



Frederico Leopoldo Moura Matos
Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Desenvolvimento de equipamento para
ensaios de envelhecimento acelerado de
materiais compósitos**

Orientador: Doutora Carla Maria Moreira Machado,
Professora Auxiliar, FCT/UNL

**Desenvolvimento de equipamento para ensaios de envelhecimento acelerado de
materiais compósitos**

Copyright © 2019 Frederico Leopoldo Moura Matos

Faculdade de Ciências e Tecnologia e Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Agradeço à minha orientadora, Professora Doutora Carla Maria Moreira Machado pela sua disponibilidade, interesse e principalmente pelo entusiasmo ao longo de toda a dissertação. De realçar também a relação de amizade estabelecida, crucial para a minha motivação.

Ao Professor Doutor Telmo Santos pela disponibilidade demonstrada e partilha de conhecimento em solucionar alguns problemas.

Ao professor Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira, onde a sua experiência e ajuda foram importantes para ultrapassar alguns problemas.

Ao Arsenal do Alfeite pela oportunidade e pela disponibilidade em fornecer todos os recursos necessários para o estudo, principalmente ao Eng. Rui Parreira e ao Eng. Mário Figueiredo.

Aos Mestres Valdemar Rebelo Duarte e Tiago Rodrigues pela troca de ideias, pela ajuda em situações complicadas e principalmente pela amizade criada.

Aos técnicos das oficinas, Senhor António Campos e Senhor Paulo Magalhães pela ajuda prestada na realização de algumas operações, mas também pela amizade.

Aos colegas de laboratório, pela ajuda e partilha de ideias e principalmente pelo companheirismo.

Aos meus colegas de curso pelos bons momentos passados na faculdade e fora dela.

Aos meus amigos, especialmente ao Ricardo Sequeira, pela ajuda em ultrapassar algumas barreiras e principalmente pela amizade e apoio.

À Maria Brejo Vacas, pelo apoio em momentos mais difíceis, o que foi importante para a minha motivação.

À minha família, que me deu a oportunidade de tirar um curso superior e me forneceu as melhores ferramentas para isso.

A todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desta dissertação.

O uso de materiais compósitos aumentou durante as últimas décadas em diversas indústrias, sendo uma das mais importantes a indústria naval. Em construção naval o material compósito mais utilizado é o compósito de matriz polimérica termoendurecível reforçado com fibra de vidro e é utilizado para a produção dos cascos de navios. Surge então a necessidade do estudo do envelhecimento deste tipo de material de forma a otimizar e compreender a perda de propriedades ao longo da sua vida útil. Assim, o Arsenal do Alfeite, estando a desenvolver e construir uma lancha salva vidas em compósito reforçado com fibra de vidro através do método de infusão, sentiu a necessidade de estudar a degradação do material usado quando exposto a condições extremas de utilização. Para tal, é necessária a utilização de um equipamento que permita realizar ensaios de envelhecimento acelerado.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um protótipo funcional de forma a simular condições de radiação UV permitindo assim a concretização de ensaios acelerados de envelhecimento. Foi projetada, produzida e validada uma câmara de envelhecimento acelerado de radiação UV combinada com ciclos de condensação, sendo um equipamento automatizado e controlado por vários sensores, tal como temperatura, humidade e nível de água.

Para realização da prova de conceito foram realizados ensaios de envelhecimento acelerado do material exposto a radiação UV. Procedeu-se a testes em amostras do casco da embarcação sujeitos a condições de envelhecimento acelerado de 500, 750 e 1000 horas. As amostras foram avaliadas e observou-se degradação no material interior, PVC, e algumas alterações na matriz. O equipamento desenvolvido demonstrou-se assim eficaz na simulação do envelhecimento acelerado.

Palavras-chave: Materiais compósitos, Fibra de vidro, Ensaios de envelhecimento acelerado, Protótipo funcional, Radiação UV

The utilization of composite materials has increased during the last decades in several industries, being the naval industry one of the industries that most used this type of materials. In shipbuilding, the glass fiber reinforced thermosetting polymer composite is the most common and most used composite material. This material is used, for example, in the production of ship hulls. Therefore, was crucial to study the aging of this type of material in order to optimize and understand the loss of properties over its useful life. Thus, Arsenal do Alfeite, which is developing and constructing a glass fiber reinforced composite lifeboat, felt the need to study the degradation of this specific material when exposed to extreme conditions of use. In order to perform the simulation tests required for this study, it is necessary to use specialized equipment.

The objective of this work was to develop a functional prototype in order to simulate UV radiation conditions. Throughout these simulated UV radiations was possible to perform the aging tests. An accelerated aging chamber of UV radiations combined with condensation cycles has been designed, produced and validated, being automated equipment controlled by several sensors, such as temperature, humidity, and water level.

To carry out the proof of concept, accelerated aging tests were performed in the material, by exposing it to UV radiation. The samples of the hull of the vessel were subjected to accelerated aging conditions of 500, 750 and 1000 hours. Afterward, the samples were evaluated and was possible to observe degradation in the inner material, PVC, and some changes in the matrix. The developed equipment has thus proved effective in simulating accelerated aging tests.

Keywords: Composite materials, Fiberglass, Accelerated aging tests, Functional prototype, UV radiation

Índice de matérias

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Motivação e objetivos	2
1.3	Estrutura da dissertação	3
2	Revisão da literatura	5
2.1	Materiais compósitos	5
2.1.1	Matriz	5
2.1.2	Resinas termoendurecíveis	6
2.1.3	Reforços	7
2.1.4	Formas dos reforços	8
2.2	Processamento dos materiais compósitos	11
2.2.1	Processo de infusão	14
2.3	Aplicação na indústria naval	20
2.4	Ensaaios de envelhecimento acelerado	23
2.4.1	Ensaaios quantitativos	23
2.4.2	Ensaaios qualitativos	24
2.4.3	Tipos de aceleração	25
2.4.4	Ensaaios de envelhecimento acelerado com UV	26
2.5	Equipamentos existentes comercialmente	29
3	Desenvolvimento do protótipo funcional	31
3.1	Conceção da amostra	31
3.2	Requisitos Funcionais	34
3.3	Conceção do equipamento	35
3.4	Protótipo funcional	36
3.4.1	Projeto e produção do protótipo funcional	37
3.4.2	Suporte rotativo	38
3.4.3	Sistema de radiação UV	40
3.4.4	Sistema de condensação	43
3.4.5	Sistema de controlo	45
3.5	Protótipo funcional produzido	47
4	Validação do protótipo funcional	51
4.1	Ensaaios ao sistema de radiação	51

4.2	Ensaio de condensação	53
4.3	Ensaio cíclico	54
4.4	Análise dos provetes após os ensaios cíclicos	57
4.4.1	Macro e microscopia digital	57
4.4.1	Radiografia digital.....	64
5	Conclusões e desenvolvimentos futuros	67
5.1	Conclusões e contribuições	67
5.1.1	Desenvolvimentos futuros.....	68

Índice de figuras

Figura 2.1- Resinas termoendurecíveis	6
Figura 2.2 - Fibras de reforço.....	7
Figura 2.3 - Formas dos materiais de reforço	9
Figura 2.4– <i>Roving</i>	9
Figura 2.5 – Manta	10
Figura 2.6 – Exemplos de tecidos entrelaçados	10
Figura 2.7 - Malha	11
Figura 2.8 - Esquema do processo manual (lay-up)	12
Figura 2.9 - Esquema do processo de moldação por projeção (<i>spray-up</i>).....	12
Figura 2.10 - Esquema do processo de moldação por vácuo	13
Figura 2.11 - Esquema do processo de moldação em autoclave.....	13
Figura 2.12 - Esquema do processo RTM	14
Figura 2.13 - Esquema do processo de infusão	14
Figura 2.14 - Estratégias de injeção	17
Figura 2.15 - Amostra [0°/90°]: (a) Não envelhecida; (b) após exposição cíclica.....	28
Figura 2.16 - Princípio de funcionamento da câmara EQUV	30
Figura 3.1 - Placa PVC Airex® C70.200 perfurada	32
Figura 3.2 - Tipos de fibra na estrutura do provete.....	32
Figura 3.3 – Provetes utilizados.....	33
Figura 3.4 - Método de Infusão de Resina.....	33
Figura 3.5 - Equipamento de mistura de resina.....	34
Figura 3.6 – Cotas de atravancamento do protótipo funcional	36
Figura 3.7 - Modelação 3D do protótipo funcional	37
Figura 3.8 – Estrutura da câmara em perfil Bosch Rexroth® de 30x30 mm	37
Figura 3.9 – Paredes da câmara em polímero canelado	38
Figura 3.10 – Suporte rotativo.....	39
Figura 3.11 – Sistema rotativo da amostra	39
Figura 3.12 – a) Lâmpada Osram® HTC 400-241; b) Balastro Xtrasun 400W e 230V.....	40

Figura 3.13 – Suporte inicial da lâmpada.....	41
Figura 3.14 – Lâmpada danificada.....	42
Figura 3.15 – Caixa do suporte da lâmpada.....	42
Figura 3.16 – Sistema elétrico desenvolvido para o sistema de radiação.....	43
Figura 3.17 – Sistema de condensação.....	43
Figura 3.18 – Degradação do sensor de humidade.....	44
Figura 3.19 – Sensor de nível de água.....	45
Figura 3.20 – Sistema elétrico do sistema de condensação.....	45
Figura 3.21 – Sistema elétrico do sensor de nível de água.....	45
Figura 3.22 – Sistema elétrico do sistema de controlo.....	47
Figura 3.23 – Vista geral do protótipo funcional para realização de envelhecimento acelerado.....	48
Figura 3.24 – Protótipo Funcional.....	48
Figura 3.25 – Sistema de radiação.....	49
Figura 3.26 – Sistema de condensação.....	49
Figura 3.27 – Sistema de controlo.....	49
Figura 3.28 – Sistema elétrico do protótipo funcional.....	50
Figura 4.1 – Ciclo de radiação (lâmpada não isolada).....	52
Figura 4.2 – Ciclo de radiação (com lâmpada isolada).....	52
Figura 4.3 - Termostato e resistência.....	53
Figura 4.4 - Calibração do termostato.....	53
Figura 4.5 – Ciclo de condensação.....	54
Figura 4.6 – Parâmetros segundo a norma ASTM G154-06.....	55
Figura 4.7 – Ciclos do ensaio de envelhecimento.....	56
Figura 4.8 – Ensaio cíclico radiação/condensação (24 h).....	57
Figura 4.9 – Superfície do provete.....	58
Figura 4.10 - Superfície do provete (200x).....	59
Figura 4.11 – Zona não uniforme comum a todas as placas.....	59
Figura 4.12 - Degradação da matriz.....	60
Figura 4.13 – Efeito da radiação UV na interface laminado/PVC.....	61
Figura 4.14 – Corte transversal na zona furada.....	61

Figura 4.15 – Degradação da interface laminado/PVC.....	62
Figura 4.16 – Micrografia do laminado (fibra + resina)	63
Figura 4.17 – Micrografia da interface fibras/PVC	64
Figura 4.18 – Radiografia digital da zona lateral do provete antes e após 500 h.....	65
Figura 4.19 – Radiografia digital da zona lateral do provete antes e após 750 h.....	65
Figura 4.20 – Radiografia digital da zona lateral do provete antes e após 1000 h.....	65
Figura 4.21 – Imagem processada de comparação da zona de interface do provete antes e após 500 h.....	66
\Figura 4.22 – Imagem processada de comparação da zona de interface do provete antes e após 750 h.....	66
Figura 4.23 – Imagem processada de comparação da zona de interface do provete antes e após 1000 h.....	66

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas das fibras de vidro “E”, “S” e “R” [4]	8
Tabela 2.2 – Vantagens e limitações do processo de infusão.....	16
Tabela 3.1 – Requisitos do protótipo funcional	35

Abreviaturas, siglas e símbolos

$\frac{\Delta P}{\Delta x}$	gradiente de pressão (Pa/m)
A	área da secção transversal (m^2)
CRM	<i>Continuous Random Mat</i>
CSM	<i>Chopped Strand Mat</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ESS	<i>Environmental Stress Screening</i>
FCT NOVA	Faculdade Ciências e tecnologias da Universidade Nova de Lisboa
FTIR	<i>Fourier-Transform Infrared Spectroscopy</i>
GFRP	Glass Fibre Reinforced Polymer
HALT	<i>Highly Accelerated Life Test</i>
ILSS	<i>Interlaminar Shear Strength</i>
K	permeabilidade (m^2)
MACT	<i>Maximum Achievable Control Technology</i>
NTI	Núcleo de Tecnologia Industrial
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i>
RTM	<i>Resin Transfer Molding</i>
UV	Ultravioleta
Q	caudal volumétrico (m^3/s)
μ	viscosidade ($Pa \cdot s$)

1.1 Enquadramento

A utilização de compósitos reforçados com fibras tem grandes vantagens para a construção naval pela capacidade de criar estruturas eficazes e fiáveis. Desde 1940 que compósitos reforçados com fibras têm sido aplicados na indústria naval devido às suas excelentes propriedades em comparação aos materiais metálicos, tal como o aço ou o alumínio. Com a crescente procura e o seu desenvolvimento ao longo dos anos, o comportamento desses materiais em ambiente marítimo deve ser estudado para se poder otimizar as suas propriedades mecânicas [1].

Desde meados de 1980 o crescimento do uso de compósitos aumentou assim como o esforço de poder melhorar a construção com compósitos reforçados com fibra para permitir a redução dos custos de produção e manutenção, mas também com o foco na melhoria do desempenho estrutural do casco. Os compósitos foram ganhando terreno também no fabrico de componentes de embarcações, tal como decks, mastros, lemes, entre outros. Nos submarinos começaram a ser construídos componentes com recurso a esses materiais que posteriormente foram usados no fabrico de navios militares, como por exemplo fragatas. No entanto, é no fabrico de lanchas rápidas e de pequenas e médias embarcações que os compósitos são mais aplicados. Contudo, houve alguma apreensão de alguns arquitetos navais que não estavam preparados para esta mudança. Em alguns casos, aplicavam as mesmas técnicas no projeto de estruturas metálicas que posteriormente se verificava que não seriam as ideais para um projeto em materiais compósitos. Por exemplo, no desenho de juntas de compósitos, as características de projeto eram semelhantes às juntas soldadas de aço, o que não fazia sentido, visto terem menor resistência à fadiga nesses pontos. A construção naval com recurso a compósitos reforçados com fibra teve, como todos os outros processos existentes, um período de aprendizagem e crescimento. Sendo o custo de produção extremamente importante nos projetos navais durante muitos anos, a forma como eram utilizados os compósitos não era a mais rentável, pois era aplicada por lay-up, um processo lento, trabalhoso e muito caro [2].

De acordo com Laurent Morel da *Damen Schelde Naval Shipbuilding* (Vlissingen, Holanda), a grande vantagem de mudar de aço para compósitos reforçados com fibra é a redução de peso, que conseqüentemente faz diminuir o consumo de combustível ou ter a capacidade de aumentar a carga útil. Este autor defende que a construção de navios em compósitos reforçados com fibra tem um custo elevado, mas que a nível de manutenção o custo é muito menor. Em navios de passageiros, que têm uma vida útil de 25 a 30 anos, garante que o investimento nesses navios fabricados com compósitos teria retorno de dois a três anos. Atualmente os compósitos estão a ganhar terreno na construção de navios até 25 m de comprimento em relação ao fabrico com alumínio [3].

Sendo que as embarcações vão estar sujeitas a desgaste e corrosão por estarem inseridas em ambiente marítimo, ambiente salino e expostas a radiação solar, é de extrema importância fazer um estudo do comportamento dos materiais nessas condições ao longo dos anos.

O tema deste trabalho surgiu da necessidade do estudo dos efeitos do envelhecimento no casco de uma embarcação em compósito reforçado com fibra de vidro proposto pelo Arsenal do Alfeite à Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.

O Arsenal do Alfeite está localizado na Base Naval de Lisboa e tem como propósito a construção, manutenção e reparação naval da Marinha portuguesa e de outras Marinhas internacionais, dispondo de tecnologia de ponta para a realização desses trabalhos nas áreas da mecânica, eletrónica, do armamento, da óptica e da eletrotécnica. Tem também a capacidade de realizar estudos e projetos de novas embarcações, modificações e conversões. Estando neste momento a desenvolver uma nova embarcação, é nesse projeto que esta dissertação vai estar inserida.

1.2 Motivação e objetivos

A motivação que conduziu à realização deste trabalho partiu da parceria da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa com o Arsenal do Alfeite. A utilização de compósitos reforçados com fibra é o futuro da construção naval e de outras indústrias, e por isso é importante compreender os processos existentes de fabrico. Cada processo tem as suas vantagens e limitações, sendo que existem alguns que têm sido mais utilizados devido à grande rentabilidade conjugada com as boas propriedades exigidas.

O Arsenal do Alfeite está atualmente a trabalhar na criação de uma lancha salva-vidas em compósito reforçado com fibra de vidro totalmente fabricada em Portugal. Na construção da lancha está-se a recorrer ao método de infusão, sendo o método ideal para a construção naval deste tipo de embarcações. Para o Arsenal é bastante importante perceber o comportamento do material que está a ser aplicado daí surgiu a colaboração com o NTI da FCT NOVA. Nesse sentido, sendo uma embarcação que vai estar inserida no meio marítimo, ou seja, vai estar exposta a fatores externos que podem influenciar as propriedades mecânicas, é importante perceber que influências têm esses fatores na peça produzida.

Assim, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um equipamento de ensaios acelerados de envelhecimento para tornar possível o estudo da perda de propriedades mecânicas do material compósito reforçado com fibra de vidro, obtido pelo processo de infusão, quando sujeito às condições normais de funcionamento. Para a concretização deste objetivo foi realizada a conceção do equipamento e foram conduzidos ensaios qualitativos de envelhecimento acelerado para estudar o efeito da radiação ultravioleta (UV) e humidade sobre a vida do componente, em particular a taxa de degradação do material.

1.3 Estrutura da dissertação

O presente documento apresenta-se dividido em 5 capítulos:

Capítulo 1: é a introdução ao tema e a enumeração dos problemas existentes. São apresentadas as motivações e o objetivo proposto para solucionar os desafios, assim como todo o trabalho realizado.

Capítulo 2: No capítulo é apresentada a revisão bibliográfica e são apresentados os fundamentos relacionados com o tema em estudo, assim como o estado da arte nestas matérias. São descritas as características e propriedades dos materiais compósitos, os vários métodos de processamento e aplicação na indústria naval. É ainda apresentada a revisão bibliográfica referente aos ensaios de envelhecimento acelerado.

Capítulo 3: Ao longo deste capítulo são descritas a produção da amostra e a conceção, o desenvolvimento e a construção do protótipo funcional.

Capítulo 4: Neste capítulo descrevem-se os procedimentos laboratoriais relativos ao uso do protótipo funcional e todos os seus componentes eletrónicos de forma a validar o seu funcionamento.

Capítulo 5: O capítulo 5 apresenta as conclusões e contribuições deste trabalho e as propostas de trabalhos futuros.

2.1 Materiais compósitos

Os materiais compósitos são o resultado da combinação de dois ou mais materiais com diferentes características que quando ligados dão origem a um material com melhores propriedades em alguns aspectos do que cada um dos constituintes separadamente. Uma das principais aplicabilidades dos compósitos é a melhoria das propriedades dos materiais sendo os compósitos fibrosos os mais conhecidos e os primeiros a serem utilizados, como referido no Antigo Testamento, foi a utilização de fibra de palha no reforço de tijolos de argila [4].

Os materiais compósitos ocupam atualmente um lugar de destaque entre os materiais de engenharia, principalmente para aplicações exigentes em estruturas e componentes. A sua utilização tem vindo a crescer devido às suas características. Com efeito, o baixo peso específico, a facilidade de processamento, a elevada rigidez e resistência mecânica dos compósitos de matriz polimérica tem atraído vários tipos de indústrias tais como naval, aeronáutica, espacial e de defesa, automóvel e construção civil, sendo os compósitos mais conhecidos a resinas de epóxido reforçadas com fibra de carbono e de vidro, usada no fabrico de navios, aeronaves e automóveis, e o betão armado, usado na construção civil.

Os materiais poliméricos reforçados com fibra de vidro, normalmente designados por GFRP (*Glass Fibre Reinforced Polymer*), são os materiais mais usados na indústria naval em virtude das suas características.

2.1.1 Matriz

A matriz é a principal responsável de fornecer uma forma regular ao compósito, de proteção da superfície e principalmente proporcionar uma elevada distribuição de carga pelas fibras. Existem vários tipos de matrizes, nomeadamente metálica, cerâmica, cimentosa e polimérica.

Pela facilidade de fabrico e a baixa densidade dos polímeros, os compósitos de matriz polimérica são os mais importantes neste momento pelo seu bom desempenho e pela facilidade de aplicação [4].

As matrizes poliméricas dividem-se em matrizes termoplásticas e matrizes termoendurecíveis. A matriz polimérica termoplástica é normalmente composta pelos plásticos técnicos. Estes plásticos são constituídos por macromoléculas únicas que não fornecem uma reticulação polimérica entre si. Quando são submetidos a alta temperatura as ligações entre as moléculas quebram e vai permitir que haja uma mobilidade entre as moléculas permitindo a reconformação. Após o arrefecimento as moléculas fixam-se na posição atual, restabelecendo as relações químicas entre elas. Assim, os termoplásticos apresentam boa capacidade de resistência ao impacto e uma boa tenacidade quando comparados com os plásticos termoendurecíveis. São tipicamente produzidos por injeção ou por

termoformação, conseguindo assim ser reciclados. Contudo têm como ponto limitativo, que os impede de ser mais implementados na indústria, o facto de ser muito difícil a introdução de reforços.

A matriz polimérica termoendurecível é composta por polímeros constituídos essencialmente por moléculas que formam estruturas tridimensionais com elevada rigidez. Estes polímeros, uma vez aquecidos, assumem uma forma permanente o que impossibilita de se poder fazer uma reciclagem, ao contrário dos termoplásticos. Estes polímeros podem também designar-se resinas termoendurecíveis e normalmente são produzidos com a mistura de dois ou três componentes, nomeadamente a resina, o acelerador e o catalisador. Após a mistura destes componentes obtém-se a polimerização e a criação da disposição tridimensional, o que se designa “cura”. Algumas resinas requerem calor e pressão para ser possível esse processo de cura, mas outras conseguem-no fazer à temperatura ambiente. Sendo as resinas termoendurecíveis muito pouco viscosas em relação às termoplásticas, consegue-se com facilidade a introdução do reforço, sendo essa a principal vantagem em relação às anteriores.

Sendo a matriz polimérica termoendurecível a aplicada no caso que vai ser estudado, o estudo será mais aprofundado relativamente a este tipo de matriz. Será importante salientar as resinas que se podem usar neste tipo de matriz e analisar as suas vantagens e desvantagens.

2.1.2 Resinas termoendurecíveis

Neste tipo de matriz pode considerar-se vários tipos de resinas sendo elas: resinas de poliéster, resinas fenólicas e resinas epóxicas e outras, onde se incluem, por exemplo, resinas de vinilester ou bismaleimidas (Figura 2.1) [4].



