matriz advêm de tensões internas entre camadas, devido à incompatibilidade do coeficiente de expansão térmica, que excedem a resistência mecânica do material [12]. Como foi possível verificar através da Figura 4.19 e da Figura 4.20, o aumento da temperatura, juntamente com a presença de soluções agressivas, promove uma degradação significativa da integridade estrutural do material.

Estes resultados estão de acordo com a bibliografia publicada, que indica que a temperatura e o tempo de exposição afetam significativamente as propriedades das resinas epóxicas. O aumento do valor destes dois parâmetros de exposição leva a um decréscimo da rigidez do material [12],[13].

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas a partir da análise dos resultados, após a realização dos ensaios. Por fim, são propostos temas para trabalhos futuros no âmbito da presente dissertação.

5.1. Conclusões

As principais conclusões deste trabalho seguindo a metodologia de apresentação do capítulo 4 são as seguintes:

- O efeito do tempo de imersão entre 15 e 90 dias mostraram que :
 - A variação de massa dos laminados vidro/epóxico após a sua imersão nas soluções é muito pequena, sendo, no entanto, mais notória nos provetes imersos na solução de HCl. Também os valores de dureza dos provetes poucos altera ao longo do tempo de imersão, constatando-se um apenas um pequeno aumento na resistência à deformação plástica em provetes imersos na solução ácida;
 - A solução de NaOH demonstrou ser a solução que mais prejudica a integridade estrutural do compósito. Provocou um maior aumento de rugosidade dos provetes do que aquele obtido para os provetes imersos em HCl. A resistência à flexão e ao impacto dos compósitos tem um decréscimo superior no caso de provetes imersos em solução alcalina, em comparação com os imersos em solução ácida. No caso da resistência ao impacto longitudinal, o valor de resiliência de provetes imersos em solução de NaOH chega a ser, aproximadamente, 7 vezes inferior à apresentada pelos provetes imersos em solução de NaOH.
- O efeito do concentração das soluções permitiu concluir que:
 - A variação de massa dos provetes, ainda que pouco significativamente, diminui com o aumento da concentração das soluções, constatando-se que a presença dos íões das soluções alcalina e ácida provoca uma diminuição da absorção por parte da matriz do compósito. Também a dureza não apresenta alterações significativas, pensando-se que o

aumento observado para ambas as soluções a 20% de concentração se tratou de casos em que se avaliou a dureza de todo o material e não apenas da matriz polimérica;

- No caso do aumento da concentração, os provetes imersos na solução de HCl apresentaram um melhor comportamento. Verificou-se uma diminuição no valor da rugosidade média dos provetes, enquanto que os imersos na solução de NaOH aumentaram os valores deste parâmetro. Observou-se um aumento de resiliência nos dois ensaios de impacto realizados com provetes imersos na solução ácida, o que revela uma melhoria na resistência ao impacto após a imersão em soluções de maior concentração. Pelo contrário, os provetes imersos na solução de NaOH mostram, uma vez mais, piores propriedades mecânicas, comparativamente aos imersos na solução ácida, para soluções com as mesmas concentrações.

- O efeito da temperatura das soluções entre 8 e 40°C mostrou que:

- A dureza dos provetes manteve-se constante;

- A rugosidade dos provetes aumenta com o aumento da temperatura e, a 8°C, apenas os provetes imersos na solução da HCl apresentam uma variação significativa, havendo uma diminuição no seu valor de rugosidade;

- A resistência ao impacto longitudinal diminuiu 94% e 93% em provetes imersos na solução de NaOH e HCl, respetivamente. Com temperaturas iguais aos inferiores à temperatura ambiente, a resistência ao impacto não varia significativamente.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

De forma a consolidar o estudo apresentado nesta dissertação propõem-se alguns trabalhos que possam ser realizados no futuro:

1. Realização de um estudo semelhante com diferentes empilhamentos dos laminados e diferente espessura;
2. Avaliar a resistência à flexão em laminados vidro/epóxico, imersos em soluções corrosivas a elevadas temperaturas;
3. Realização de um estudo semelhante com imersão apenas em solução aquosa pura, para tempos e temperaturas semelhantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. M. Amaro, P. N. B. Reis, M. A. Neto, and C. Louro, “Effects of alkaline and acid solutions on glass/epoxy composites”, *Polymer Degradation and Stability*, vol. 98, no. 4, pp. 853-862, 2013.
- [2] M. H. Banna, J. Shirokoff, J. Molgaard., “Effects of two aqueous acid solutions on polyester and bisphenol A epoxy vinyl ester resins”, *Mater. Sci. Eng. A Struct.*, 528:2137-42, 2011.
- [3] A. Cavaleiro, “Apontamentos da disciplina de Ciências e Engenharia de Materiais II”, DEMUC, 2013.
- [4] D. Dias, “Comportamento ao Impacto a baixa velocidade de laminados de epóxido/fibra de vidro, com camadas de cortiça”, Dissertação de Mestrado, DEM-FEUP, 2009.
- [5] W. D. J. Callister, *Ciência e Engenharia dos Materiais*, LTC, 5ª Edição, 2008.
- [6] A. M. F. M. Ventura, “Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas”, *Ciência Tecnol. dos Mater.*, vol. 21, pp. 10-19, 2009.
- [7] R. Carvalho, “Degradação mecânica em compósitos de vidro/epóxido sujeitos a soluções cimentícias”, Dissertação de Mestrado, DEMUC, 2015.
- [8] J. Costa, “O efeito abrasivo na resistência ao impacto de materiais compósitos”, Dissertação de Mestrado, DEMUC, 2014.
- [9] L. Juvandes, “Materiais compósitos reforçados com fibras, FRP”, Relatório no âmbito de Licenciatura em Engenharia Civil, DEC-FEUP, 2002.
- [10] N. Veiga, “Comportamento à fratura em modo I de compósitos de matriz polimérica, reforçados com fibras de juta INEGI”, Dissertação de Mestrado, DEM-FEUP, 2014.
- [11] A. Campos, “Estudo dos Efeitos Ambientais no Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos”, Dissertação de Mestrado UBI, 2012.
- [12] L. Juvandes, “Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Usando Materiais Compósitos de ‘CFRP’”, Dissertação de Doutoramento, DEC-FEUP, 1999.
- [13] G. Huang and H. Sun, “Effect of water absorption on the mechanical properties of glass/polyester composites”, *Mater. Des.*, vol. 28, no. 5, pp. 1647-1650, 2007.
- [14] E. C. 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.

- [15] M. K. Mahmoud, S. H. Tantawi, “Effect of strong acids on mechanical properties of glass/polyester GRP pipe at normal and high temperatures”, *Polym. Plast. Technol. Eng.*, 42:677-88, 2003.
- [16] M. Stamenovic, S. Putic, M. Rakin, et al., “Effect of alkaline and acid solutions on the tensile properties of glass-polyester pipes”, *Mater. Design*, 32:2456-2461, 2011.
- [17] H. Kawada, V. K. Srivastava, “The effect of an acidic stressenvironment on the stress-intensity factor for GRP laminates”, *Compos. Sci. Technol.*, 61:1109-14, 2001.
- [18] A. M. Amaro, P. N. B. Reis, M. A. Neto, and C. Louro, “Effect of different acid solutions on glass/epoxy composites”, *Reinforced Plastic and Composites*, vol. 32, no.14, pp. 1018-1029, 2013.
- [19] L. Ferreira, “Avaliação do dano em compósitos laminados devido a impactos de baixa velocidade”, Dissertação de Doutorado, DEMUC, 2006.
- [20] D. S. da C. Santos, “Estudo do impacto a baixa velocidade em compósitos epóxi/fibra de vidro nanoreforçados”, Dissertação de Mestrado, DEMUC, 2012.
- [21] INSTRUCTIONS for USE and MAINTENANCE – CEAST 9000 Series Pendulum Impact Systems.”.