Figura 2.1- Resinas termoendurecíveis

As resinas epóxicas, apesar de terem um custo mais elevado, são as utilizadas quando se pretende obter materiais compósitos de alto desempenho. Estas resinas possuem, como grandes vantagens, as elevadas resistências mecânica, à abrasão e química, a boa adesão ao reforço (fibra) e a baixa absorção de água. É ainda importante o facto de ser possível ser utilizada numa gama de temperaturas entre 100 e 220 °C e de possuir uma grande estabilidade dimensional por ter uma baixa contração (entre 2 a 3%). O seu processo de cura passa por adicionar um agente endurecedor, tal como aminas alifáticas, aromáticas ou poliamidas, e tem a vantagem de não existir libertação de voláteis. Contudo, tem tempos de cura muito longos e as suas formulações de base

são frágeis, sendo possível ultrapassar esse ponto negativo através da utilização de aditivos de alta tenacidade.

2.1.3 Reforços

O reforço é componente mais importante no material compósito pois vai ser o material que vai fornecer uma boa resistência mecânica ao material. Existem vários tipos de reforços, mas os mais comuns e os que vão ser estudados vão ser as fibras.

Sendo as fibras o elemento mais resistente no material compósito será bastante importante frisar todas as suas características para se fazer uma boa comparação entre os vários tipos de fibras existentes no mercado e perceber as suas vantagens e desvantagens para se poder optar pela fibra que mais se adequa ao trabalho pretendido. A Figura 2.2 mostra as fibras de reforço mais utilizadas.

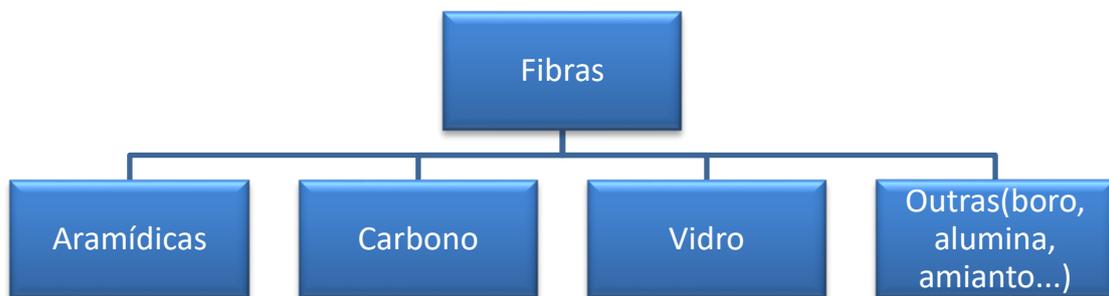


Figura 2.2 - Fibras de reforço

As fibras aramídicas são normalmente conhecidas por fibras de *Kevlar*. São fibras que fornecem uma ótima resistência química e mecânica, e possuem boa relação peso-rigidez. São bastante resistentes ao impacto e detêm um bom amortecimento às vibrações. Tipicamente são utilizadas no fabrico de componentes de proteção como capacetes e coletes com proteção balística, em aviões e em automóveis de competição. Contudo têm como limitações a fraca resistência à compressão e flexão e também alta sensibilidade no corte interlaminar. São fibras com um preço bastante elevado.

As fibras de carbono são utilizadas quando se pretende que o produto final tenha o menor peso possível, mas sem perder boas características mecânicas. Existem três formas de produção de fibras de carbono:

- a celulose que dá origem às *rayon fibers*, que foi dos primeiros processos, mas rapidamente caiu em desuso pela falta de rentabilidade e baixa qualidade das fibras;
- o método do alcatrão *pitch* no qual as fibras possuem menor qualidade que as produzidas pela celulose, mas como é um processo mais rentável consegue satisfazer algumas indústrias, como por exemplo a indústria automóvel;
- o poliácridonitrilo (PAN), mais utilizado, que é o processo mais dispendioso, mas que consegue obter fibras de carbono de elevada qualidade utilizada principalmente em

compósitos de elevado desempenho mecânico aplicado na indústria aeronáutica e na indústria espacial.

As fibras de carbono têm com vantagens a sua baixa massa específica combinada com elevada resistência à tração, grande estabilidade dimensional e um coeficiente de dilatação nulo. Contudo, têm como limitação a sua reduzida resistência ao impacto e pouca deformação antes da fratura, o que implica que é um material bastante frágil, e finalmente por ser uma fibra de custos muito elevados.

Devido ao seu baixo custo, fácil fabrico e excelentes propriedades mecânicas, as fibras de vidro são as fibras mais utilizadas. A produção de fibras de vidro é através do estiramento de vidro fundido por uma fieira com furos de dimensões muito precisas. O vidro é fundido com a temperatura de cerca de 1260 °C e as fibras que saem da fieira sofrem um tratamento superficial que pode ser um revestimento têxtil, para o fabrico de tecidos sem que ocorram danos na fibra, e um revestimento plástico, para poder haver uma boa ligação da fibra com a matriz.

Existem vários tipos de fibras de vidro que podem ser aplicadas (A, C, E, R, S), sendo o teor alcalino responsável pela resistência. A fibra “A”, bastante alcalina, foi substituída pelo uso da fibra “E”, um vidro com poucos componentes alcalinos que apresenta assim boas propriedades elétricas, mecânicas e químicas. As fibras do tipo “E”, “S” e “R” são produzidas sob a forma de fio sendo que a “S” e a “R” provêm de vidros de alta resistência o que implica que são utilizadas em indústrias que o assim exigem, tal como a aeronáutica. Assim sendo, pela observação da Tabela 2.1 é possível perceber as diferenças entre elas.

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas das fibras de vidro “E”, “S” e “R” [4]

Propriedade	Vidro E	Vidro S	Vidro R
Densidade (g/cm ³)	2.6	2.49	2.55
Módulo de Young	73.0	85.5	86.0
Tensão de rotura (MPa)	3400	4580	4400
Deformação na rotura	4.4	5.3	5.2
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)	5.0	2.9	4.0

Para além das fibras anteriormente mencionadas existem outras que também têm a sua importância, mas que são atualmente menos utilizadas devido a não terem um bom desempenho quando são expostas a ambientes mais exigentes. São elas as fibras de Boro, alumina, sisal, poliamidas, poliéster e o amianto. Este último, mesmo tendo boas características caiu em desuso e, posteriormente foi mesmo proibido por ter propriedades cancerígenas.

2.1.4 Formas dos reforços

Os reforços podem-se apresentar em diferentes formas dependendo do tipo de aplicação e do reforço necessário no material compósito. A Figura 2.3 apresenta as diversas formas dos materiais de reforço.

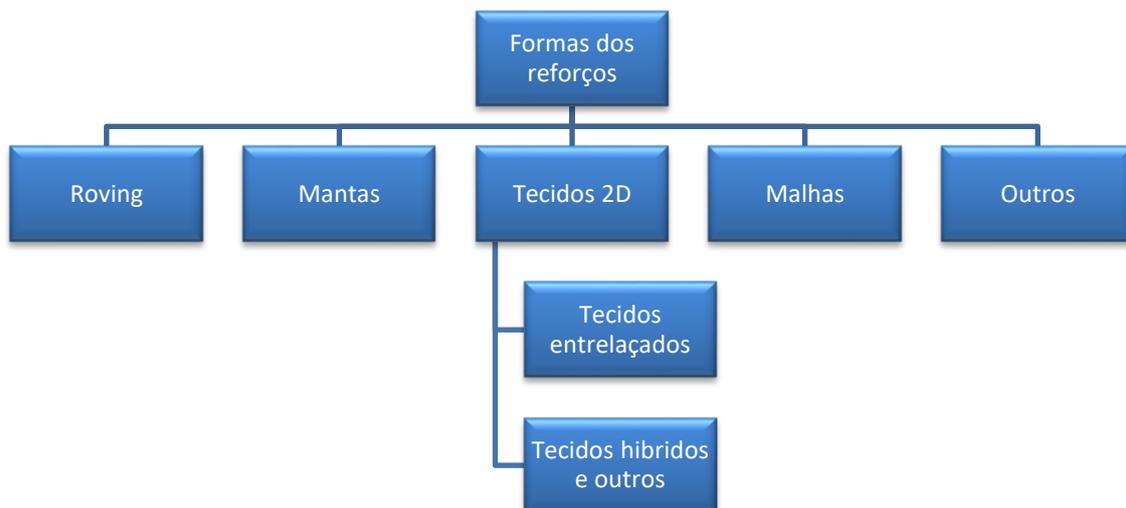


Figura 2.3 - Formas dos materiais de reforço

O **roving** é um cordão de filamento contínuo enrolado helicoidalmente em bobines (Figura 2.4). É usado normalmente na produção de fibras curtas, na moldação por projeção, na produção de tecidos ou na produção de mantas, tecidos entrelaçados, híbridos ou malhas.



Figura 2.4– Roving [5]

As **mantas** são constituídas por várias fibras distribuídas aleatoriamente e agregadas por um ligante que lhes fornece estabilidade e que é solúvel na impregnação (Figura 2.5). Existem três tipos de mantas nomeadamente, mantas de filamentos contínuos (CRM, *Continuous Random Mat*), mantas de filamentos cortados (CSM, *Chopped Strand Mat*) e mantas de superfície.

As mantas CSM apresentam fibras de menores comprimentos e por isso as suas propriedades mecânicas são baixas. As mantas CRM conseguem fornecer mais resistência mecânica que as anteriores e maior conformidade. As mantas de superfície têm como vantagem a sua leveza e são constituídas por fibras curtas com uma pré-aplicação de resina para evitar o aparecimento de fibras na superfície, assim conseguem ter um bom acabamento superficial e uma boa resistência química.

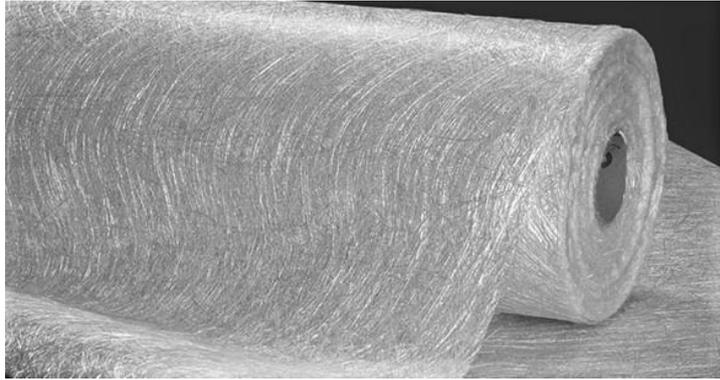


Figura 2.5 – Manta [5]

Os **tecidos** são a junção de vários tipos de feixes de fibras longas para se poder fazer uma aplicação em que exijam excelentes propriedades mecânicas. Podem ter várias espessuras, larguras, orientações e resistência mecânica. Assim sendo devem ser suficientemente estáveis para fornecer um bom manuseamento, corte fácil e boa capacidade de se adaptar à forma do molde, característica que se denomina de drapeabilidade. Os tecidos são caracterizados pela orientação das fibras, pelo método de aplicação e pela massa por unidade área, assim como as mantas.

- **Tecidos entrelaçados**

Como o nome próprio indica estes tecidos resultam no entrelaçamento de fibras em direções perpendiculares que se pode organizar em diversos padrões. Existem três tipos de padrões mais utilizados e são eles: “*plane weave*”, “*twill weave*”, e “*satín weave*” (Figura 2.6). Nos “*plane weave*” cada fibra a 0° é entrelaçada alternadamente, por baixo e por cima das fibras orientadas a 90°, sendo assim um tecido simétrico fornecendo uma boa estabilidade. Nos tecidos “*twill weave*” as fibras orientadas a 0° passa, alternadamente, por cima e por baixo de duas ou mais fibras na orientação de 90°. Por último os tecidos “*satín weave*” são organizados da mesma forma que os tecidos “*twill weave*” mas ajustados de forma a promover menos interseções das fibras orientadas a 0° com as fibras a 90°.

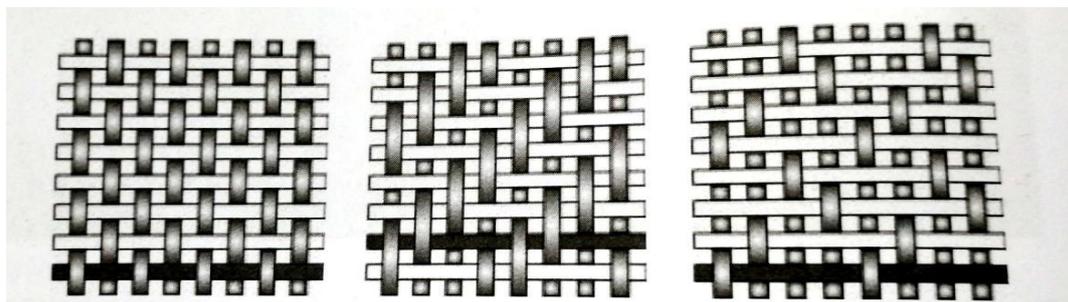


Figura 2.6 – Exemplos de tecidos entrelaçados [4]

- **Tecidos híbridos**

Estes tecidos são a combinação de vários tipos de fibras de forma a ser aproveitando as melhores características de cada fibra, como por exemplo a combinação do vidro e carbono ou o carbono e aramida. Conseguem ter como vantagem em comparação aos tecidos normais, a

minimização de distorções de origem térmica e um ótimo compromisso entre resistência mecânica, rigidez, tenacidade e peso.

- **Malhas**

As malhas são produzidas com a sucessão de camadas de fibra alinhadas, sendo cosidas em conjunto (Figura 2.7). Esta técnica consegue fornecer facilidade na distribuição das cargas pelas fibras, obtendo assim grandes resultados no que toca a tração e flexão. Têm boa resistência interlaminar e excelente conformidade.

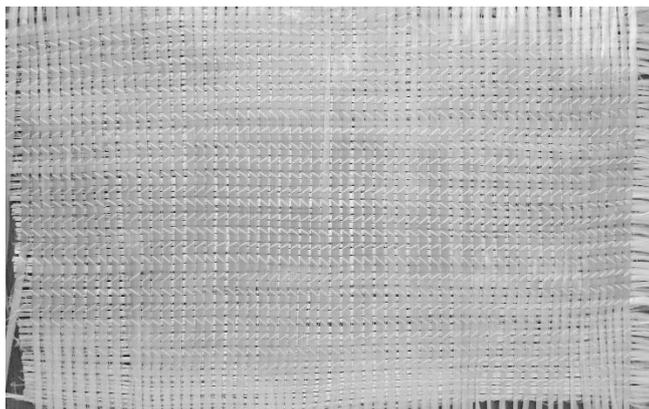


Figura 2.7 - Malha

Os reforços podem ainda ser apresentados na forma 3D, entrançados ou em pré-formas. Assim sendo os tecidos 3D tem como principal aplicabilidade o reforço de perfis e painéis com fins estruturais pois consegue uma boa resistência interlaminar. Os entrançados têm um processo de produção mais caro que as mantas as suas resistências especifica consegue ser mais elevada. Conseguem se apresentar na forma tubular e plana, e como apresentam uma boa conformidade são aplicados em pás de avião ou numa simples raquete de ténis. As pré-formas podem ser em 2D ou 3D dependendo do material que se quiser obter e tendo fibras curtas ou continuas. As pré-formas são utilizadas no fabrico de peças de geometrias complexas. Apos a colocação das fibras na cavidade de moldação é feita a injeção de resina. As pré-formas conseguem ser estáveis e fornecer uma excelente relação peso-resistência.

2.2 Processamento dos materiais compósitos

Existem várias técnicas de processamento de materiais compósitos em matriz polimérica dependendo da sua aplicação. Isto é, dependendo das propriedades finais que se queira dar aos materiais compósitos, da sua geometria e local onde vai ser aplicado, escolhe-se o processamento mais correto. Os processos podem-se classificar em dois tipos: processamento em molde aberto ou o processamento em molde fechado. Em molde aberto existe a vantagem que se conseguir processar compósitos de grande dimensões e formas complexas, mas apenas uma das superfícies tem bom acabamento. Em molde fechado consegue-se bons acabamentos superficiais e baixa emissão de produtos voláteis nocivos à saúde.

O **processo manual (*lay-up*)** é o método mais simples e o mais comum devido à sua facilidade e pouco investimento associado, pois não necessita de mão-de-obra muito qualificada (Figura 2.8). Devido à libertação de gases voláteis, principalmente estireno, necessita de ser processado em ambientes ventilados. As principais vantagens deste processo mais simples são a pouca restrição geométrica das peças formadas e o seu baixo custo. Contudo, sendo um processamento manual exige bastante da mão-de-obra (habilidade e cuidado do operário) e como já foi referido anteriormente, sendo um processo de molde aberto, implica o bom acabamento superficial só numa face.

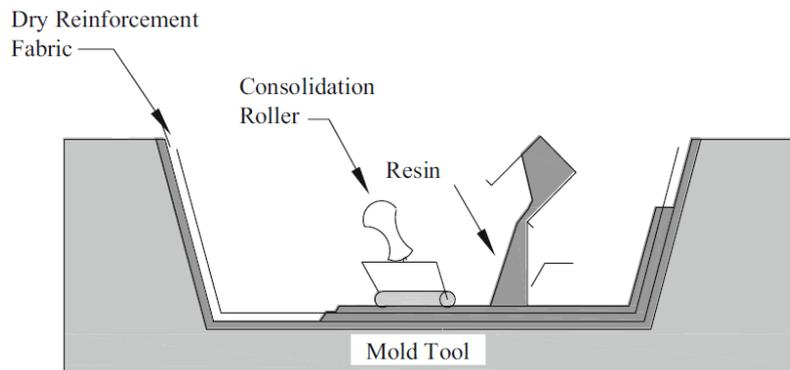


Figura 2.8 - Esquema do processo manual (*lay-up*) [6]

No **processo de moldação por projeção (*spray-up*)** a fibra e a resina são libertadas simultaneamente numa pistola de mão diretamente para o molde (Figura 2.9). A fibra está na forma de *roving* e vai ser projetada e cortada ao comprimento desejado juntamente com um jato de resina. O processo de cura é feito à temperatura ambiente e em locais arejados devido à libertação de voláteis. Sendo o produto final um material com maior taxa de resina que fibra, que atinge apenas 15%, torna-se um material com baixas características mecânicas, inferiores até às obtidas por moldação manual.

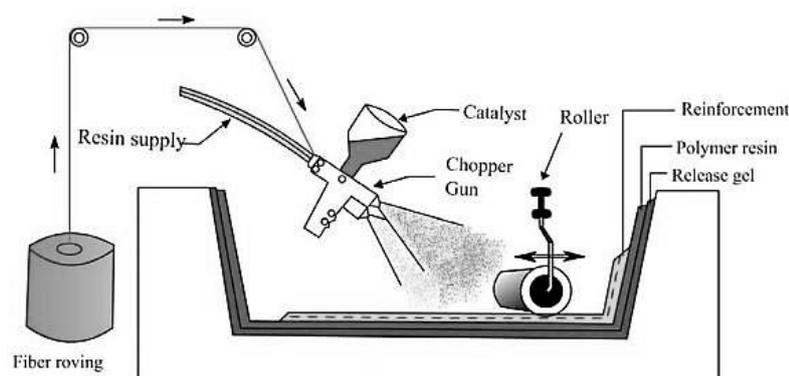


Figura 2.9 - Esquema do processo de moldação por projeção (*spray-up*) [7]

O **processo de moldação por vácuo** consiste na aplicação de vácuo no interior do molde (Figura 2.10). Sendo o molde estanque vai reduzir muito a libertação de voláteis. É introduzida a resina e o reforço no interior do molde previamente e depois é injetada mais resina a baixa pressão. É fechado o molde e é aplicado o vácuo no interior de forma a conseguir obter duas superfícies lisas

com poucas bolhas de ar e, conseqüentemente, obter grandes taxas de reforço no material obtido, conseguindo chegar a 70% de fibras. Esta técnica é bastante utilizada na construção de cascos de pequenas lanchas semirrígidas.

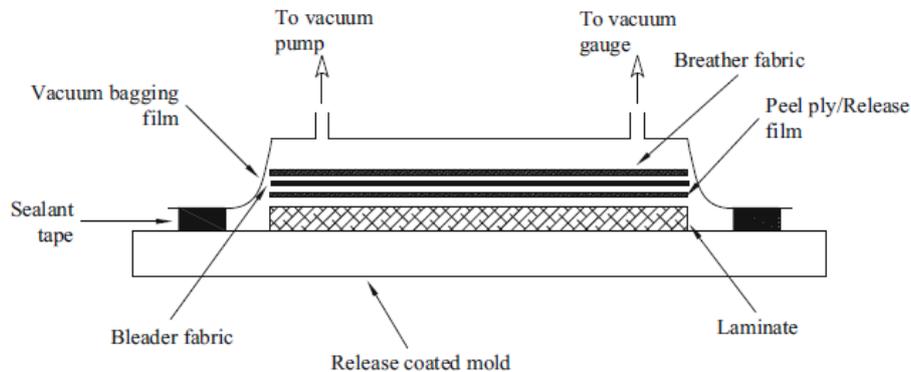


Figura 2.10 - Esquema do processo de moldação por vácuo [6]

O **processo de moldação em autoclave** consiste na consolidação de um material já pré-formado com a aplicação simultânea de vácuo, temperatura e pressão (Figura 2.11). Inicialmente tenta-se baixar a viscosidade da resina para facilitar o fluxo para que se consiga teores de fibra elevados. O vácuo é bastante importante no processo, mas é a pressão que exerce o papel mais importante na última etapa, que é a cura do material. Tem como grande limitação o elevado investimento, mas também o tempo que demora todo o processo. Contudo, consegue produzir peças de grandes dimensões e com geometrias complexas e a sua principal vantagem é a capacidade de fornecer ao material elevada qualidade e excelentes propriedades mecânicas. Por este facto é bastante utilizada na indústria aeronáutica, no fabrico de automóveis de luxo e desporto motorizado, nomeadamente na fórmula 1.

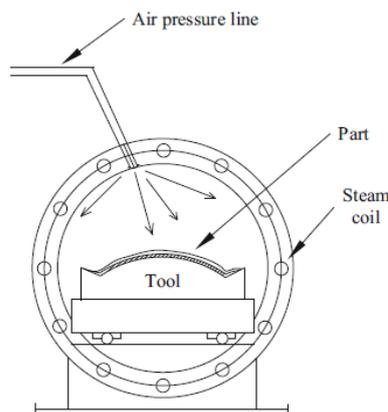


Figura 2.11 - Esquema do processo de moldação em autoclave [6]

O **RTM (Resin Transfer Molding)** é um processo de molde fechado, bom para produções em série de materiais compósitos. O tecido é colocado no molde, o contramolde é fechado de modo a poder fazer pressão sobre o tecido para definir a espessura desejada da peça final. É injetada a resina de baixa viscosidade no molde de forma a impregnar nas fibras, podendo ser usado o vácuo. Após a injeção de resina dá-se o processo de cura e posteriormente é desmoldada a peça (Figura 2.12). Este processo tem como vantagem a capacidade de excelente acabamento superficial nos dois lados da peça e não ter emissões de gases voláteis para a atmosfera. Contudo é um processo que requer algum investimento e que apenas é rentável em produções em série de compósitos [6].

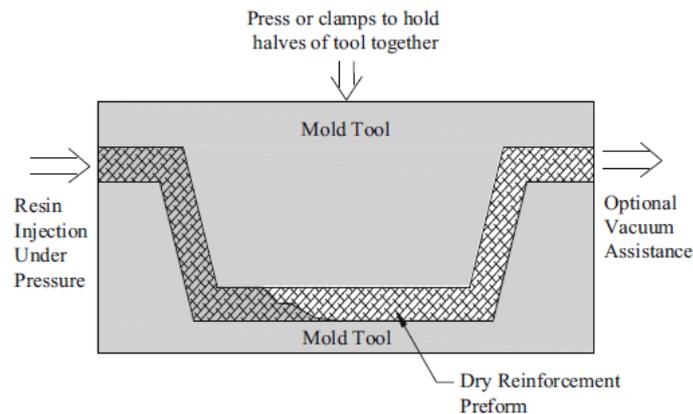


Figura 2.12 - Esquema do processo RTM [6]

No **processo de infusão** são introduzidos previamente na configuração do molde os reforços na forma de tecidos 2D, envolvidos por um saco de vácuo. Após o saco estar em vácuo é inserida a resina, através de mangueiras ligadas ao reservatório de resina (Figura 2.13). Estes laminados conseguem ter excelentes características mecânicas pois devido a esta técnica consegue-se ter elevadas taxas de impregnação nas fibras. Tem como limitação a complexidade de todo processo e algum custo inicial [8]. Este processo vai ser o que se vai estudar nesta dissertação e por isso será mais desenvolvido.

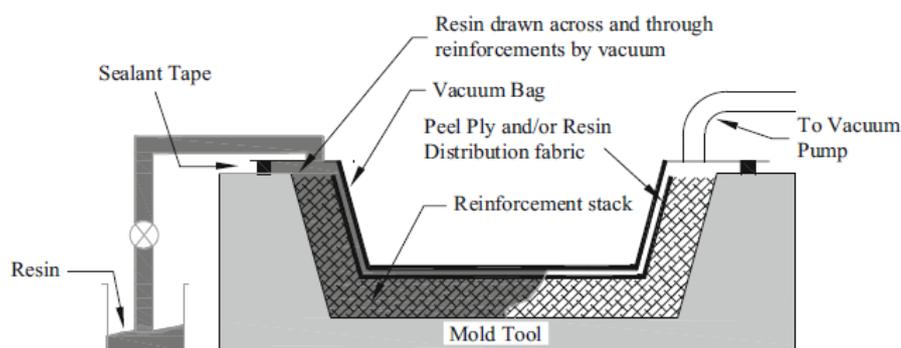


Figura 2.13 - Esquema do processo de infusão [6]

2.2.1 Processo de infusão

Ao longo dos últimos anos com o crescimento da indústria da utilização dos compósitos houve uma necessidade de desenvolver técnicas de processo que sejam rentáveis a nível económico e de

produto final. Nesse sentido as técnicas de vácuo e de pressão têm ido ao encontro de todos esses pontos, permitindo a criação de componentes resistentes, leves e principalmente de rápido fabrico.

O processo RTM consegue ir ao encontro das características mecânicas desejadas e de ter a capacidade de fazer injeção a pressão elevadas em peças de grandes dimensões, mas a nível económico não é viável pois requer um grande investimento de moldes complexos. Nesse sentido o processo de infusão, sendo mais económico, ganhou terreno em relação a outros processos pois permite criar laminados robustos, de elevada qualidade e com poucas imperfeições, resultante do uso de fibras padrão e de um sistema de resina eficiente, sendo ele um processo mais económico comparado a outros [9].

Este processo tem como principal objetivo criar uma boa impregnação da resina nas fibras de reforço do fabricado colocado previamente. Estes defeitos são normalmente chamados de lacunas, ou seja, são aberturas nas fibras secas e a resina vai impregnar nelas através do vácuo.

O fluxo de resina na infusão deve garantir que a resina injetada atinja todo o laminado antes do início da cura e a chegada à saída de resina. Contudo é um processo que requer um planeamento complexo devido a grande variedade de tamanhos, forma ou o próprio tipo de laminado a fabricar de forma a promover um escoamento completo da resina de forma a não se formar as lacunas.

Resumidamente o processo de infusão a vácuo é composto por um saco de vácuo que contém um fabricado e o reforço. Recorrendo a uma bomba de vácuo é colocada uma pressão negativa dentro do saco, ou seja, é posto em vácuo, e seguidamente a resina é injetada no molde, proveniente de um depósito, conseqüente dessa mesma pressão. Após percorrer toda a peça a resina vai sair pelo tubo onde está ligada a bomba de vácuo, onde existe um recipiente intermédio entre a bomba de vácuo e o saco de forma a poder retirar toda a resina em excesso do laminado. Retirada a resina em excesso, a peça é mantida em vácuo durante todo o seu processo de cura.

A questão ambiental também foi um fator que fez com que esta técnica tenha vindo a ser mais aplicada e desenvolvida. Da década de 90 a EPA (*Environmental Protection Agency*) definiu um máximo de emissões de poluentes atmosféricos perigosos das indústrias, o MACT (*Maximum Achievable Control Technology*). Conseqüência disso, a infusão, sendo um processo em molde fechado, sofreu um grande crescimento pela sua baixa emissão de gases perigosos, principalmente o estireno. Sendo um processo mais amigo do ambiente também é para o trabalhador, visto fornecer mais segurança ao mesmo [10].

A infusão, tal como todos os outros, requer uma boa coordenação de todos os aspetos de montagem e a sequência do processo. Para isso mesmo seguidamente faz-se um estudo de todos esses aspetos para que o processo e infusão seja bem-sucedido [9].

Sendo a infusão uma técnica desenvolvida para ter baixo custo é capaz de competir com algumas de custo elevado em algumas situações. Como todos os processos existentes na indústria dos compósitos tem os seus pontos positivos e negativos, como apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Vantagens e limitações do processo de infusão

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> • Não tem emissão de estireno, pois tem a possibilidade de trabalhar com moldes simples e fechado. • Excelente qualidade do laminado, conseqüente de uma boa impregnação de resina e possibilidade de trabalhar com fibras de alta qualidade. • Grande consistência das propriedades do laminado final, depende menos das capacidades do operador, isto basicamente mostra que é um processo que bem montado não tem margem para erros ou diferenças entre laminados. • Baixo consumo de material, é um processo que só usa a resina necessária e também há um menor desperdício de bordas do laminado final. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tem algumas limitações no formato do laminado final, das condições de processamento e a formação do operador. • Existe a ausência de ferramentas de controlo para auxiliar o operador em caso de erros de montagem, nomeadamente erros na colocação do reforço ou da grelha de forma a garantir um excelente fluxo da resina. Estes tipos de erros só são detetados apos o início da injeção de resina e caso se verifiquem não existe forma de se resolverem. • Em algumas situações é difícil conseguir um bom acabamento superficial, nomeadamente quando existe a combinação de laminados finos e espessos. • Grande sensibilidade na injeção de resina, o que torna um processo muito suscetível a erros. • Grande desperdício de materiais no processo, muitos deles aplicados uma só vez, como o caso das fitas isolantes, tudo de escoamento e as válvulas.

O método de infusão teve como primeiro alvo a indústria naval, mas ao longo dos anos tem vindo a ser aplicado noutras indústrias de forma a torná-las mais sustentáveis a nível económico e de qualidade de produção. Assim, para além da indústria naval (construção de cascos de navios e componentes) as principais indústrias onde se utiliza o processo de infusão são a dos transportes (chassis e carroçarias de automóveis, por exemplo), defesa (blindagem de carros e navios de combate), infraestruturas (pontes, colunas de iluminação), energia (pás de turbinas eólicas, estrutura de células fotovoltaicas e aeronáutica (componentes e fuselagem).

Sendo o caso de estudo sobre o envelhecimento de um casco de um navio, será explicado como este método é aplicado na construção do mesmo.

É importante estudar o fluxo antes de fazer a injeção de resina, pois é necessário perceber bem qual a técnica mais apropriada para cada tipo de projeto. Com esse estudo consegue-se saber a posição ideal para a colocação dos tubos de injeção e de saída do mesmo, bem como é importante perceber se a resina vai preencher todo o molde e o tempo que demora a fazê-lo. Quanto mais tempo demora a injeção maior a probabilidade de o processo ser mal executado. Na infusão, o escoamento da resina é o fator mais importante e decisivo de todo o processo, pois é um dos que influencia a qualidade do produto final. Nesse sentido é importante perceber e explicar o fluxo da

resina através de um meio poroso, como é o caso das fibras. O fluxo unidimensional pode ser explicado através da Lei de *Darcy* [11]:

$$\frac{Q}{A} = \frac{K \Delta P}{\mu \Delta x}$$

Sendo:

Q = caudal volumétrico (m^3/s)

A = área da secção transversal (m^2)

K = permeabilidade (m^2)

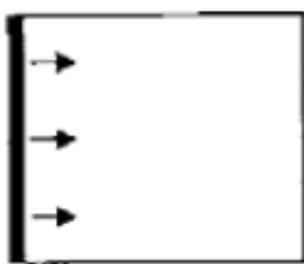
μ = viscosidade ($Pa \cdot s$)

$\frac{\Delta P}{\Delta x}$ = gradiente de pressão (Pa/m)

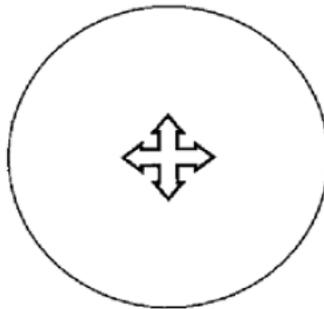
Pela Lei de *Darcy* pode-se perceber que se consegue mais rapidamente o preenchimento da peça com a resina se forem considerados os seguintes aspetos técnicos:

- Maior diferença de pressão
- Menor a viscosidade da resina
- Maior permeabilidade das fibras

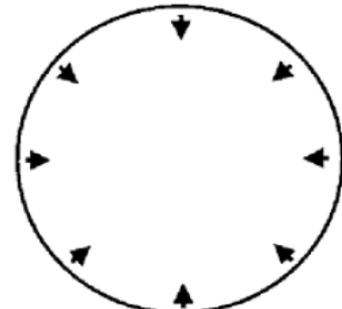
É necessário criar uma estratégia de injeção para cada peça a produzir, ou seja, identificar onde vão ser colocados os tubos de entrada e de saída para que o tempo de preenchimento da peça seja o menor possível. Nesse sentido, existem três estratégias básicas para a injeção, conforme ilustrado na Figura 2.14.



Injeção em linha (injeção em linha de uma placa retangular)



Injeção no ponto central de uma placa circular



Injeção circular em torno de uma placa circular

Figura 2.14 - Estratégias de injeção [9]

O método de infusão é bastante versátil, mas tal como todos os outros processos existentes no fabrico de compósitos, requer um estudo prévio dos passos necessários para que o resultado final quer a nível estético ou mecânico, vá ao encontro do que é esperado. Para isso é aconselhável realizar alguns testes tal como:

- Pequenos ensaios de injeção em painéis planos, de forma a perceber a permeabilidade do reforço e o seu manuseamento, mas também para o estudo da resina, a sua viscosidade, a impregnação no reforço e o processo de cura. Com este teste é possível fazer uma triagem inicial dos materiais a trabalhar.

- Teste de injeção mais simples em escala real de forma a estudar o comportamento dos materiais em secções mais difíceis e complexas, como é o caso dos cantos ou mudanças de espessura.

- Por fim, um teste de injeção em escala real no molde de produção. Este teste final garante os ajustes perfeitos para o processo de forma a eliminar possíveis erros.

Sendo estes testes bastantes importantes para uma boa estratégia de injeção também é preciso ter outros aspetos em consideração para o sucesso do trabalho. Para isso, é necessário fazer uma boa preparação do molde. O molde deve ser bem limpo e se existirem alguns defeitos no molde, estes devem ser reparados com cuidado para não afetar a estanquicidade do molde. Deve ser aplicado um desmoldante de forma a facilitar a remoção da peça final. Para além disso, o agente desmoldante também prolongará a vida útil do molde.

Seguidamente, dependendo do tamanho e dos requisitos da peça, pode ser aplicado o *gel coat*. O *gel coat* não deve ser aplicado na parte do molde onde vai selar o saco de vácuo. Pode ser aplicado posteriormente a cada camada do empilhamento para se obter melhores propriedades finais ou para proteger a camada no processo de colocação das fibras (reforço) de forma a providenciar uma boa adesão. A aplicação do *gel coat* durante o empilhamento é um processo que requer algum tempo dependendo sempre das proporções do molde.

A aplicação do reforço também tem a sua técnica e precisão necessária para que este método seja eficaz e por isso é importante perceber como se pode aplicar o reforço. Para peças pequenas o reforço é cortado na medida necessária pronto a ser colocado no molde, já nas peças de grandes dimensões o reforço é pré-cortado e fixado no molde. Para isso existem os seguintes métodos de fixar o reforço no molde:

- Fixos com grampos temporários que serão removidos antes ou depois da infusão.
- Fixos com grampos permanentes que permanecerão na peça final.
- Fixos com adesivos e colas.

Um dos pormenores mais importantes do método de infusão é a colocação dos canais de entrada e de saída de ar e de resina. Antes de se colocar o saco de vácuo, com os seus respetivos canais de entrada e saída, é necessário aplicar sobre o reforço uma grelha de forma a facilitar o fluxo de resina, quando o saco se encontra em vácuo e no seu processo de cura. É um pormenor bastante importante no processo de desmoldagem pois não vai agarrar à peça final. Também permite garantir uma fácil desmoldagem dos canais de distribuição de resina que são envolvidos em camadas peel-ply de forma também a impedir que o saco de vácuo possa ser pressionado em excesso e obstruir o canal. A colocação dos canais de entrada e saída, dependendo da estratégia

de injeção de resina, pode ser aplicada de duas formas, nomeadamente nas bordas da peça ou no centro da peça.

Normalmente a técnica mais usada é a colocação do canal de saída nas bordas da peça, pois é bastante simples e eficaz. A porta de saída que também pode ser integrada no molde, no entanto não é tão usual. No ponto de saída é necessário colocar uma porta de saída, uma conexão simples entre o reforço e canal de saída, ligada por um material isolador de forma a não haver perda de vácuo no circuito.

Fechar o molde com o saco de vácuo é outro passo bastante importante no processo. Fechar o molde depende do tipo de molde existente, se for uma peça que tem uma certa produção em série provavelmente não vai ter um saco de vácuo, mas sim um vidro flexível reutilizável. Esse vidro é colocado sobre o molde e o reforço, e o próprio vidro tem integrado nas bordas borracha e o-rings de silicone muito eficazes para vácuo. Quando a infusão é aplicada a pequenas produções de peças é normalmente usado o saco de vácuo e para garantir que não haja entrada de ar, é usada Tacky-Tape® (fita à base de borracha butílica de grande elasticidade) para fixar o saco ao molde. Sendo o processo de vazamento da resina crítico na infusão a vácuo, na maior parte das vezes são usadas duas linhas de fita para garantir ausência de fugas.

Quando o molde é fechado dá-se início à colocação do molde em vácuo. Neste momento é necessário fechar o tubo de entrada de resina e a bomba de vácuo é colocada em funcionamento. Após atingir a pressão ideal para o processo, a bomba é desligada e é medido o decaimento de pressão. Nesse momento é possível perceber se existe alguma fuga de ar antes de dar início à injeção de resina. Consegue-se perceber a taxa de vazamento com a leitura de pressão. Havendo alguma fuga é necessário encontrá-la e repará-la. Se for com o método de saco de vácuo normalmente é verificada a Tacky-Tape® e possíveis fugas nos tubos de entrada e saída: Se for fechado em vidro flexível é aconselhável verificar o estado das borrachas e limpar bem a superfície de contacto. Sendo os provetes que se são estudar feitos com recurso a saco de vácuo e sendo a simulação de envelhecimento de um casco de um navio, a procura de fugas pode facilmente levar um dia. Após o teste de fugas a pressão é diminuída até atingir a pressão ideal para a injeção de resina.

A preparação da resina é outro fator importante em todo o processo. Como é aconselhável que a resina utilizada na infusão esteja à mesma temperatura do local onde vai ser aplicada, normalmente 24 horas antes da sua utilização deverá estar na oficina. A mistura deve ser feita com especial atenção para não haver criação de bolhas e retenção de ar excessivo na resina que possam permanecer na peça final. A resina deve ser desgaseificada antes e depois da mistura de forma a retirar todas as bolhas de ar existentes.

A injeção de resina tem vários aspetos importantes a ter em consideração. Após a taxa de fuga ser aceitável, a pressão de injeção de resina ser a mais indicada, fazer a mistura da resina e a temperatura e viscosidade da resina ser a ideal, é dado o início à infusão. O tubo de entrada da resina é fixo e mergulhado num reservatório de resina. Com a bomba de vácuo a funcionar é aberto

o tubo de entrada e a resina flui para dentro do molde. Em infusão em saco de vácuo é possível ver o fluxo de resina no molde e perceber se a resina está a fluir para toda a peça. Na infusão de peças de grandes dimensões, por vezes é possível a deteção de bolhas e nesses casos é feito um furo no saco para libertar o ar e colocado imediatamente a fita Tacky-Tape® para isolar a fuga. Mesmo que visualmente a resina tenha preenchido o molde, não significa que o processo de infusão tenha sido bem sucedido. A espessura, as tolerâncias e espessura e as fibras são todos afetados pela forma como é terminada a infusão. É possível terminar de quatro formas dependendo do objetivo final da peça.

- Se a entrada de resina for fechada primeiro a pressão do molde diminuirá para a atingir a pressão de infusão. Nesse caso a resina em excesso vai sair do molde e conseqüentemente a espessura vai diminuir, conseguindo-se elevado número de fibras homogêneas. Contudo tem como desvantagem que as bolhas de ar, que poderão existir no molde, aumentem de tamanho, normalmente acontece na entrada da resina pois é onde vai haver uma maior queda de pressão.

- Se a saída de resina for fechada primeiro a pressão no molde aumentará para a pressão atmosférica. Embora isto faça diminuir as bolhas existentes a espessura da peça aumentará lentamente, conseqüente a resiliência do reforço, resultando um laminado com baixo teor de fibra. Em posições verticais no molde também podem sofrer com este método, pois devido a gravidade pode levar a espessuras pobres nestes pontos.

- Se fechar a entrada e a saída de resina ao mesmo tempo consegue-se criar um equilíbrio de pressão entre a pressão atmosférica na entrada e a pressão de infusão na saída. Isto seria a maneira ideal de terminar a infusão não fosse a possibilidade de ficarem no molde alguns vazios e bolhas.

- Se aumentar a pressão na saída e subsequentemente fechar a entrada de resina consegue-se um equilíbrio de pressões e havendo alguma pequena fuga o seu gradiente e pressão permanecerá. Em processos otimizados a entrada pode ser fechada antes que o molde seja totalmente preenchido, conseguindo que o excesso de resina presente no molde flua em direção à saída.

2.3 Aplicação na indústria naval

Ao longo de toda a história da indústria naval os engenheiros e projetistas tentaram sempre procurar novos materiais e formas de fabrico que melhorassem o desempenho e reduzissem custos de produção. A construção naval com materiais metálicos sofreu uma diminuição com a implementação de materiais compósitos reforçados em fibra de vidro. Os materiais compósitos reforçados com fibra de vidro têm sido cada vez mais utilizados em vários tipos de indústrias, mas é na indústria naval que predominam. Os compósitos oferecem propriedades que são extremamente importantes para esta indústria, mas há uma que é particularmente notável, a grande diminuição de peso, entre 30% a 70%. Estes materiais foram facilmente conquistando a indústria da construção de pequenas embarcações demonstrando ser bastante rentável a nível de custo, mas também a

com capacidade de ter baixo peso, baixo centro de gravidade, boas propriedades mecânicas e consequentemente capazes de atingir maiores velocidades (lanchas salva-vidas, militares e de recreio).

De acordo com Laurent Morel [3], técnico especialista de estruturas em compósitos na empresa *Damen Schelde Naval Shipbuilding*, a grande vantagem de mudar de aço para compósitos reforçados com fibra não é só a redução de peso, mas o efeito que ela tem sobre o consumo de combustível, que diminui bastante, ou ter a capacidade de aumentar a carga útil. Este autor defende que a construção de navios em compósitos reforçados com fibra tem um custo elevado, mas que a nível de manutenção o custo é muito menor. Em navios de passageiros, que têm uma vida útil de 25 a 30 anos, garante que o investimento nesses navios fabricados com compósitos teria retorno de dois a três anos. Atualmente os compósitos estão a ganhar terreno na construção de navios até 25 m de comprimento em relação ao fabrico com alumínio.

A *Damen Schelde Naval Shipbuilding* começou a projetar e a produzir navios em compósitos na década de 1960. Continuaram o seu desenvolvimento e produção até à década de 1980 onde já conseguiam produzir embarcações de compósito reforçadas com fibra leves e rápidas. Nesses anos a produção com alumínio era mais rentável e a empresa virou a sua produção nesse sentido. Contudo na entrada do século XXI a empresa voltou a apostar nos compósitos e no ano de 2016 tinha uma linha de produção de navio rápidos, até 25 m de comprimento, com uma taxa de produção de um navio por semana. Desta forma é perceptível como a produção em compósitos pode ser extremamente eficiente [3].

Os compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro conseguem ter grandes propriedades mecânicas e serem bastante apropriados e desejados em qualquer tipo de indústria. Com a aplicação de compósitos na indústria naval estes materiais são sujeitos a condições de vida exposta a ambiente marinho severo que pode resultar na criação de humidade na sua estrutura e consequentemente diminuir as suas propriedades mecânicas. A sua resistência estática e à fadiga são afetadas e por isso é importante estudar o comportamento do material nestas condições. Um estudo foi realizado de forma a perceber estas variantes e os laminados foram sujeitos a ensaios de envelhecimento em água destilada a 50 °C até à máxima saturação e chegou-se a conclusão que nos ensaios estáticos devido à absorção de humidade as forças estáticas foram reduzidas em 40% nos laminados com fibras unidireccionais e 54% nos laminados de fibras cruzadas [12].

Atualmente a indústria dos compósitos enfrenta vários desafios importantes. A preocupação ambiental é uma delas e com isso surgiram leis de forma a controlar as emissões de gases voláteis para a atmosfera e com isto garantir também a segurança para os trabalhadores. Com estas medidas algumas das técnicas foram prejudicadas, como é o caso do *lay-up* e do *spray-up*, que por serem processos de matriz aberta emitem em grande quantidade de gás estireno. Assim houve uma necessidade de melhorar e procurar novos processos que seriam mais amigos do ambiente e com menos impacto na mão de obra. Outro grande problema da indústria dos compósitos é o custo associado à produção dos mesmos, processos como o autoclave são extremamente caros e limitados, o que fez aparecer processos como o RTM, processo de moldação por vácuo e o processo

de infusão. O RTM, sendo um processo que implica a utilização de moldes complexos e pesados para suportar a pressão de injeção, torna o processo bastante caro. Assim o processo por infusão foi cada vez mais aplicado e melhorado, visto ter uma melhor relação custo benefícios em relação aos outros. É um processo que consegue ter grandes taxas de fibra e pouca porosidade conseguindo produzir uma peça mais forte em comparação a produção de moldes abertos, que para terem a mesma espessura teriam de prescindir de algumas camadas de fibras [10,12].

Uma das dificuldades dos engenheiros na produção de compósitos é a previsão exata da espessura final da peça a ser produzida. A espessura final de um material feito pelo método de infusão depende das respostas de compressão da pré-forma, pois porque no método de infusão parte do molde é flexível, o saco de vácuo ou vidro flexível. Existem estudos que têm como objetivo estudar a compressão de diferentes tecidos. Os principais fatores que influenciam a compressão é a pressão do vácuo, ciclos de carga e descarga, os tipos de tecidos. Claro está que a recuperação elástica das fibras e a resina também são alvos de estudo. Pode-se concluir com esse estudo que o sucessivo carregamento e descarregamento na pré-forma pode atingir um maior volume de fibras na condição seca e o volume de fibras aumenta com a injeção de resina. Os tecidos de fibra de carbono têm melhor compressão que os tecidos de fibra de vidro [13].

O método de infusão não é aplicado apenas na indústria naval. Devido ao facto de a infusão ter capacidade de produção de peças de qualquer tamanho atualmente as hélices das eólicas estão a ser feitas através da infusão. Com a sequência de acordos internacionais sobre a redução de CO2 houve um grande aumento da procura de implementar energias alternativas. Uma delas foi a energia eólica que tem sido melhorada ao longo dos anos. Um dos objetivos dos engenheiros era tornar as eólicas rentáveis e passava em conseguir produzir mais energia com o vento. Com isto fazia todo o sentido em diminuir o peso das hélices de modo a poder gerar mais energia, mas ao mesmo tempo garantir a sua durabilidade e sustentabilidade ou mesmo melhorar a sua vida útil até aos 20 anos. Com a introdução deste método consegue-se diminuir as manutenções necessárias, que são normalmente de 4 a 6 vezes ao ano, e diminuir a despesa para as empresas [14].

Petrucci *et al.* [15] e Reis *et al.* [16] realizaram estudos sobre a resistência dos compósitos feitos em fibras naturais pelo método de infusão. Petrucci *et al.* executaram testes de flexão, tensão e impacto em compósitos de juta e linho e concluíram que os compósitos de fibras naturais com 30% de volume de fibras possuem menores propriedades mecânicas que os compósitos de fibra de vidro. A resistência ao fogo, a degradação térmica e o nível de permeabilidade à água também foram estudados e os compósitos de juta mostraram os melhores resultados às forças de flexão e tração, e a mais baixa energia ao impacto. Os compósitos de linho mostraram maior energia ao impacto. Nenhuma das amostras mostrou resistência à chama. Reis *et al.* conduziram um estudo para a viabilidade do uso de fibras naturais no reforço de materiais compósitos como alternativa às fibras sintéticas e concluíram que as fibras naturais são inviáveis na substituição das fibras de vidro devido à sua grande deterioração. Após testes de absorção a água com a norma ASTM D570 e teste de envelhecimento acelerado IEC60068-2-38, verificaram que a hidrofília da fibra natural é excessiva,

o que significa que as propriedades mecânicas do material diminuem quando exposto a ambiente húmido ou em contacto com água.

2.4 Ensaios de envelhecimento acelerado

Com a crescente utilização dos materiais compósitos na indústria, é necessário o estudo do comportamento mecânico dos mesmos ao longo do período de utilização. Para tal, deverão existir equipamentos capazes de simular o ambiente em que o material irá estar inserido ao longo da sua vida de forma a acelerar o envelhecimento. Assim, é possível fazer um estudo e uma previsão de vida da peça e até mesmo resolver algum defeito de fabrico ou sugerir melhorias de forma a melhorar o seu tempo de vida. Esses ensaios de envelhecimento acelerado são baseados em modelos teóricos para prever as condições em que o material vai operar e assim poder garantir exatamente essas condições. Estes tipos de ensaios são aplicados em todas as indústrias onde o conhecimento exato da durabilidade de uma peça fabricada é importante para garantir a qualidade e a segurança da mesma [17].

Os ensaios de envelhecimento acelerado consistem em expor o material a envelhecer a condições extremas, isto é, colocar o material a níveis elevados de *stress*. Só assim possível acelerar o envelhecimento e a degradação do material de forma a poder perceber qual o tempo de vida útil do mesmo [18]. São ensaios extremamente importantes para a indústria por conseguirem estimar a vida útil do produto, conseguindo assim melhorar o produto, caso necessário, mas também para poder perceber o tipo de garantia que pode fornecer ao cliente. Também o cliente sai beneficiado com estes ensaios, pois consegue garantir que tem o que procura, de forma a ter garantias de fiabilidade.

Os ensaios de envelhecimento têm como base a conjugação de um ou mais fatores que aceleram a degradação, nomeadamente a temperatura, a exposição à radiação, a humidade, pressão, vibração, entre outras. O *stress* colocado na peça pode ser imposto através de ensaios cíclicos, constantes, crescentes, aleatórios ou até a combinação entre eles.

De acordo com Escobar e Meeker [19] existem dois tipos de ensaios de envelhecimento, e cada um deles fornece informações distintas em relação à mesma peça, ensaios quantitativos e ensaios qualitativos.

2.4.1 Ensaios quantitativos

Os ensaios quantitativos baseiam-se em testes que quantificam as características de vida do produto, peça ou sistema nas condições normais de aplicabilidade, de forma a poder fornecer uma informação mais próxima da realidade. Com este tipo de ensaio pode-se prever a probabilidade de falha do componente na sua utilização e a sua vida média de uso. Para este tipo de ensaio existem dois métodos de envelhecimento acelerado:

- *Usage Rate Acceleration* – tipicamente utilizado no caso de um componente que não vai funcionar continuamente como, por exemplo, um veio pneumático de um elevador de carga. Pode-

se acelerar o envelhecimento desse produto através de um uso contínuo do mesmo até se detetar falhas, ou seja, aumentar a taxa de uso do produto.

- *Overstress Acceleration* – neste caso são aplicados níveis de *stress* que excedam os níveis normais da amostra e usar o *time-to-failure* até obter dados que se consigam extrapolar com as condições em que vai estar inserida, ou seja, expor a amostra a níveis de *stress* maiores que na sua aplicação comum [18–20].

2.4.2 Ensaios qualitativos

Nos ensaios qualitativos são aplicadas condições extremas no produto de modo a provocar uma falha. Estes testes consistem na combinação de vários fatores com nível de *stress* bastante elevados, podendo ser testes variáveis no tempo, em combinações com outros fatores, mas também em *stress* contínuo ou a um ciclo de *stress*. Estes testes podem ser realizados, por exemplo, com uma combinação de calor e humidade, ou calor e frio, de forma a provocar no produto um envelhecimento numa condição extrema, podendo ser até condições em que o produto nunca vai estar exposto na sua vida. Este tipo de ensaio é utilizado para demonstrar falhas prováveis que poderiam acontecer no produto final e não são ideais para um estudo de vida útil de forma a poder haver um bom conhecimento do seu envelhecimento. Pode ainda demonstrar resultados muito positivos para um fabricante, se o seu produto mantiver as suas propriedades iniciais e assim mostrar a elevada resistência às condições extremas, mas também pode ser negativo pois podem ocorrer falhas no produto em que em condições normais de vida nunca iriam acontecer. Assim, é importante perceber em que condições e que tipo de falha ocorre no produto, pois se acontecer uma falha que não influencie o bom funcionamento do mesmo ou até uma falha que nunca iria acontecer na sua vida útil, não há necessidade de se rever o produto final produzido, mudando alguns componentes ou o material de que é feito, criando despesa à empresa e incrementado o valor final do produto. Para a realização destes ensaios é possível forçar falhas num curto espaço de tempo, através de testes HALT (*Highly Accelerated Life Test*), que consistem na conjugação de parâmetros, como por exemplo ciclos rápidos de mudanças de temperatura, vibrações, radiação e ou a combinação de vários fatores [21]. A principal vantagem do HALT é a capacidade de prever falhas no produto final devido a erros de produção dos componentes que o compõem. Tem como limitação o custo adicional que importa ao desenvolvimento do produto, mas assegura o conhecimento para futuros projetos, o que é bastante vantajoso [22, 23]. Ao contrário do HALT, os ESS (*Environmental Stress Screening*) podem ser aplicados nos produtos finais ou que tenham sofrido alguma reparação. São ensaios que se baseiam no envelhecimento sobre o ambiente em que a amostra vai estar inserida durante a sua vida útil [24, 25].

Estes tipos de ensaios têm por base as condições a que a amostra vai estar submetida. Sendo assim neste tipo de teste as variáveis normalmente usadas são:

- A temperatura, combinada ou não com ciclos térmicos;
- Ciclos de humidade;

- Ciclos de funcionamento/ paragem;
- Ciclos de radiação.

2.4.3 Tipos de aceleração

Para que os ensaios de envelhecimento sejam mais eficientes e também mais curtos recorre-se a vários tipos de aceleração do processo. Assim, dependendo das condições em que o material a envelhecer seja exposto na sua vida útil e a que tipo de intensidade vão estar sujeitos, os ensaios recorrem aos seguintes modos de aceleração [17, 19, 26]:

- **Aumento da taxa de uso**

Este tipo de aceleração é normalmente aplicado em produtos que normalmente não são de uso contínuo ou produtos que funcionam a baixas condições de stress. Por exemplo um motor trifásico de um esmerilador que funcione esporadicamente 5 a 6 vezes por semana e tendo uma esperança média de vida de 10 anos se for sujeita um teste de 100 utilizações semanais a vida útil baixa para cerca de 7 meses. Contudo é esperado que neste tipo de aceleração haja uma primeira falha num dos componentes do produto e desta forma pode haver antecipação nos resultados, pois há componente menos resistentes que outro e esse é mesmo o objetivo deste tipo de aceleração.

- **Aumento da exposição e intensidade à radiação**

Existem vários tipos de radiação que podem levar à degradação e à falha do material a envelhecer. Muitos materiais sofrem degradação quando expostos, por exemplo, a radiações ultravioleta (UV), nomeadamente materiais orgânicos, polímeros e principalmente compósitos. Este tipo de aceleração consiste em aplicar no produto uma radiação mais elevada do que aquela que viria a ter na sua vida. Sendo assim, é possível perceber se o produto vai sofrer falhas com a radiação UV, mas também, com o conhecimento dos níveis de radiação, a estimativa de vida da peça nessas condições.

- **Aumento da taxa de degradação**

Neste tipo de aceleração há um aumento do nível de intensidade das variáveis, nomeadamente o aumento de temperatura e humidade que possam provocar defeitos nos componentes. Com estes aumentos sucessivos de níveis é provável que se encontre um enfraquecimento de algum componente do produto e que leve ao fracasso do produto final.

- **Aumento do stress/carga**

Esta aceleração é feita por base no aumento de cargas capazes de incutir falhas no material, nomeadamente esforços mecânicos, elevadas temperaturas e pressões, entre outras. É um tipo de aceleração que tem por base um fator de aceleração que fornece a capacidade de redução de tempo de qualquer tipo de falha na peça. Contudo é necessário que o fator de aceleração, ou seja, os parâmetros, sejam os indicados de forma a não incutir erros de interpretação de resultados, pois pode ocorrer falhas que nunca aconteceriam em normais condições de funcionamento.

2.4.4 Ensaios de envelhecimento acelerado com UV

Muitos materiais degradam-se quando expostos à radiação ultravioleta, nomeadamente os materiais compósitos. É este o tipo de envelhecimento que vai ser aplicado na amostra do casco da embarcação estudado nesta dissertação.

Sendo os compósitos um dos materiais que tem sofrido mais avanços na aplicação industrial nos últimos anos, é importante perceber quais as perdas de propriedades mecânicas do mesmo quando exposto a condições de elevada radiação ultravioleta e de humidade. Um casco de uma embarcação está sujeito a grande exposição solar, ou seja, radiação ultravioleta, grandes mudanças de temperatura, humidade, água salgada, entre outras. Em toda a parte do planeta terrestre, a radiação solar mais elevada é registada ao meio dia, quando o sol está mais alto, contudo dependendo da zona da terra pode estar exposto a radiação UV mais forte ou mais fraca, consoante as condições do local a nível de humidade, poluição, etc. [27].

Lenka Markovičová *et al.* [28] envelheceram três amostras de um compósito de matriz polimérica com reforço de fibra de vidro sobre a radiação UV, com reforço de fibra de 10%, 20% e de 30%. As amostras foram colocadas numa câmara de envelhecimento de modelo Solarbox 1500 E, da empresa CO.FO.ME.GRA. Srl, onde foi fornecida uma radiação de 550 W/m², através de lâmpadas de arco de Xénon. A temperatura da câmara foi controlada a 65°C e os ciclos de radiação alternado com estado de condensação de forma a fornecer humidade á amostra e dessa forma fazer ciclos de humidade e secagem. O teste teve durações de 500, 750 e 1000 horas. Foram feitos testes de dureza e verificou-se que a radiação provocou alguma degradação na estrutura. Houve alguma separação das fibras da matriz e aparecimento de algumas fissuras. Conclui-se que a radiação não influenciou muito o ponto de dureza. Contudo, por uma análise ao microscópio, as propriedades das amostras sofreram algumas mudanças. O compósito que revelou mais degradação à radiação UV foi o compósito de matriz polimérica com 10% de reforço de fibra de vidro, demonstrando assim que quanto maior a percentagem de reforço, mais capacidade tem o material de suportar as elevadas radiações solares.

Cysne Barbosa *et al.* [29] estudaram o efeito do envelhecimento de um material compósito de matriz polimérica reforçado com fibra de carbono. Sendo um material que fornece uma excelente propriedade mecânica combinado com o seu baixo peso e resistência à corrosão, tem vindo cada vez mais a ser aplicado em muitas indústrias, como por exemplo na indústria aeronáutica. Estas peças têm de ter a capacidade de suportar grande mudanças de temperatura, humidade e radiação UV de forma a poder manter as suas propriedades mecânicas, garantindo assim uma construção fiável e segura. Neste estudo, os compósitos carbono-epóxi foram expostos a ciclos alternados de radiação UV-A e condensação de água em uma câmara de envelhecimento acelerado, e os efeitos do envelhecimento sobre o material foram avaliados por *Fourier-Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), *Interlaminar Shear Strength* (ILSS), testes de compressão, microscopia eletrónica e também em termos de variação de massa. O material testado foi o HexPly® AS4/8552, uma fita pré impregnada unidirecional de carbono/epóxi de Hexcel Corporation, com um volume de fibra de 57% e relação de peso de fibra de 65%. O laminado foi feito através do processo de vácuo e o processo

de cura em autoclave. Foram expostos a ciclos alternados de radiação UVA, 8 horas de exposição, a 80°C de 0,89 W/m²/nm, e a condensação de água a 50°C, 4 horas de condensação, num período de três meses, no total 2160 horas, seguindo a norma ASTM G 154-00a [30].

Após o envelhecimento todas as amostras demonstraram perda de massa. Através da microscopia verificou-se que existia degradação na matriz e da relação fibra/matriz. Pelo FTIR observaram-se alterações químicas na matriz polimérica. O ILSS demonstrou haver delaminações na estrutura. Contudo os ensaios mecânicos não verificaram perdas significativas nas propriedades mecânicas, mas tudo indica que um ensaio mais longo poderia diminuir essas propriedades [29].

Também Kumar *et al.* [31] estudaram o envelhecimento de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra de carbono quando expostos a radiação UV. Neste estudo foram usados três tipos de amostras, sendo apenas a diferença entre elas a configuração do reforço, isto é, uma amostra tinha fibras exposta a 0°, a segunda amostra apenas fibras a 90° e a terceira amostra fibras de 0°/90°. Os ensaios foram efetuados com recurso a uma câmara de envelhecimento QUV desenvolvida pela empresa Q-Lab Corporation e estiveram sujeitos a quatro tipos de condições: apenas radiação UV (250 e 500 h), apenas condensação (250 e 500 h), exposição sequencial (250 h/500 h de UV seguidas de 250 h/500 h de condensação) e exposição cíclica (500 h/1000 h de UV e condensação – ciclos de 6 h).

Os resultados revelaram que existe uma grande importância na forma de como se combina estas duas variáveis. As amostras com 500 h de apenas exposição UV tiveram uma menor redução de massa, cerca de 0,27% que é associada à libertação de gases voláteis e da humidade relativa da amostra. Como seria expectável, quando sujeitas apenas a condensação, as amostras aumentaram a massa em cerca de 0,89%. Quando as amostras foram sujeitas a exposição sequencial perderam massa no ciclo de UV e ganharam no ciclo de condensação. Contudo, quando as amostras foram submetidas a ensaios cíclicos de radiação UV e condensação, as amostras revelaram um comportamento inesperado, reduziram a sua massa continuamente demonstrando haver alguma perda de material. Por uma avaliação microscópica foi possível verificar que após exposição cíclica surgiram microfissuras na matriz polimérica, delaminações das fibras e formações de vazios (Figura 2.15). Através de ensaios de tração observou-se que 1000 horas de exposição cíclica de radiação UV e condensação resultou numa diminuição de 29% da resistência à tração. Concluiu-se então que será expectável que uma longa exposição a estas condições provoque falhas graves na matriz do compósito [31].

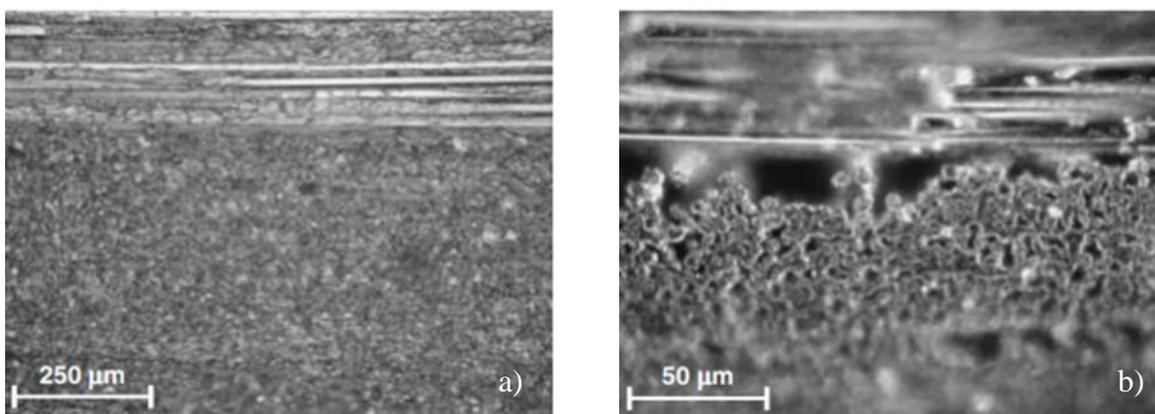


Figura 2.15 - Amostra [0°/90°]: (a) Não envelhecida; (b) após exposição cíclica [31]

A exposição a elevadas radiações UV pode também influenciar a qualidade superficial, nomeadamente a rugosidade do material compósito. Lu *et al.* [32] verificaram que numa exposição de 1000 h de radiação UV combinado com condensação cíclica, numa amostra de compósito de matriz polimérica, a rugosidade superficial da amostra ensaiada diminuiu cerca de 12.5%.

Chang e Chow [33] realizaram o envelhecimento acelerado de material compósito de matriz polimérica reforçado com fibra de vidro exposto à radiação UV, através de uma câmara de envelhecimento QUV®. As amostras foram expostas a 100 h de UV a 50 °C, com lâmpadas fluorescentes UVA-340, de 340 nm de comprimento de onda, com irradiação de 0.8 W/m², e condensação de 8 litros de água destilada por dia fornecendo uma humidade relativa de perto de 100%. Após o envelhecimento realizaram-se alguns ensaios de flexão e teste de tenacidade à fratura. Não se verificou grande influência nos resultados dos ensaios de flexão após o envelhecimento, mas verificou-se uma redução da tenacidade no ensaio de fratura. Assim, concluíram que a exposição da combinação de radiação UV com condensação e calor enfraquece a adesão da resina e fibra de vidro levando assim a uma redução da sua tenacidade.

Afshar *et al.* [34] compararam o comportamento de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra de carbono sujeitos através de um teste em condições reais e um teste de envelhecimento acelerado. Verificaram que existia uma diminuição na flexão para ambas as direções longitudinal e transversal, sendo a transversal mais significativa. As microfissuras produzidas pela radiação UV e a absorção de humidade fazem perder a tenacidade da matriz com a fibra. Concluíram que 2000 h de envelhecimento combinado de radiações UV e ambiente salino numa câmara de envelhecimento acelerado é equivalente a cerca de um ano de envelhecimento nas condições normais, ou seja, em ambiente marítimo.

Os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra são bastante utilizados como revestimento de painéis sanduíche na construção naval, tal como sucede com a construção da lancha salva-vidas que o Arsenal do Alfeite está a produzir. Quando expostos ao ambiente marítimo severo, ou seja, água salgada, grandes diferenças de temperatura e a radiações UV, o material sofre diminuição das suas propriedades mecânicas ao longo do tempo. Korach *et al.* [35] realizaram ensaios de envelhecimento acelerado em compósitos de viniléster reforçados com fibra de carbono.

Os laminados foram sujeitos a quatro situações, expostos a temperatura e humidade, expostos a condições de radiação cíclica UV e a temperatura e humidade, expostos a ambiente salino e a temperatura e, por último, expostos a radiação cíclica de UV e ambiente salino. Verificaram que as amostras que estiveram expostas a radiação UV sofreram microfissuras nas superfícies e alterações químicas na matriz. As maiores alterações químicas apareceram nos ensaios combinados de radiação UV e ambiente salino. Realizaram ensaios de flexão em duas orientações de fibra, 0° e 90° e concluíram que as amostras expostas radiação UV e a ambiente salino têm uma diminuição na resistência à flexão nas fibras orientadas a 90°

2.5 Equipamentos existentes comercialmente

Existem várias empresas que ao longo dos últimos anos desenvolveram câmaras de envelhecimento acelerado. Estas câmaras conseguem simular as condições ambientais a que certos materiais estão expostos ao longo da sua vida de uma forma acelerada, isto é, permitem variáveis de aceleração até níveis extremos. Sendo o envelhecimento sobre a radiação UV o estudo desta dissertação apenas se vai dar importância a câmaras que simulam essa condição.

UV box® da CO.FO.ME.GRA	Características
	<p><u>Lâmpadas:</u> 8 lâmpadas UV</p> <p><u>Radiação:</u> min 0.35 W/m² (UVA, UVB) max 1.55 W/m² (UVA) - 1.23 W/m² (UVB).</p> <p><u>Temperatura:</u> ciclo UV 35-80°C ciclo condensação 35-60°C.</p> <p><u>Capacidade:</u> 48 amostras</p> <p><u>Normas:</u> ASTM D4329, D4587, D4799, D5208, G154, G151, ISO 4892-3, 11507, 11895, 11997-2, EN 927-6, 1297, 12224, 13523-10, 1898, pr 1062-4, SAE J2020.</p>

QUV® da Q-Lab Corporation	Características
	<p><u>Lâmpadas:</u> 8 lâmpadas UV 40 W</p> <p><u>Radiação:</u> min 0.35 W/m² (UVA, UVB) max 1.55 W/m² (UVA) - 1.23 W/m² (UVB) controlado eletronicamente.</p> <p><u>Temperatura:</u> ciclo UV 45-80 °C ciclo condensação 40-60 °C</p> <p><u>Capacidade:</u> 48 a 50 amostras a 75° de orientação</p> <p><u>Consumo água:</u> condensação 8 l/dia spray 7 l/min.</p> <p><u>Normas:</u> ASTM D4799, ASTM D6662, ASTM G154, ASTM D4587, ISO 11507, ISO 4892-3, SAE J2020, J15 K 5600-7-8, EN 927-6 ,AATCC TM186</p>

EQUV® da EQUILAM	Características
	<p>Lâmpadas: 8 lâmpadas UV 40 W de 3 tipos (313 nm – 340 nm – 351 nm)</p> <p>Radiação: min 0.30 W/m² (UVA, UVB) max 1.60 W/m² (UVA) - 1.25 W/m² (UVB) controlado eletronicamente.</p> <p>Temperatura: ciclo UV 5-80 °C ciclo condensação 5-60 °C.</p> <p>Capacidade: 48 a 50 amostras a 75° de orientação</p> <p>Consumo água: condensação 8 l/dia spray 16 l/min</p> <p>Normas: ASTM G 53, ASTM G 151, ASTM G 154, ASTM D 6662, JIS D 0205, SAE J 2020, ISO 4892, ABNT NBR 9512, ISO 11507, DIN 53384, BS 2782, GM 9125P.</p>

O princípio de funcionamento destas câmaras é idêntico. Na Figura 2.16 ilustra-se o princípio de funcionamento da câmara EQUV®, da empresa EQUILAM.

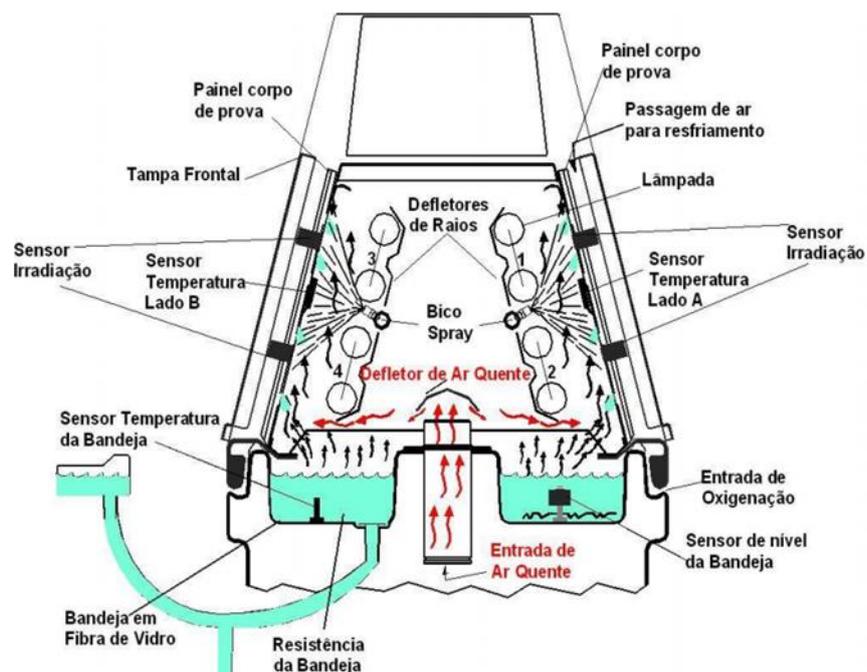


Figura 2.16 - Princípio de funcionamento da câmara EQUV [36]

3 Desenvolvimento do protótipo funcional

Ao longo deste capítulo são descritas a produção da amostra e a concepção, o desenvolvimento e a construção do protótipo funcional.

A construção do protótipo de um equipamento de envelhecimento acelerado tem como finalidade criar um ambiente com as condições ideais para o processo de degradação e envelhecimento de uma peça quando exposto a radiação ultravioleta. O controlo do equipamento é realizado por um equipamento e software dedicado. A sua concepção foi baseada em equipamentos já existentes no mercado, descritos no capítulo anterior, mas marcando pela diferença do tipo de lâmpadas usadas, conseguindo um equipamento mais compacto.

O equipamento foi desenvolvido, produzido e instalado no Laboratório de Tecnologia Industrial do DEMI.

3.1 Concepção da amostra

A amostra, sendo um material compósito de matriz polimérica reforçado com fibra de vidro, foi fabricada através do método de infusão de resina. Este processo, como anteriormente foi explicado, recorre a vácuo de forma a usar o mínimo de resina possível, mas também para obter espessuras inferiores garantindo excelentes propriedades mecânicas.

As amostras são placas e foram produzidas no Arsenal do Alfeite. O Arsenal possui equipamentos dedicados para proceder à infusão para aplicar esta técnica eficientemente, podendo assim garantir boas propriedades mecânicas e acabamentos nas peças produzidas. Será de realçar que todo o casco e os componentes feitos de compósitos da lancha salva vidas estão a ser produzidos exatamente da mesma forma.

O casco da lancha salva-vidas é feito de. O material do casco da lancha salva-vidas é do tipo *sandwich*, ou seja, é constituído por placas de PVC perfurado que é revestido com malhas de fibra de vidro e resina, matriz polimérica termoendurecível reforçada com fibra de vidro.

Os materiais usados para o fabrico do casco, e das respetivas amostras, são:

- Placa de PVC *Airex®* C70.200 perfurada (Figura 3.1).
- 4 camadas de fibra em cada topo (Figura 3.2):
 - 0/90° ETL 800 g/m^2
 - 0/90° ETL 600 g/m^2 [2x]
 - 45° EBX 600 g/m^2
- Resina SR 8100 series do fabricante *Sicomín®*.
- Endurecedor SD 8822 do fabricante *Sicomín®*.

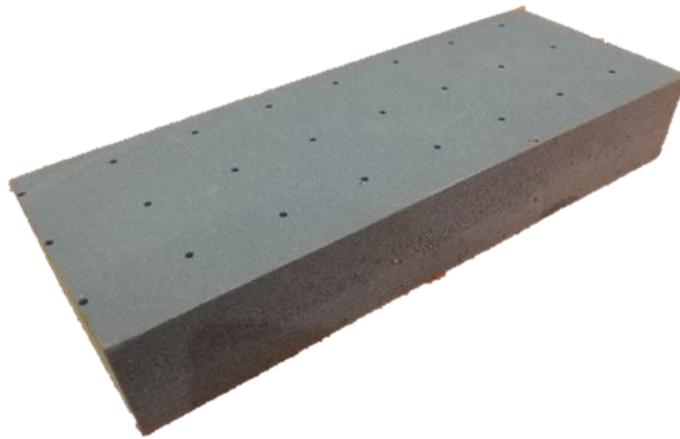


Figura 3.1 - Placa PVC Airex® C70.200 perfurada

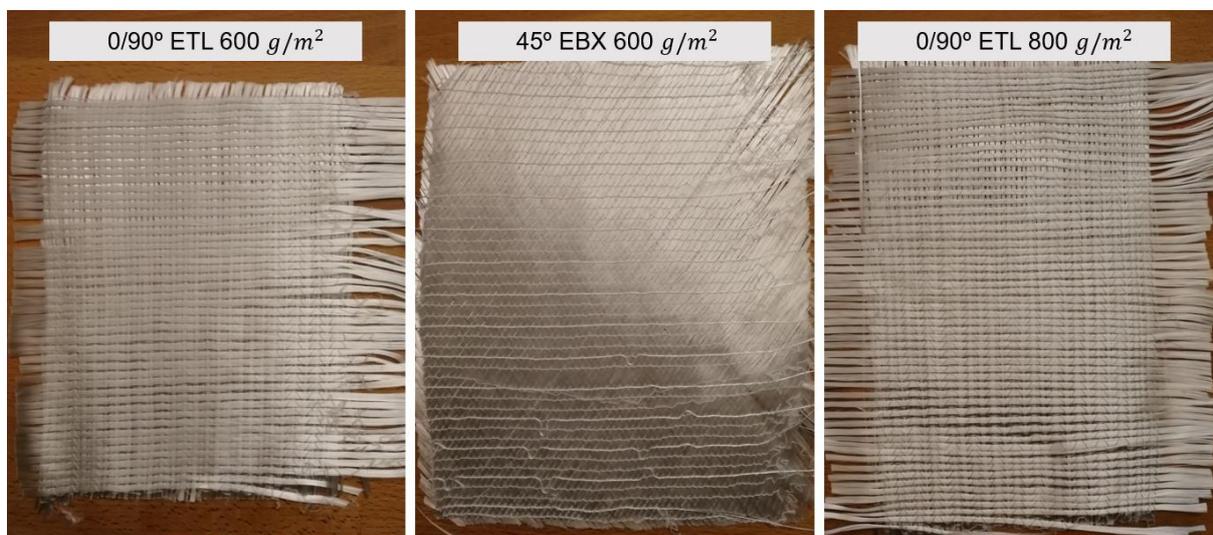


Figura 3.2 - Tipos de fibra na estrutura do provete

Os provetes utilizados nos ensaios foram cortados de uma placa de grandes dimensões e posteriormente foram aplicadas as fibras e resina lateralmente (Figura 3.3). Essa placa principal de grandes dimensões, uma placa de PVC perfurada onde foram aplicadas as fibras, é colocada na mesa de infusão onde está aplicado um desmoldante, uma rede PEEL PLY® e uma rede de infusão perfurada de forma a deixar passar a resina injetada, componentes que também são colocados na parte superior da peça. Após aplicar esses componentes são feitos os canais de vácuo e aplicada uma rede impermeável ficando assim a resina toda na peça. É colocado o tubo espiral de infusão com as respectivas caixas para fixação das mangueiras que injetam a resina no molde. Por fim, é colocado o saco de vácuo por cima e abertos os furos necessários para as mangueiras de alimentação de resina e de vácuo. As laterais do saco e os furos para as mangueiras são isolados através de uma massa vedante, Tacky Tape® (Figura 3.4).

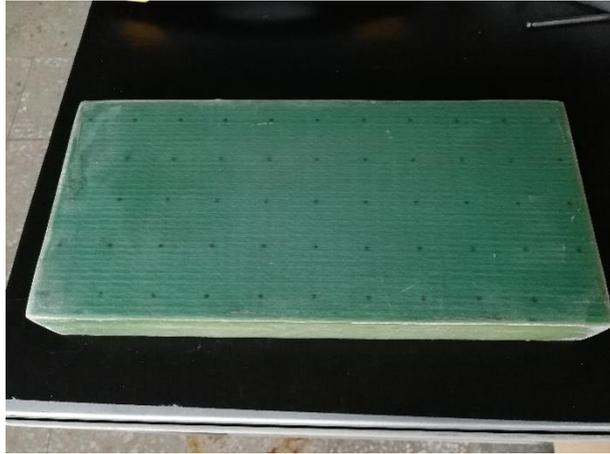


Figura 3.3 – Provetes utilizados



Figura 3.4 - Método de Infusão de Resina; 1) Rede impermeável á resina; 2) PEEL PLY®; 3) Mangueira de vácuo; 4) Tubo espiral de infusão; 5) Caixa de infusão; 6) Mangueira de injeção de resina; 7) Placa de PVC e fibras; 8) Saco de vácuo; 9) Tacky Tape®

Para saber a quantidade de resina que necessita um processo de infusão, recorre-se ao cálculo de quilogramas de resina necessário dependendo dos materiais aplicados. De acordo com o engenheiro responsável por todo o projeto de infusão da lancha salva-vidas, a peça final vai ter uma massa de cerca de 65/70% de fibra e 35/30% de resina. Contudo, para evitar desperdício de resina no processo de fabrico há cálculos a realizar de forma a ser minimizada a massa para o fabrico da peça. Assim, diminui-se o consumo de resina e endurecedor fazendo que não haja desperdício, ou seja custos desnecessários de fabrico. O processo realiza-se em 5 passos essenciais:

1. Verifica-se o peso das fibras e a resina necessária para essas fibras equivale a 50% do peso das fibras.

2. Se for uma infusão com placa PVC, conhece-se a área, o número de furos, o diâmetro e a espessura da placa, logo conhece-se o volume e assim, a partir da densidade da resina calcula-se o peso da resina para preencher esses furos.

3. Dependendo da geometria e das dimensões das peças a injetar resina, pode ter mais ou menos canais de injeção. Sendo assim calcula-se o comprimento (em metros) das mangueiras e dos tubos espirais de injeção aplicados e conseqüentemente o peso correspondente da resina que sobra neles.

4. Também a rede, o PEEL PLY® absorvem resina durante o processo. Assim dependendo do tipo de rede existe consumo de uma certa quantidade de quilogramas por metro quadrado.

5. Por fim soma-se estes parâmetros todos e é possível saber a quantidade de resina necessária para o processo.

Para uma melhor eficiência e melhor aproveitamento de resina o Arsenal do Alfeite recorre a uma máquina Ciject® Injection Equipment (Figura 3.5) que faz a preparação da resina misturada com o endurecedor automaticamente, garantindo assim uma maior segurança para os trabalhadores, não estando expostos a gases voláteis.



Figura 3.5 - Equipamento de mistura de resina

3.2 Requisitos Funcionais

Os requisitos funcionais do equipamento para os ensaios de envelhecimento acelerado por exposição a radiação UV foram definidos tendo em consideração a informação que se pretende obter do ensaio, nomeadamente as falhas e degradação da amostra. Assim é necessário produzir uma câmara que consiga enquadrar alguns parâmetros capazes de reproduzir essas condições em níveis mais elevados. Contudo, também é importante desenvolver um equipamento que consiga ajustar esses parâmetros e fazer um controlo rigoroso nesse aspeto, conseguindo assim manter valores de temperatura, humidade e radiação constantes. Assim, para que uma amostra sofra uma

degradação controlada é necessário respeitar os principais requisitos do envelhecimento, como apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Requisitos do protótipo funcional

Requisito	Descrição
<ul style="list-style-type: none"> Sistema de radiação UV 	<ul style="list-style-type: none"> Lâmpada específica para emissão de radiação UV e o respetivo suporte do tipo R7S.
<ul style="list-style-type: none"> Estrutura isolada para lâmpada 	<ul style="list-style-type: none"> Suporte da lâmpada que tenha um sistema de arrefecimento e que não permita entrada de humidade.
<ul style="list-style-type: none"> Sistema de condensação 	<ul style="list-style-type: none"> Tina instalada dentro da câmara com uma resistência para aquecer água e se realize o ciclo de condensação.
<ul style="list-style-type: none"> Suporte da amostra 	<ul style="list-style-type: none"> Suporte que permita rotação da amostra para posição ideal para cada ciclo.
<ul style="list-style-type: none"> Condições de envelhecimento controláveis 	<ul style="list-style-type: none"> Para um controlo das condições de temperatura é necessário a introdução de equipamentos que permitam o arrefecimento da câmara.
<ul style="list-style-type: none"> Sensores 	<ul style="list-style-type: none"> Introdução de sensores que consigam ler temperaturas, humidade e nível de água da tina. Tanto para registo de dados como para controlo de condições.
<ul style="list-style-type: none"> Equipamento autónomo 	<ul style="list-style-type: none"> O protótipo tem de funcionar de forma autónoma recorrendo a sensores, relés e um sistema que consiga controlar esses componentes.
<ul style="list-style-type: none"> Custo reduzido 	<ul style="list-style-type: none"> O protótipo deve utilizar componentes já existentes e dessa forma simplificar a produção e baixar os custos de fabrico.

3.3 Conceção do equipamento

A criação deste protótipo tem como objetivo principal criar um ambiente favorável para a degradação de uma amostra de um compósito de matriz polimérica quando exposta a radiação UV. As paredes da câmara foram todas revestidas por fita de alumínio de forma a poder refletir toda a radiação UV emitida pela lâmpada e assim intensificar a radiação incidente na amostra. Também a componente térmica foi considerada e foram instaladas ventoinhas para controlo da temperatura interior da câmara visto a lâmpada usada nos ensaios fornecer calor suficiente para aquecer o ambiente interior da câmara. A lâmpada foi inserida numa estrutura com um vidro temperado e totalmente isolada da humidade resultante dos ciclos de condensação para evitar corrosão nos contactos e evitar a falha da lâmpada.

Para a realização dos ciclos de condensação foi necessária a introdução de uma tina de água com uma resistência e foi importante garantir que todos os componentes estavam protegidos da humidade resultante desse processo.

Os instrumentos responsáveis pela medição de temperatura, humidade e o nível de água foram instalados na câmara em locais estratégicos de forma a garantir a correta leitura. Com esses sensores foi possível controlar a temperatura interior da câmara, ligando as ventoinhas sempre que necessário, a humidade e o nível de água, sendo a reposição garantida através de um depósito exterior com uma bomba de água.

Fixo à estrutura da câmara foi inserido um suporte para a amostra a envelhecer. Este suporte tem a possibilidade de rotação da amostra feita através de um motor passo a passo, tornando possível direcionar a amostra para a posição ideal em cada ciclo.

Todo o processo é controlado eletronicamente através de um Arduino® onde é feito o controlo da temperatura, ligando e desligando as ventoinhas, o controlo do nível de água, e a gestão dos ciclos de radiação UV e condensação.

3.4 Protótipo funcional

Após identificados os requisitos funcionais do protótipo funcional começou-se a modelação 3D da câmara no programa SolidWorks® (Figura 3.6 e Figura 3.7). O desenvolvimento deste protótipo divide-se em vários subsistemas, sendo eles a estrutura da câmara, o suporte rotativo da amostra, o sistema de radiação UV, o sistema de condensação e o sistema de controlo. Todos estes subsistemas do protótipo tiveram ao longo de todo o processo de desenvolvimento alterações ao projeto inicial, consequência de alguns erros ou mesmo soluções pouco eficientes da proposta original. Em todos eles foram aplicadas soluções simples e eficazes de forma a prevalecer um sistema fiável e de baixo custo. Algumas peças foram criadas a partir de impressão 3D, utilizando o equipamento Ultimaker®. Contudo, devido ao facto de a temperatura interior da câmara ser elevada, alguns componentes necessitaram de ser substituídos por peças de alumínio, nomeadamente a peça de aperto da amostra, as caixas dos rolamentos e as polias.

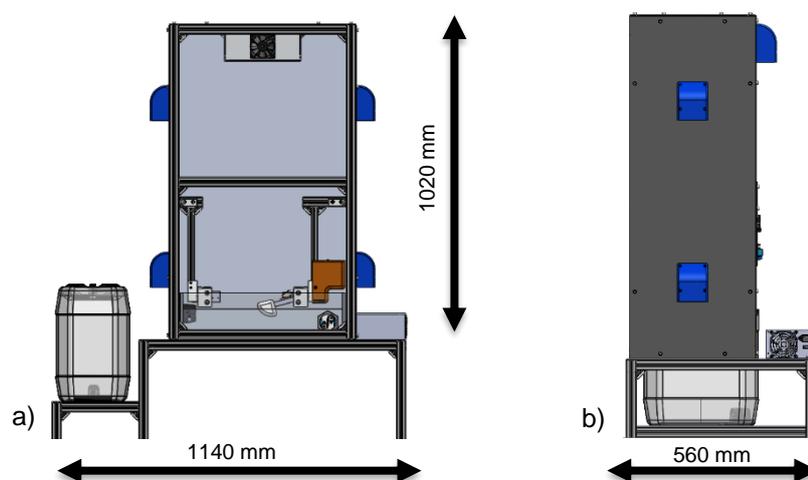


Figura 3.6 – Cotas de atravancamento do protótipo funcional; a) vista frontal; b) vista lateral



- 1) Sistema de radiação
- 2) Ventoinhas para dissipação de calor
- 3) Motor passo a passo
- 4) Resistência para aquecer a água
- 5) Sensor de nível de água
- 6) Depósito exterior de água

Figura 3.7 - Modelação 3D do protótipo funcional

3.4.1 Projeto e produção do protótipo funcional

A estrutura da câmara foi produzida inteiramente por perfis Bosch Rexroth® com os respetivos acessórios de montagem, ligações aparafusadas fornecendo bons ajustamentos (Figura 3.8). Sendo um perfil de alumínio, um material leve e de boa durabilidade, consegue fornecer uma boa robustez e ao mesmo tempo resistência à degradação UV, possuindo ainda facilidade de montagem.

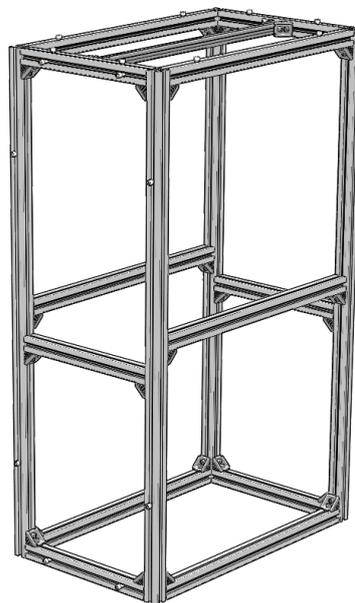


Figura 3.8 – Estrutura da câmara em perfil Bosch Rexroth® de 30x30 mm

O perfil utilizado para a estrutura exterior foi o de 30x30 mm, mas para o suporte do sistema de rotação e do sistema de iluminação foi utilizado o perfil de 20x20 mm. Assim, de modo a ser possível a montagem dos dois perfis de espessura diferentes foi necessária a adaptação de alguns

acessórios de montagem, nomeadamente os “L” do perfil de 30x30 mm, onde as guias tiveram de ser mais estreitas de forma a encaixar no perfil de 20x20 mm.

Para fechar a câmara, ou seja, para as paredes, foi escolhido um polímero canelado. É um material de baixo custo, resistente, de fácil manuseamento e bastante leve. Consegue-se assim isolar a câmara de modo a que não se perca radiação UV essencial para o envelhecimento, mas também pela segurança em isolar essas radiações para o utilizador. Contudo, como é de cor negra, e para ser mais eficiente, na face interior de cada parede foi colada fita de alumínio. Essa fita de alumínio vai garantir que a parede não se deteriora com a radiação e com o calor, mas principalmente vai refletir parte da radiação UV vinda da lâmpada. As paredes têm furos de 70 mm de diâmetro para acoplar quatro ventoinhas para a realização de arrefecimento da câmara (Figura 3.9).

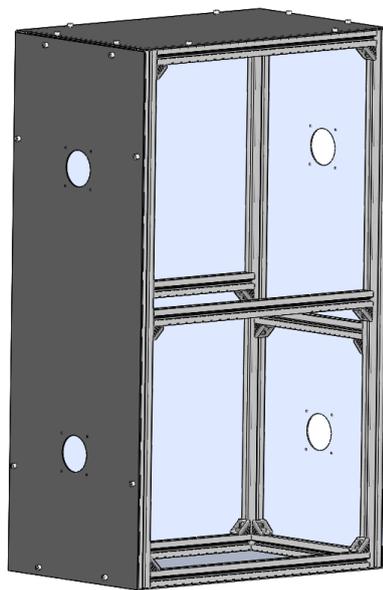


Figura 3.9 – Paredes da câmara em polímero canelado revestido interiormente com fita de alumínio, (faltando apenas a parte frontal da câmara)

3.4.2 Suporte rotativo

Para uma melhor posição de exposição à radiação e à condensação optou-se por um sistema que se adaptasse a cada um dos ciclos. Desenvolveu-se um sistema rotativo acionado por um motor passo a passo através de duas polias e uma correia, tudo controlado por um driver PIBot® conectado ao Arduino® Mega, esse responsável pelo controlo da rotação, isto é, pela velocidade de rotação e principalmente pela posição de paragem para cada ciclo (Figura 3.10).

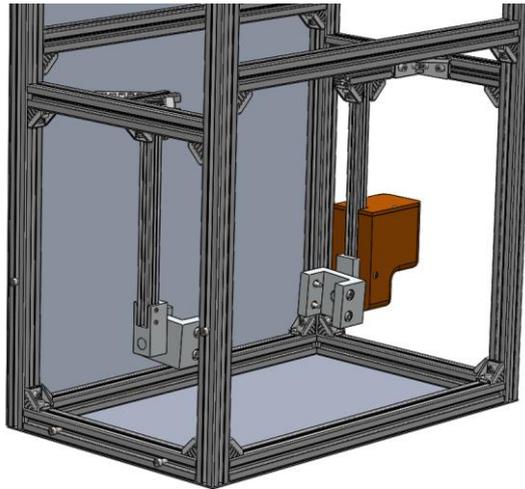


Figura 3.10 – Suporte rotativo

Para a construção do suporte rotativo recorreu-se também a perfil Bosch Rexroth® de 20x20 mm. Foi necessário desenvolver uma forma de fixar a amostra sendo modeladas em SolidWorks®. Inicialmente as peças (1) e (2) da Figura 3.11, foram projetadas e feitas através de impressão 3D, mas devido à temperatura interior da câmara, cerca de 55 °C, foram substituídas por peças de alumínio maquinadas na fresadora no Laboratório de Tecnologia Industrial do DEMI.

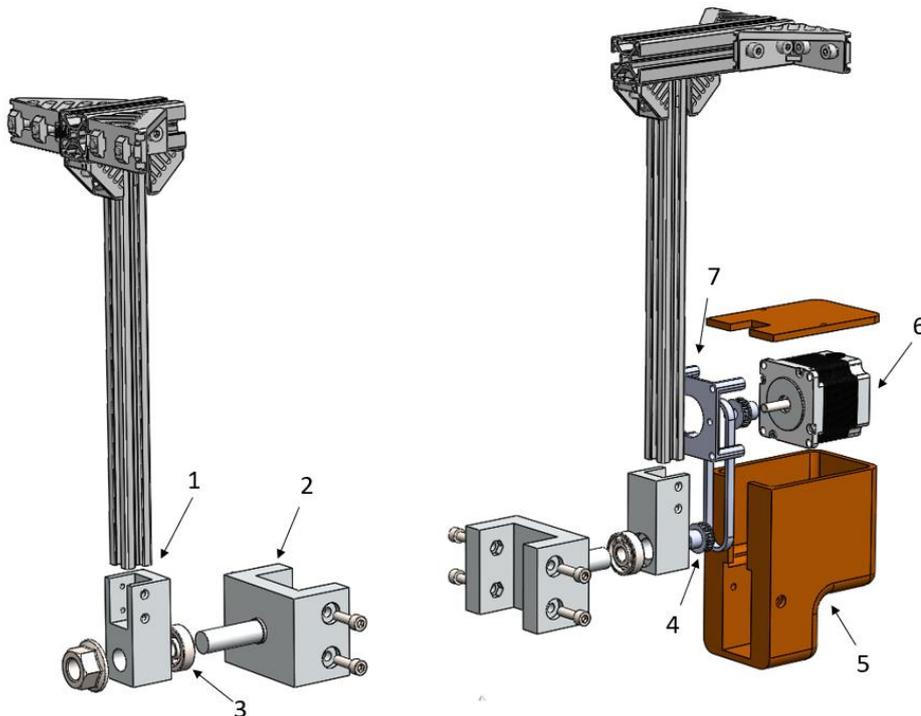


Figura 3.11 – Sistema rotativo da amostra; 1) Peça de encaixe no perfil de 20 mm; 2) peça de aperto da amostra; 3) Rolamentos; 4) Polias; 5) Caixa de proteção; 6) Motor passo a passo; 7) Suporte do motor

Também as polias tinham sido impressas em PLA, mas pela mesma razão enunciada atrás, foram substituídas por polias metálicas usadas na montagem de impressoras, possuindo 20 dentes para o veio do motor de 6 mm, e 36 dentes para o veio de 8 mm do suporte da amostra. A correia utilizada para transmitir o movimento possui 6 mm de largura e 200 mm de perímetro.

Foi aplicado um motor passo a passo de modelo Nema 23, controlado pelo driver Stepper-Motor-Driver-Rev2.2 do fabricante PIBot®, sendo alimentado por uma fonte de tensão de 12 V que fornece uma corrente máxima de 3.5 A. O motor é comandado através de uma placa de Arduino® de modelo Mega 2560.

Devido ao facto de haver ambientes severos de humidade e de radiação UV dentro da câmara, desenhou-se e produziu-se uma peça, impressa em PLA na impressora 3D, para proteger o motor dessas condições. Essa peça encontra-se representada na Figura 3.11 (5).

Este suporte foi projetado de forma a poder ser ajustado em altura, ou seja, capaz de definir a distância entre a lâmpada e a amostra, sendo a altura ideal para este tipo de lâmpadas cerca de 700 mm. Consegue suportar uma amostra com comprimento total de 350 mm e com 40 mm de espessura, sendo que a largura pode variar, dependendo da altura a que esteja o suporte, podendo variar entre 50 e 300 mm.

3.4.3 Sistema de radiação UV

Para o sistema de radiação UV tentou-se aplicar um tipo de lâmpada que fosse mais compacta que as que são normalmente utilizadas nas câmaras existentes no mercado. As lâmpadas mais utilizadas são do tipo incandescentes e a lâmpada que se aplicou neste protótipo é uma lâmpada de alta pressão. Este tipo de lâmpada consegue ser mais compacta, ou seja, de menores dimensões, mas ao mesmo tempo também consegue grande intensidade de radiações.

Foi utilizada uma lâmpada Osram® HTC400-241 com potência nominal de 460 W e uma tensão de 230 V, potência de radiação UVA, com comprimento de onda entre 315-400 nm, de 82 W, e potência de radiação UVB, com comprimento de onda entre 280-315 nm, de 12 W (Figura 3.12a). Foi ainda necessária a utilização de um balastro HYDROFARM® Xtrasun de 400 W, 230 V e 50 Hz (Figura 3.12b).

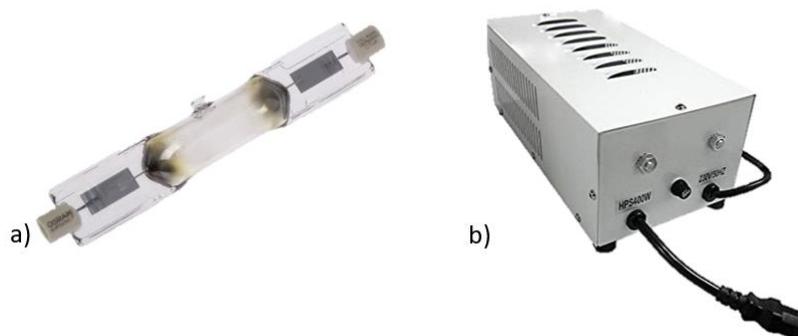


Figura 3.12 – a) Lâmpada Osram® HTC 400-241; b) Balastro Xtrasun 400W e 230V

O tipo de montagem da lâmpada é o R7s, um suporte bastante utilizado na iluminação exterior nomeadamente em focos halogéneos. Como a lâmpada possui um comprimento de 104 mm, não se encontrou disponível um suporte para esse comprimento. Assim, optou-se por um suporte individual aparafusado de forma a se poder criar uma estrutura para o comprimento ideal. Através de perfil Bosch Rexroth® de 20x20 mm, criou-se esse suporte para a montagem da lâmpada. Inicialmente foi definida uma distância da lâmpada até à amostra muito curta, cerca de 200 mm, e por isso ocorreram alguns problemas na amostra (Figura 3.13a). A lâmpada atinge temperaturas elevadas, cerca de 400 °C e por estar demasiado próxima da amostra a envelhecer, o calor provocou algumas bolhas na amostra de teste, como se pode verificar na Figura 3.13b. Neste teste a temperatura da placa rondou os 100 °C, ultrapassando o limite máximo da temperatura da resina e do PVC.

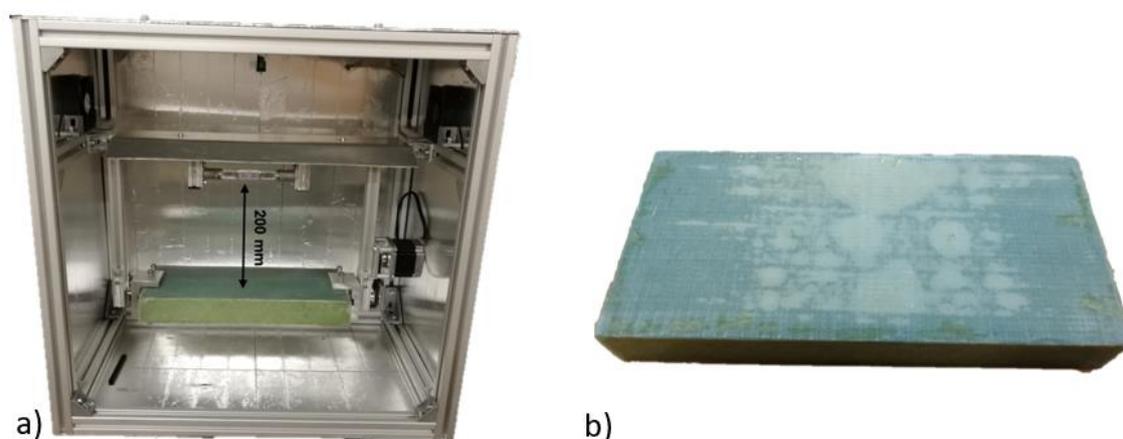


Figura 3.13 – Suporte inicial da lâmpada; a) distância de 200 mm entre lâmpada e amostra; b) Bolhas provocadas pelo excesso de temperatura

Devido a este resultado, teve de se fazer alterações nas dimensões do protótipo de forma a colocar-se a lâmpada à altura ideal para o ensaio. Após alguns ensaios, verificou-se que a altura ideal seria de cerca de 700 mm. Esses ensaios basearam-se em aumentar a distância da lâmpada e ao mesmo tempo controlar a temperatura superficial da amostra de forma a não se aproximar da temperatura máxima admissível do compósito. Sabendo também que este tipo de lâmpada é usado em solários portáteis para utilização humana, procurou-se saber a distância recomendada para utilização desses solários com segurança para a pele, e verificou-se que a distância recomendada ronda os mesmos valores.

Como se pode verificar pela Figura 3.13a, o suporte da lâmpada não continha qualquer proteção contra a humidade e condensação na câmara durante os ensaios. Deste modo, após 72 horas de ensaios cíclicos de radiação UV com condensação de água destilada, quatro horas cada, fundiu-se a primeira lâmpada. Não se identificou nesse momento o problema e montou-se uma segunda lâmpada, que apenas durou 48 horas. Após a segunda lâmpada fundir, verificou-se que a condensação estava a provocar esse problema, não por causa da lâmpada ficar molhada, mas sim pelos contactos da lâmpada e do suporte oxidarem. Percebeu-se que a oxidação no suporte iria

continuar a piorar e assim continuaria a fundir lâmpadas. Como se pode verificar pela Figura 3.14 as lâmpadas partiam as cerâmicas no ponto de contacto com o suporte.

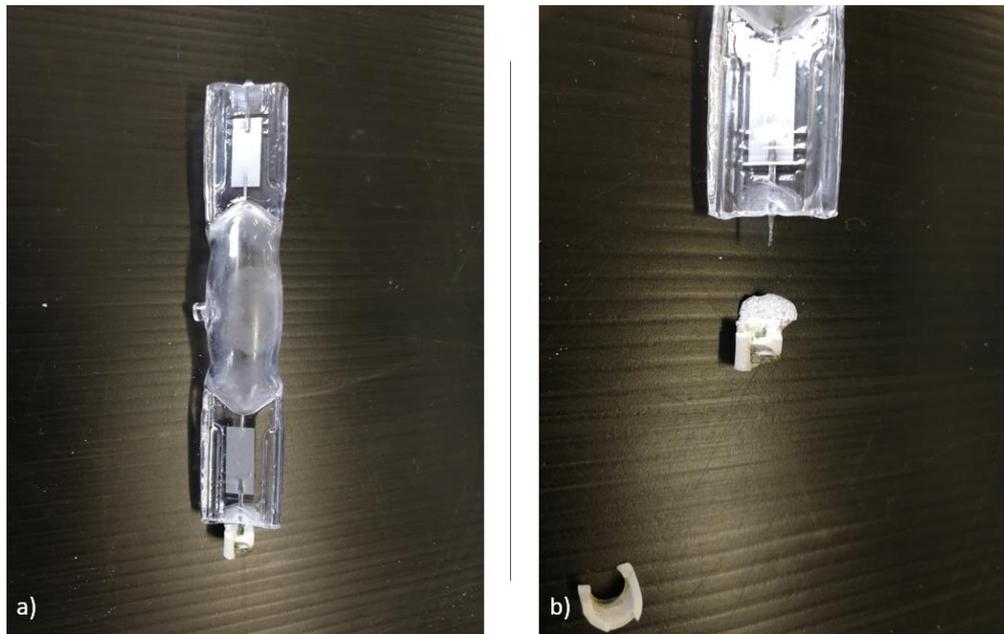


Figura 3.14 – Lâmpada danificada; a) contactos partidos; b) cerâmica estalada

De forma a prevenir que ocorresse oxidação nos contactos da lâmpada e do suporte, teve de se isolar o suporte dentro da câmara. Para garantir que não entrasse humidade, fez-se uma caixa de perfil Bosch Rexroth® 20 x 20 mm, e fecharam-se as laterais e um dos topos com placas de alumínio. Na parte de baixo, colocou-se um vidro temperado com 5 mm de espessura capaz de suportar as temperaturas elevadas da lâmpada. Foi também colocado um sistema de refrigeração da caixa através de um tubo de alumínio ligado ao exterior da câmara e auxiliado por uma ventoinha (Figura 3.15).

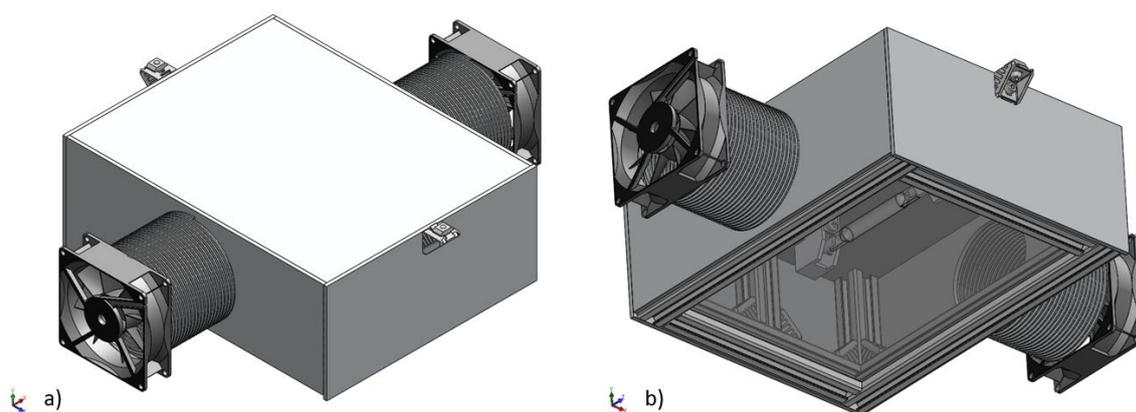


Figura 3.15 – Caixa do suporte da lâmpada; a) Vista superior; b) Vista inferior

Com a ajuda de um vedante de altas temperaturas, conseguiu-se uma caixa praticamente estanque à humidade e com esta solução melhorar o tempo de vida útil da lâmpada. Contudo teve como ponto negativo a temperatura da lâmpada não aquecer a câmara tanto quanto se esperava,

mas mesmo assim a câmara atinge facilmente os 50 °C, temperatura ideal para os ensaios que se vão realizar. Também a utilização do vidro temperado pode ter o efeito de filtro e impedir a passagem parcial de alguma radiação UV, sendo necessário no desenvolvimento futuro do equipamento encontrar uma solução mais eficaz, mas ainda assim aliado a capacidade de suportar altas temperaturas da lâmpada. O esquema do sistema elétrico desenvolvido relativo à radiação encontra-se ilustrado na Figura 3.16.

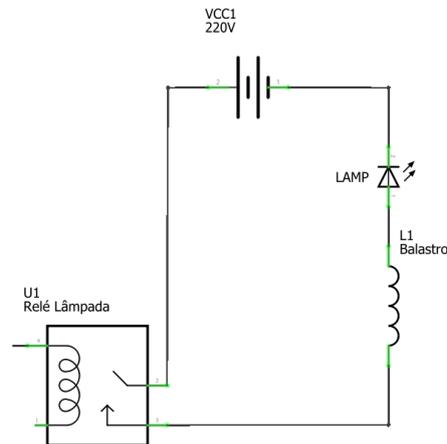


Figura 3.16 – Sistema elétrico desenvolvido para o sistema de radiação

3.4.4 Sistema de condensação

Para a realização dos ciclos de condensação foi necessário desenvolver um sistema simples e eficaz que conseguisse corresponder às normas existentes. Este sistema deveria suportar água a temperaturas entre os 50 °C e os 80 °C e por isso optou-se por uma tina de acrílico com espessura de 8 mm e de dimensões 530x300x150 mm. Sendo a tina a peça principal do sistema de condensação, todas as restantes peças e acessórios para a realização desse ciclo foram aplicados na tina e algumas desenvolvidas especificamente.

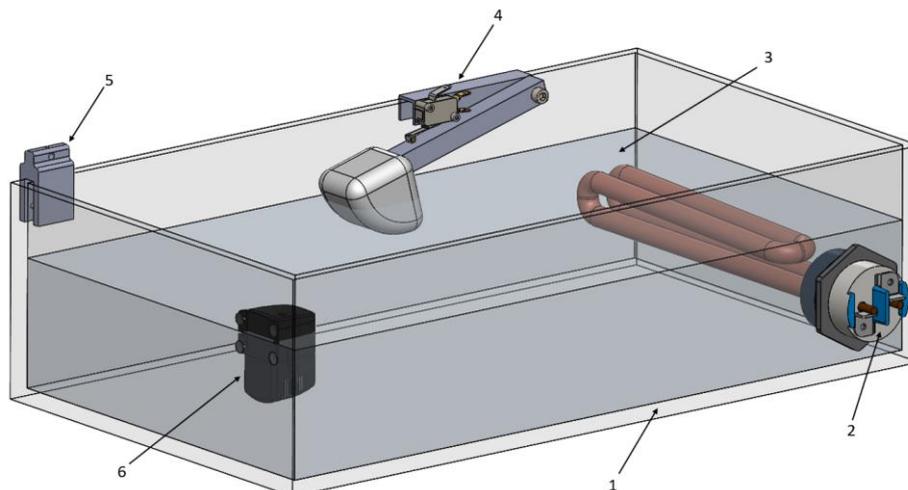


Figura 3.17 – Sistema de condensação; 1) Tina de acrílico; 2) Resistência; 3) Água destilada; 4) Sensor de nível de água; 5) Suporte do tubo de controlo de nível de água; 6) Bomba de oscilação da água

O aquecimento da água na tina é realizado através de uma resistência habitualmente usada em termoacumuladores. Esta resistência é controlada por um termostato analógico aplicado na estrutura, que pode ser afinado para garantir uma temperatura constante na água que seria um requisito a ser cumprido.

Para haver o aquecimento de todo o volume de água de forma rápida e o mais uniforme possível, colocou-se uma bomba de água para provocar agitação e assim distribuir uniformemente a temperatura da água. Esta necessidade surgiu pelo facto de inicialmente se encontrarem diferenças de temperatura em várias zonas da tina. Essa agitação é feita através de uma bomba, por exemplo como as utilizadas nos aquários, AQUATLANTIS® EasyFlux® 300. Esta bomba de água possui 5 W de potência e um fluxo máximo de 310 l/h.

Com a condensação da água da tina é normal o nível de água baixar e por isso foi importante controlar autonomamente o nível de água para não permitir que a resistência emergisse da água. Inicialmente procurou-se uma solução mais tecnológica e por isso fez-se a tentativa com um sensor de nível de água capaz de se conectar ao Arduino®. Esse sensor, Velleman® VMA 303, quando em contacto com a água emite um sinal analógico para o Arduino® e assim é possível perceber qual será o nível de água existente na câmara. Contudo devido à temperatura da água na tina verificou-se uma grande oxidação e degradação dos contactos e conseqüentemente erros de leitura, conduzindo em alguns casos falhas de água bem como o enchimento em excesso na tina. A degradação do sensor pode ser observada na Figura 3.18.

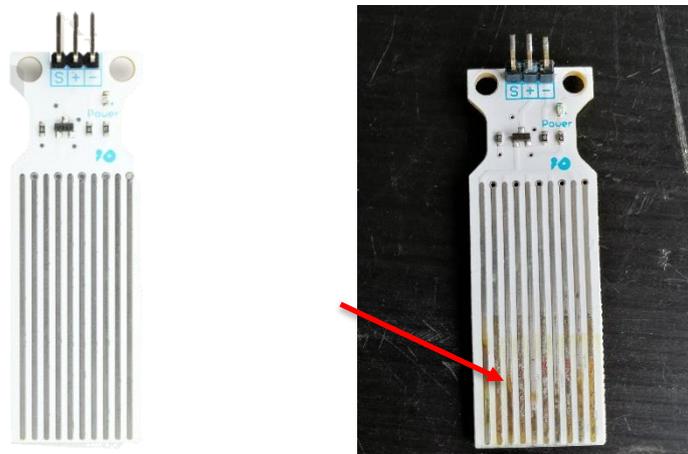


Figura 3.18 – Degradação do sensor de humidade

Como a solução anterior não se apresentou eficaz, desenvolveu-se um sensor de nível de água independente do Arduino® e totalmente autónomo. Optou-se por um sensor *micro switch* acionado por um braço com uma bóia. Assim quando nível de água baixa o *micro switch* fecha o circuito de uma tomada de 12 V que comanda um relé, que esta em posição de normalmente aberto, passe para a posição de normalmente fechado e assim fechar o circuito elétrico da bomba colocada no deposito exterior á câmara, que vai colocar água na tina até que a boia suba e abra o circuito do *micro switch* e assim desligar a bomba. Este sistema está representado na Figura 3.17 (4), e ilustrado na Figura 3.19. Nas Figura 3.20 e Figura 3.21 apresentam-se os esquemas dos sistemas

elétricos desenvolvidos para o sistema de condensação e para o sensor de nível de água, respetivamente.

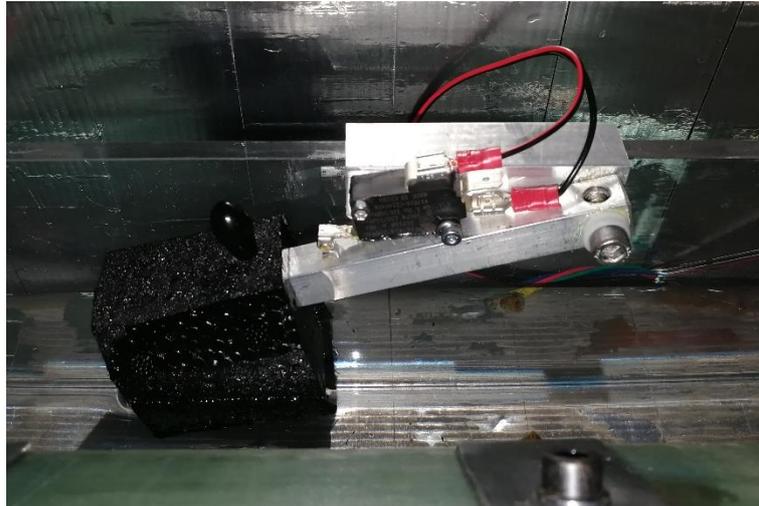


Figura 3.19 – Sensor de nível de água

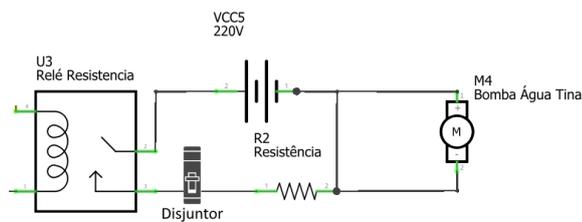


Figura 3.20 – Sistema elétrico do sistema de condensação

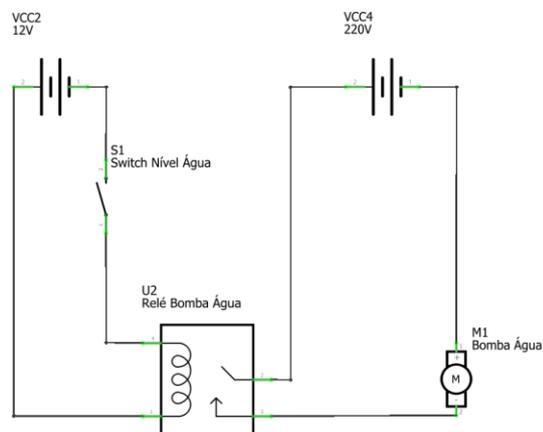


Figura 3.21 – Sistema elétrico do sensor de nível de água

3.4.5 Sistema de controlo

Para o controlo autónomo do protótipo recorreu-se a um sistema Arduino®. Este é um sistema bastante eficiente no que respeita ao controlo eletrónico de equipamentos, tendo como principal vantagem o seu baixo custo. Sendo um sistema de código aberto (*open source*), é um sistema que pode ser aplicado por qualquer pessoa ou empresa sem custos de direitos de autor. Tem havido um grande desenvolvimento desta plataforma, nomeadamente ao nível de *hardware* compatível com as

placas. Com o Arduino® é possível enviar e receber informações de um sistema eletrônico e, por exemplo, controlar relés e ao mesmo tempo recolher leituras de temperatura através de um sensor.

O objetivo do protótipo é o funcionamento, de forma cíclica, de duas condições extremas de envelhecimento, a radiação UV e a condensação. Para tal, utilizou-se um módulo de relés compatíveis com o Arduino®, nomeadamente um conjunto de dois relés Funduino® onde a carga máxima suportada é 10 A por relé e a voltagem de cada bobine é 5 VDC. No Arduino® define-se o intervalo de tempo que se pretende em cada ciclo, em milissegundos. Os relés foram ligados no estado de normalmente aberto e o sinal proveniente do Arduino®, indicando o início desse ciclo, fecha o relé e conseqüentemente fecha o circuito elétrico que dá energia ao sistema de radiação ou ao sistema de condensação.

Como foi referido no ponto 3.4.2, o motor passo a passo também vai ser controlado pelo Arduino®, que emite um sinal para o *driver* PiBot® que aciona o motor. A posição inicial da amostra é horizontal, perpendicular à radiação proveniente da lâmpada, que é o primeiro ciclo de todo o processo. Quando há mudança de ciclo, o motor vai rodar para a posição ideal para cada ciclo, ou seja, assim que termina o ciclo de radiação UV, o Arduino® emite um sinal para o *driver* controlador do motor passo a passo para rodar a amostra para um ângulo de 60° em relação à superfície da água. Depois de terminar o ciclo de condensação o Arduino® emite novamente um sinal contrário ao *driver* e o motor roda até a posição inicial.

Foram colocados no protótipo sensores de temperatura e de humidade para o seu controlo durante os ensaios. Inicialmente, antes da utilização da caixa estanque da lâmpada, verificaram-se valores de temperatura muito elevados e por isso colocaram-se 4 ventoinhas para fazer baixar a temperatura. Contudo, após a colocação da lâmpada na caixa estanque a temperatura dentro da câmara estabilizou em cerca 50 °C. O sensor de temperatura usado, Velleman® VMA 320, é basicamente um termistor do tipo NTC-MF52 3050, capaz de ler temperaturas entre -55 °C e 125 °C, que emite um sinal analógico para Arduino® (erro ± 0.5 °C). O sensor utilizado para a leitura de humidade, Velleman®DHT11, emite um sinal digital e consegue ler humidade relativa entre os 20 e os 90 %.

Como é importante a recolha dos dados lidos pelos sensores de temperatura, humidade, nível de água e o número de ciclos que a amostra esteve sujeita, foi instalado no sistema um módulo *shield* de carregamento de dados para um cartão SD, Velleman®VMA304, para expandir a memória do Arduino®, bastante limitada, até 2 Gb.

O sistema elétrico desenvolvido para o sistema de controlo encontra-se representado esquematicamente na Figura 3.22.

emitidos de e para o Arduino® são registados num cartão SD. A vista geral do protótipo funcional desenvolvido está apresentada na Figura 3.23. As Figuras Figura 3.24, Figura 3.25 e Figura 3.26 ilustram, respetivamente, o interior do protótipo funcional, o sistema de radiação e o sistema de condensação, com indicação dos respetivos componentes.



Figura 3.23 – Vista geral do protótipo funcional para realização de envelhecimento acelerado



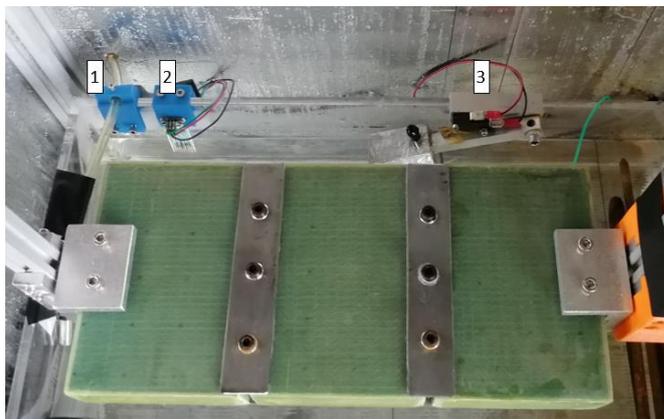
- 1) Placa de amostra do casco da lanca salva-vidas
- 2) Suporte da placa
- 3) Motor passo a passo com a respetiva proteção de PLA
- 4) Resistência para aquecer a água
- 5) Terra
- 6) Tina de acrílico com água destilada
- 7) Bomba de água para oscilação
- 8) Sistema de arrefecimento
- 9) Sensor de humidade e temperatura

Figura 3.24 – Protótipo Funcional



- 1) Lâmpada de alta pressão
- 2) Vidro temperado
- 3) Sistema de arrefecimento da lâmpada
- 4) Sistema de arrefecimento da câmara

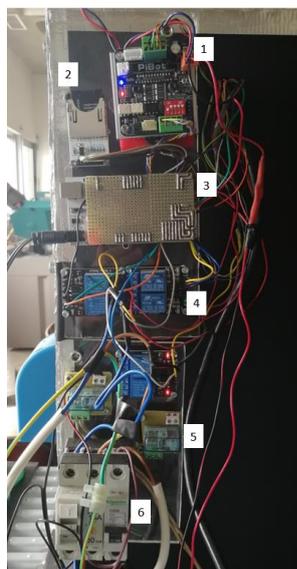
Figura 3.25 – Sistema de radiação



- 1) suporte do tubo de enchimento da tina
- 2) Sensor de nível de água eletrônico (substituído pelo sensor 3)
- 3) sensor de nível de água acionado por *micro switch*

Figura 3.26 – Sistema de condensação

No sistema de controlo (Figura 3.27), a placa de Arduino® Mega 2560 é alimentada por uma fonte de tensão de 9 V e os restantes componentes por uma fonte de tensão de 12 V, nomeadamente as ventoinhas, o relé da bomba de nível de água e o *driver* do motor passo a passo PiBot®. A Figura 3.28 corresponde à representação esquemática do sistema elétrico do protótipo funcional.



- 1) Driver do motor passo a passo
- 2) Leitor de cartão SD
- 3) Arduino®
- 4) Módulos de relés
- 5) Relés de 12 V
- 6) Disjuntores

Figura 3.27 – Sistema de controlo

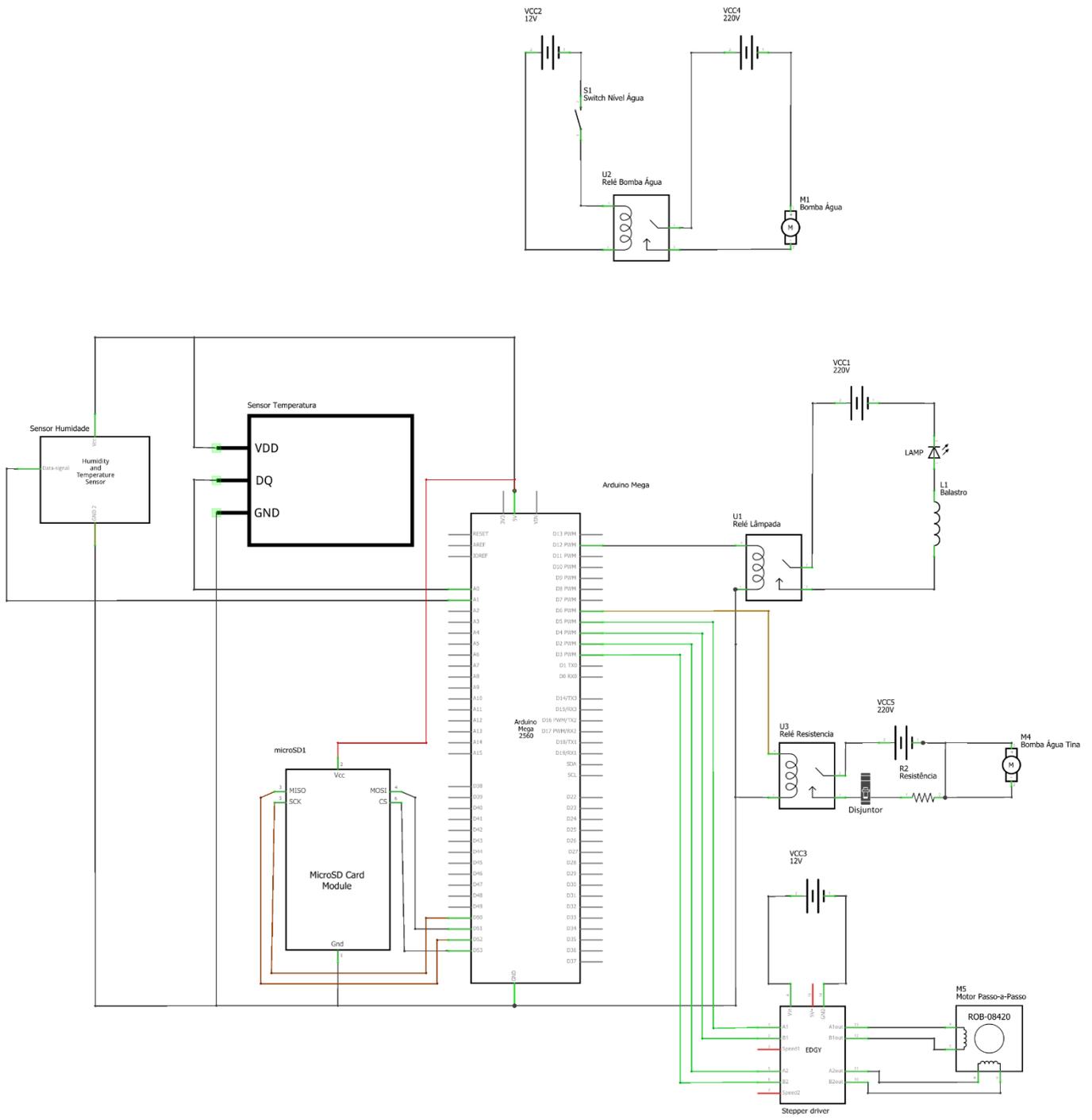


Figura 3.28 – Sistema elétrico do protótipo funcional

4 Validação do protótipo funcional

Neste capítulo descrevem-se os procedimentos laboratoriais relativos ao uso do protótipo funcional e todos os seus componentes eletrónicos de forma a validar o seu funcionamento.

Inicialmente foram feitos ensaios ao sistema de radiação e o seu arrefecimento, ensaios ao sistema de condensação e a ensaios cíclicos combinado de ambos os sistemas. Por último, foram realizados ensaios a amostras do casco da lancha salva-vidas produzida no Arsenal do Alfeite, em ciclos combinados de forma a poder validar o funcionamento da câmara, que é simular o envelhecimento sobre radiação UV.

4.1 Ensaios ao sistema de radiação

Para a realização destes ensaios considerou-se como principal fator a temperatura que a lâmpada poderia fornecer ao protótipo, para não influenciar o ensaio nem permitir valores potencialmente perigosos, por ser uma lâmpada que atinge altas temperaturas. Para a leitura dessa temperatura foi utilizado a um sensor de temperatura. O monitor de série do Arduino® regista os dados no cartão SD em formato “.txt”, como referido no ponto 3.5.5.

Será de realçar que nestes ensaios a lâmpada não tinha qualquer isolamento para a humidade proveniente da condensação. Assim, o efeito da temperatura da lâmpada na temperatura da câmara era muito maior do que na solução final do protótipo. Verificou-se que a lâmpada, não estando isolada, permitia um rápido acréscimo da temperatura da câmara até um valor máximo de cerca de 70 °C, demasiado elevado para o ensaio pretendido e também para a fiabilidade de alguns componentes.

Neste ensaio, de 4 h em exposição à radiação UV, o Arduino® controlou a temperatura entre os 45 °C e os 50 °C, através das leituras do sensor de temperatura e do relé que aciona as ventoinhas de arrefecimento. Este facto pode observar-se no gráfico da Figura 4.1.

Através da análise do gráfico é possível observar que a temperatura aumentou até 50 °C em aproximadamente 40 min. Após esse máximo verifica-se uma descida quase instantânea de temperatura até aos 45 °C, que se deve ao sistema de arrefecimento do protótipo, ao ligar as ventoinhas. Assim que atinge os 45 °C o relé abre novamente e as ventoinhas param, fazendo que a temperatura volte a subir novamente até atingir o máximo de temperatura programada no Arduino®. Deste modo, garante uma temperatura que se pode considerar constante no protótipo, podendo ser programado facilmente o intervalo de temperatura desejado.

Pelo gráfico da humidade relativa dentro do protótipo pode verificar-se que existe uma descida da humidade até estabilizar a cerca de 16%, o que seria de esperar devido à radiação e ao aumento da temperatura.

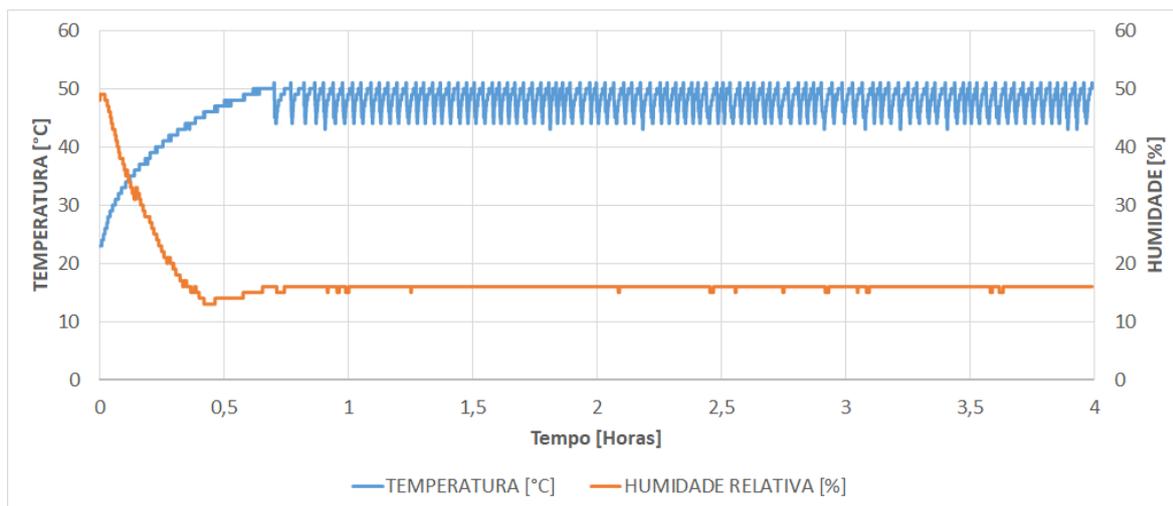


Figura 4.1 – Ciclo de radiação (lâmpada não isolada)

Para prolongar o tempo de vida da lâmpada, esta foi colocada numa caixa totalmente isolada com o seu próprio sistema de arrefecimento. De facto, verificou-se que a condensação estava a provocar corrosão nos contactos da lâmpada com o suporte. Apesar de a durabilidade da lâmpada ter aumentado, e o sistema se tornar mais fiável e estável, a capacidade de aumento da temperatura do protótipo diminuiu, passando a temperatura máxima a assumir valores de cerca de 50 °C. Apesar de a temperatura do protótipo não aumentar tanto quanto desejado, os valores de temperatura medidos dentro do protótipo são perfeitamente aceitáveis para a realização do ensaio de envelhecimento.

No gráfico ilustrado na Figura 4.2, relativo ao ciclo de radiação com lâmpada isolada, observa-se que existiu a diminuição da temperatura máxima quando comparado com o gráfico da Figura 4.1. Sendo que a temperatura nunca atingiu o máximo definido no código do Arduino®, consegue-se perceber pela interpretação do gráfico que as ventoinhas nunca funcionaram. No entanto, verifica-se que atingiu uma temperatura constante no ciclo de 4 horas, o que é um ponto importante neste tipo de ensaios.

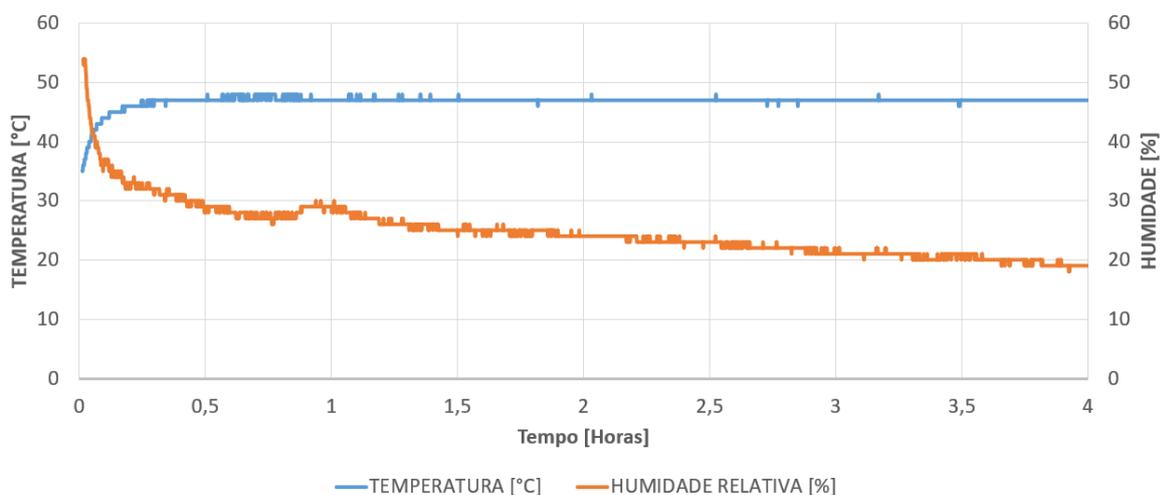


Figura 4.2 – Ciclo de radiação (com lâmpada isolada)

Será de realçar que este ensaio foi realizado logo após um ensaio de condensação, pelo que a humidade relativa inicial do ciclo é mais elevada. É por isso que se nota uma descida da humidade. Contudo, a humidade decresce gradualmente após o aumento de temperatura por radiação.

4.2 Ensaios de condensação

O sistema de condensação, como foi referido no ponto 3.5.4, tem como elemento principal uma resistência de potência de 2 kW. Essa resistência é controlada analogicamente por um termostato (Figura 4.3). Para realizar a regulação do termostato, garantindo que a água atinja a temperatura desejada, realizaram-se ensaios preliminares de medição da temperatura através de um termopar (Figura 4.4).

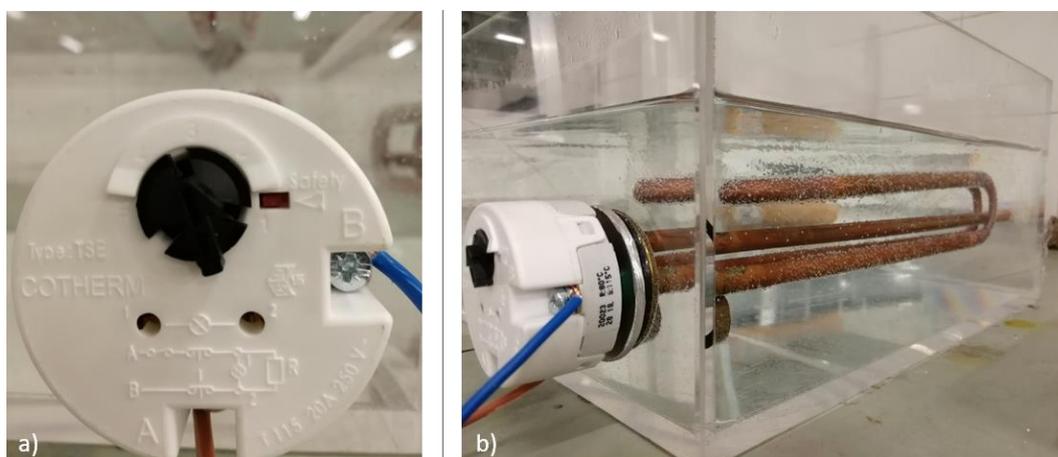


Figura 4.3 - Termostato e resistência; a) regulador analógico do termostato; b) convecção de calor

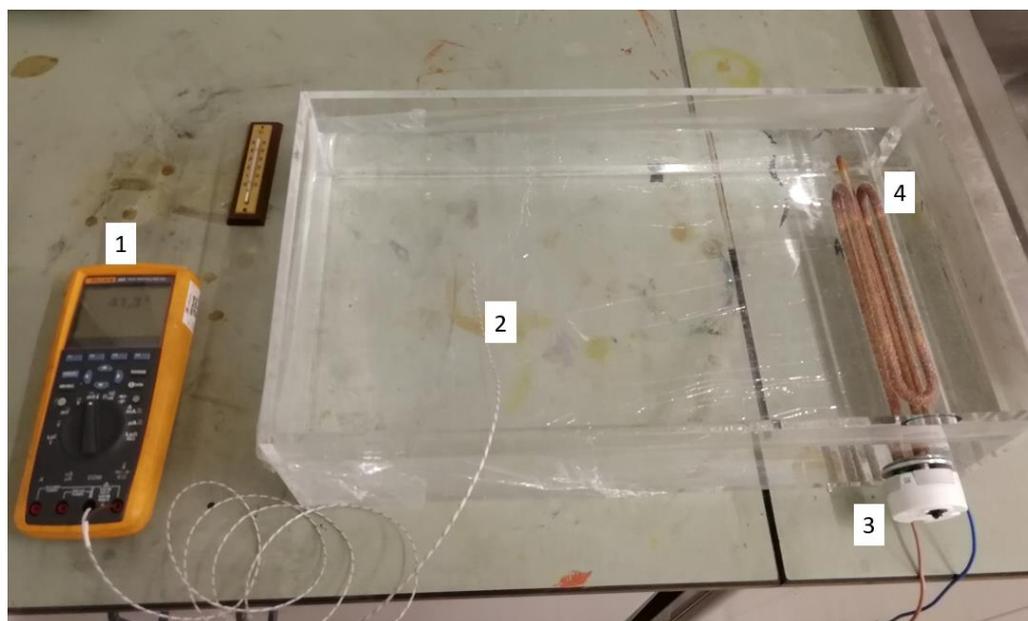


Figura 4.4 - Calibração do termostato; 1) Multímetro; 2) Termopar; 3) Termostato; 4) Resistência

Após calibrado o termostato da resistência verificou-se que a convecção criada pela mesma não era suficiente para o aquecimento de todo o volume de água da tina, verificando-se existir

diferenças de temperatura em pontos diferentes na tina. De forma a resolver esse problema colocou-se uma bomba de água submersa. Essa bomba vai criar corrente e assim agitar a água para distribuir a temperatura da água de igual forma pela tina. O sensor de nível de água controlado pelo *micro switch* foi testado e verificou-se que havia um bom funcionamento do mesmo de forma manter o nível de água acima do valor mínimo.

O ensaio de condensação foi realizado após um ensaio de radiação. A finalidade deste ensaio era entender se o sistema de condensação tinha capacidade de aumentar a humidade dentro do protótipo para a amostra ficar húmida.

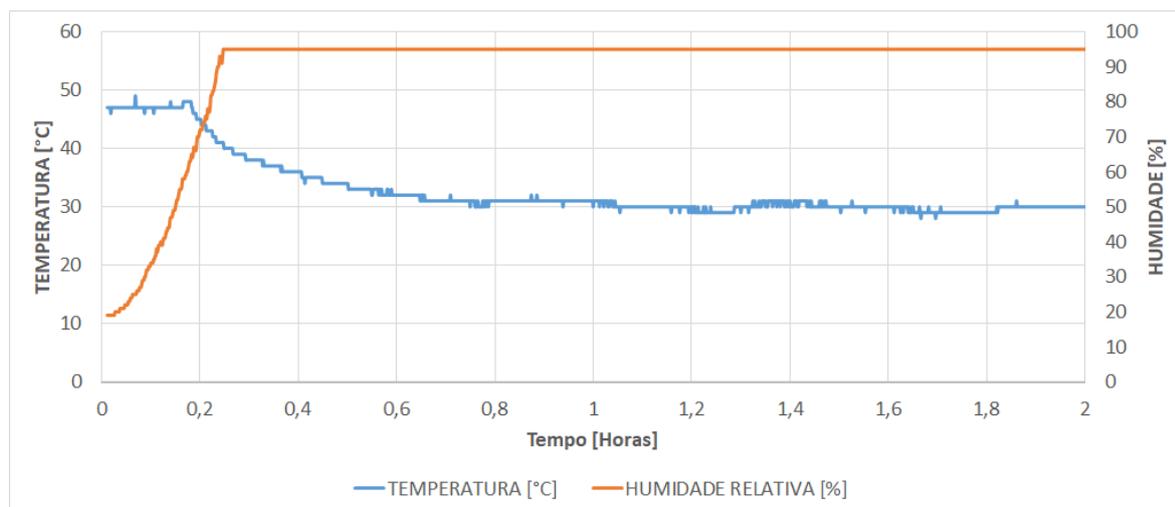


Figura 4.5 – Ciclo de condensação

A partir do gráfico do ensaio de condensação (Figura 4.5) é possível verificar que a temperatura decresce gradualmente para valores de cerca de 30 °C, mantendo-se essa temperatura até ao fim do ensaio. Considerando a humidade consegue-se observar que o sistema de condensação está a funcionar de maneira eficiente. Existe um aumento da humidade relativa nos primeiros 15 min após os quais a humidade estabiliza nos 95% até ao final do ciclo. Contudo, este valor constante da humidade pode dever-se ao facto de o sensor acumular condensação da água e assim fornecer esta leitura. Este valor tende a decrescer quando, por via do ciclo de radiação, o sensor fica completamente seco.

4.3 Ensaio cíclicos

Os ensaios cíclicos combinam os dois sistemas, o sistema de radiação e o de condensação, alternadamente. Nesse sentido teve que se definir o intervalo de tempo para cada ciclo. Foram consultadas as normas ASMT [30, 37] e também ISO para definir quais os parâmetros ideais para estes ensaios. A norma ASTM D4329 é referente aos ensaios de envelhecimento de plásticos sujeitos a radiação UV. A norma ASTM G154-06 refere-se à operação de aparelhos de luz fluorescente para exposição UV a materiais não metálicos, foi a norma seguida para a realização dos ensaios. É possível identificar bastantes semelhanças nos parâmetros para cada uma das normas. Em ambas é indicado que a água usada para a condensação deve ser destilada. Dessa

forma garante-se que não há agentes externos na água que possam influenciar os resultados obtidos.

De acordo com a norma ASTM G154-06, indicada para lâmpadas fluorescentes de UV, os tempos de exposição ideal para cada comprimento de onda são os apresentados na Figura 4.6.

Cycle	Lamp	Typical Irradiance	Approximate Wavelength	Exposure Cycle
1	UVA-340	0.89 W/m ² /nm	340 nm	8 h UV at 60 (± 3) °C Black Panel Temperature; 4 h Condensation at 50 (± 3) °C Black Panel Temperature
2	UVB-313	0.71 W/m ² /nm	310 nm	4 h UV at 60 (± 3) °C Black Panel Temperature; 4 h Condensation at 50 (± 3) °C Black Panel Temperature
3	UVB-313	0.49 W/m ² /nm	310 nm	8 h UV at 70 (± 3) °C Black Panel Temperature; 4 h Condensation at 50 (± 3) °C Black Panel Temperature
4	UVA-340	1.55 W/m ² /nm	340 nm	8 h UV at 70 (± 3) °C Black Panel Temperature; 4 h Condensation at 50 (± 3) °C Black Panel Temperature
5	UVB-313	0.62 W/m ² /nm	310 nm	20 h UV at 80 (± 3) °C Black Panel Temperature; 4 h Condensation at 50 (± 3) °C Black Panel Temperature
6	UVA-340	1.55 W/m ² /nm	340 nm	8 h UV at 60 (± 3) °C Black Panel Temperature; 4 h Condensation at 50 (± 3) °C Black Panel Temperature.
7	UVA-340	1.55 W/m ² /nm	340 nm	8 h UV at 60 (± 3) °C Black Panel Temperature; 0.25 h water spray (no light), temperature not controlled; 3.75 h condensation at 50 (± 3) °C Black Panel Temperature
8	UVB-313	28 W/m ²	270 to 700 nm	8 h UV at 70 (± 3) °C Black Panel Temperature; 4 h Condensation at 50 (± 3) °C Black Panel Temperature

Figura 4.6 – Parâmetros segundo a norma ASTM G154-06 [37]

Sabendo que estes parâmetros estão definidos para lâmpadas fluorescentes de radiação UV, que são lâmpadas que só emitem um tipo de radiação e com um só comprimento de onda, foi necessário adaptar alguns parâmetros para a lâmpada usada no protótipo funcional. As lâmpadas florescentes podem ser do tipo UVA, com o respetivo comprimento de onda de 340 nm, ou então UVB com comprimento de onda de 313 nm. Contudo, a lâmpada usada no protótipo funcional não é uma lâmpada fluorescente, mas sim uma lâmpada de alta pressão que consegue emitir radiação UVA com comprimento de onda entre 315 e os 400 nm, e radiação UVB com comprimento de onda entre 280 e 315 nm. Assim, interpretando a tabela dos ciclos recomendados para os tipos de radiação e respetivos comprimentos de onda, tentou criar-se um equilíbrio entre o ciclo de radiação UV e condensação. Dessa forma definiu-se:

- 4 horas de radiação UV à temperatura de 50 °C.
- 2 horas de condensação à temperatura de 40 °C.

Como a lâmpada usada é de alta pressão, possuindo radiação mais intensa que nas lâmpadas fluorescentes, fornece uma temperatura elevada na superfície da amostra. Como se pode verificar no ponto 3.5.3, o excesso de proximidade da lâmpada provocou bolhas na matriz do compósito devido ao excesso de temperatura da amostra.

Todas as normas fazem referência que a presença da humidade neste tipo de ensaios de radiação UV é extremamente importante para acelerar o envelhecimento. As normas defendem ainda a utilização de ensaios ciclos de modo a evitar uma incidência contínua das radiações UV pois iria diminuir a relação entre o ambiente de envelhecimento artificial com a exposição real do material. Na câmara o período de condensação pode simular os períodos sem radiação solar, por exemplo, durante a noite.

Foram inseridos na câmara, para o envelhecimento acelerado com radiação UV, 3 amostras idênticas. Cada provete foi removido respetivamente às 500, 750 e 1000 horas de ensaios.

Através da Figura 4.7 é possível verificar a posição dos provetes em cada ciclo. Estas posições foram definidas de modo a que a radiação seja incidida na superfície do provete a envelhecer de uma forma perpendicular e no ciclo de condensação para evitar acumulação de condensação, originando gotas de água. No ciclo de condensação não poderia ficar na horizontal com a face virada para a água devido ao facto de a placa acumular excesso de condensação, gotas de água, e também não poderia ficar na vertical. O objetivo deste ciclo não é molhar o provete, mas sim humidificar o provete e nesta posição evita-se a acumulação de gotas de água.



Figura 4.7 – Ciclos do ensaio de envelhecimento: a) Ciclo de radiação UV onde os provetes se encontram paralelos à fonte de radiação, na horizontal; b) Ciclo de condensação onde os provetes rodam para um ângulo de aproximadamente de 60 ° com a tina

A Figura 4.8 apresenta o gráfico das medições de temperatura e de humidade registadas na câmara durante 24 horas de ensaio.

Pela interpretação do gráfico da Figura 4.8 é possível verificar a transição entre o ciclo de radiação UV e o ciclo de condensação. No gráfico da temperatura verifica-se a mudança do UV para a condensação na descida repentina da temperatura e novamente o início do ciclo de radiação no momento em que a temperatura aumenta exponencialmente. Já no gráfico da humidade é possível verificar a descida da humidade nos ciclos de radiação e a subida até aos 95% no ciclo de condensação. Contudo o Sensor usado DHT 11 pode ter alguns erros de leitura devido ao facto de poder acumular humidade na sua estrutura.

Após a realização dos ensaios verificou-se que o consumo de água destilada diário é entre 2 e 2.5 l, sendo reposta automaticamente na tina pela bomba colocada no depósito exterior ao protótipo.

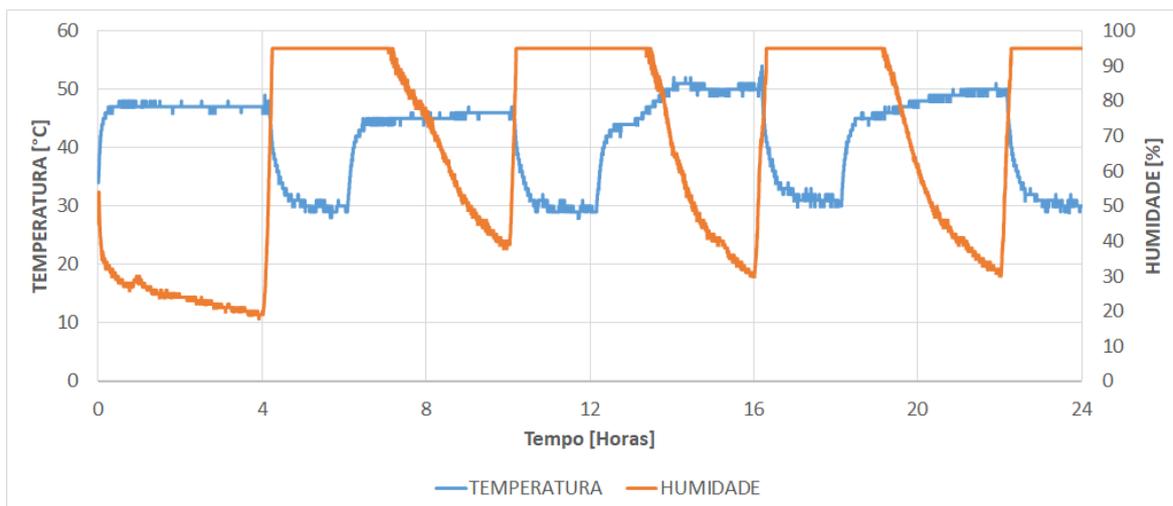


Figura 4.8 – Ensaio cíclico radiação/condensação (24 h)

4.4 Análise dos provetes após os ensaios cíclicos

Após a realização dos ensaios cíclicos, entre radiação UV e condensação, procedeu-se à análise dos provetes. Foram analisados três provetes expostos, respetivamente, a 500, 750, e 1000 h de envelhecimento.

De modo a verificar a degradação nos provetes, recorreu-se a inspeção visual e ensaios não destrutivos. Utilizou-se equipamento de radiografia digital para obtenção das imagens dos provetes antes e após o envelhecimento. Usou-se ainda macro e microscopia para avaliar a degradação na superfície dos provetes. Após serem realizados cortes transversais aos provetes recorreu-se a avaliou-se a degradação na matriz e no PVC interior do provete.

4.4.1 Macro e microscopia digital

Retirado o primeiro provete, após 500 horas de ensaio, através de inspeção visual verificou-se uma diferença de cor do provete, ou seja, uma descoloração. Inicialmente a resina apresentava uma transparência esbranquiçada, e depois de 500 horas ficou amarelecida, fenómeno típico dos polímeros sujeitos a grande exposição a radiação solar. Observou-se ainda o aparecimento de pequenas manchas, semelhantes a bolhas.

Para a avaliação da degradação da superfície da amostra recorreu-se a um microscópio de medição digital INSIZE® ISM-PM200SB com a capacidade de ampliação de 10X a 200X, com ligação USB-A ao computador, onde são capturadas as imagens.

Como se pode verificar Figura 4.9 é possível visualizar a mudança de cor das amostras, demonstrando assim o aumento da descoloração ao longo do tempo de exposição.

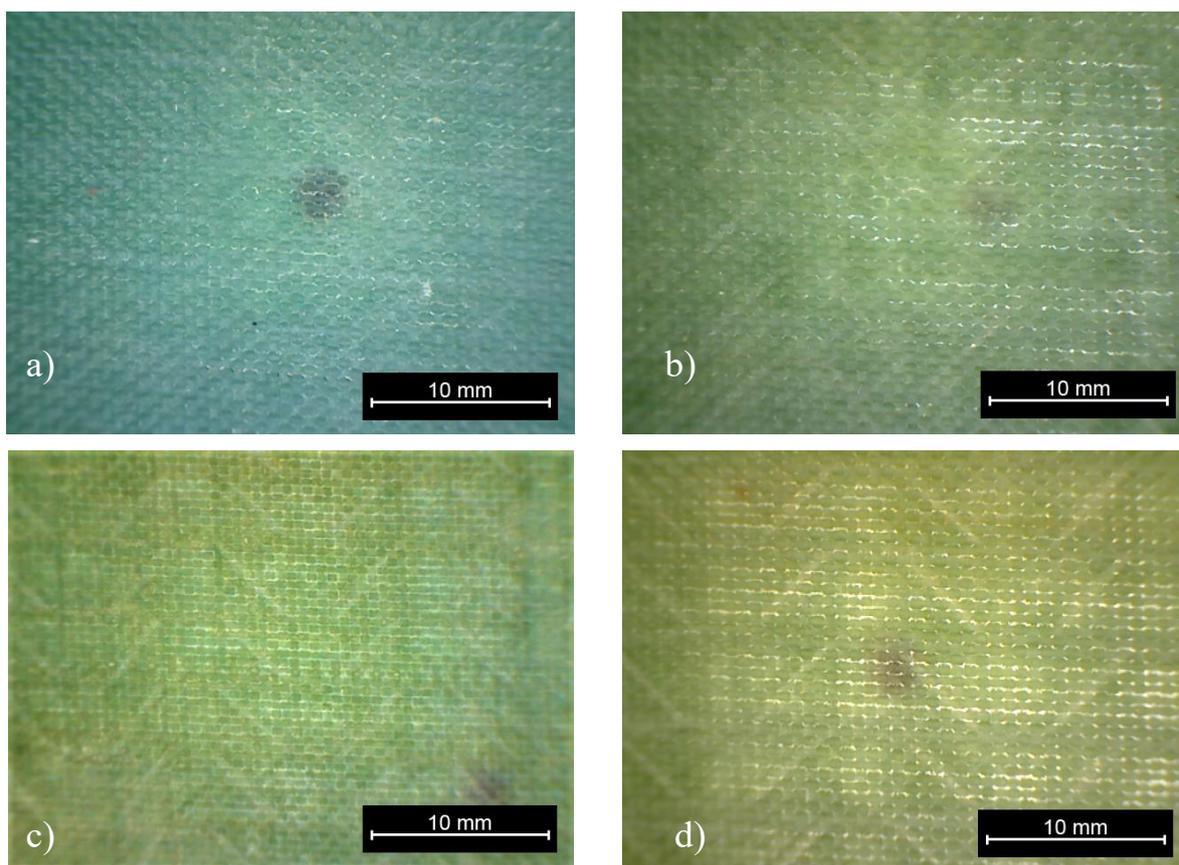


Figura 4.9 – Superfície do provete: a) nova; b) após 500 h; c) após 750 h; d) após 1000 h

É de facto evidente a mudança da cor verde para um tom mais amarelado com o aumento do tempo, mas também é importante evidenciar que as fibras se tornam mais evidentes, o que pode indiciar a degradação da matriz epóxida.

Avaliando ainda a superfície das amostras, aumentou-se ampliação do microscópio para 200X. Assim foi possível verificar as alterações relativas à maior relevância das fibras.

Com uma ampliação maior é possível verificar os efeitos físicos causados pela exposição à radiação UV nas superfícies diretamente expostas à incidência da radiação. Para além da descoloração da resina também surgem entalhes, principalmente nas zonas de interface. Pode ser verificado na Figura 4.10 que as fibras superficiais do laminado ficaram expostas e a resina quebradiça. Essas observações indicam que ocorreu a degradação da resina após o período de exposição na câmara. A degradação observada provavelmente provocou a quebra das cadeias do polímero, reduzindo a massa molar da resina. Este mesmo fenómeno verifica-se não só na textura da superfície, mas também num entalhe comum aos três provetes proveniente do processo de fabrico. Neste caso é possível verificar um aumento substancial de partículas degradadas, pois sendo um risco na superfície, penetrou ligeiramente na resina fazendo com que ela perdesse alguma resistência ao UV, aumentando a degradação. Através das imagens da Figura 4.11 é possível verificar que uma zona de não uniformidade da matriz na superfície das amostras teve uma degradação muito maior que o resto da superfície, devido ao facto de a degradação da resina ter sido substancial maior, provavelmente por ter uma área mais sujeita a radiação UV.

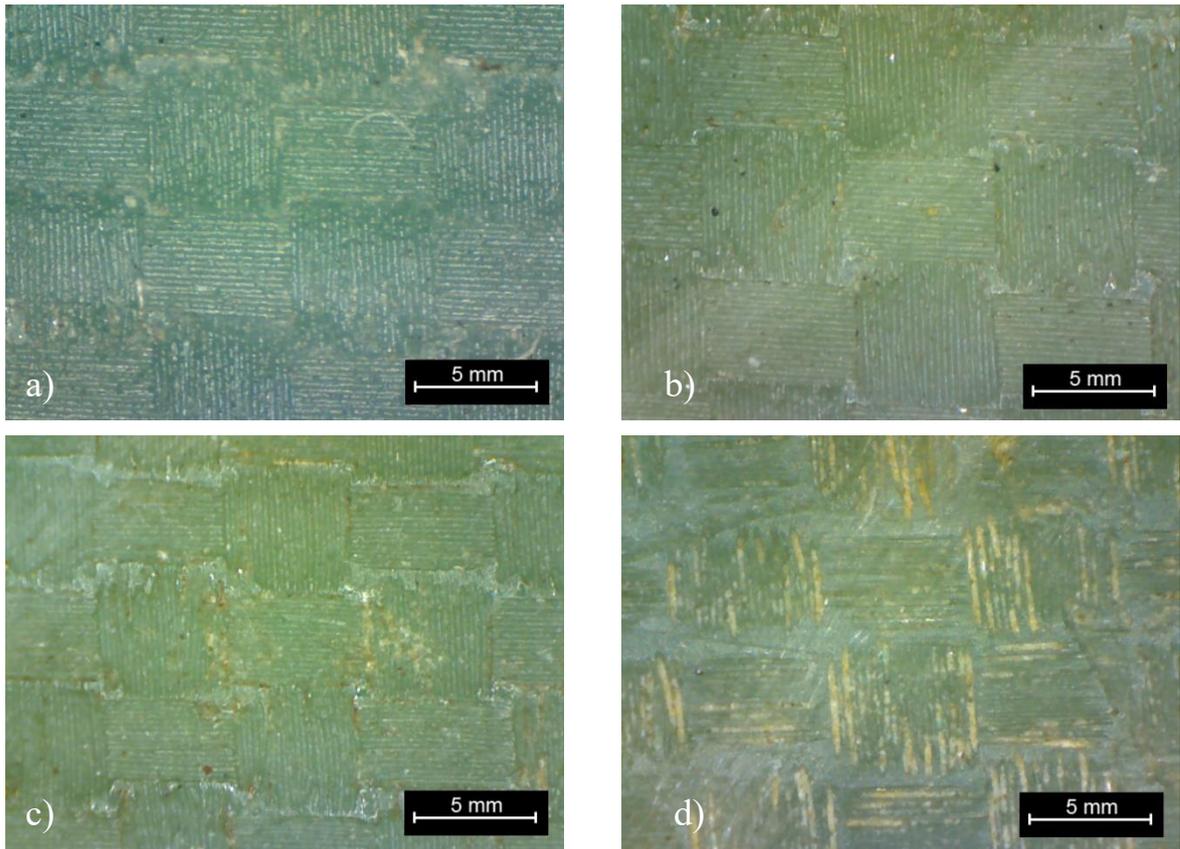


Figura 4.10 - Superfície do provete (200x): a) nova; b) após 500 h; c) após 750 h; d) após 1000 h

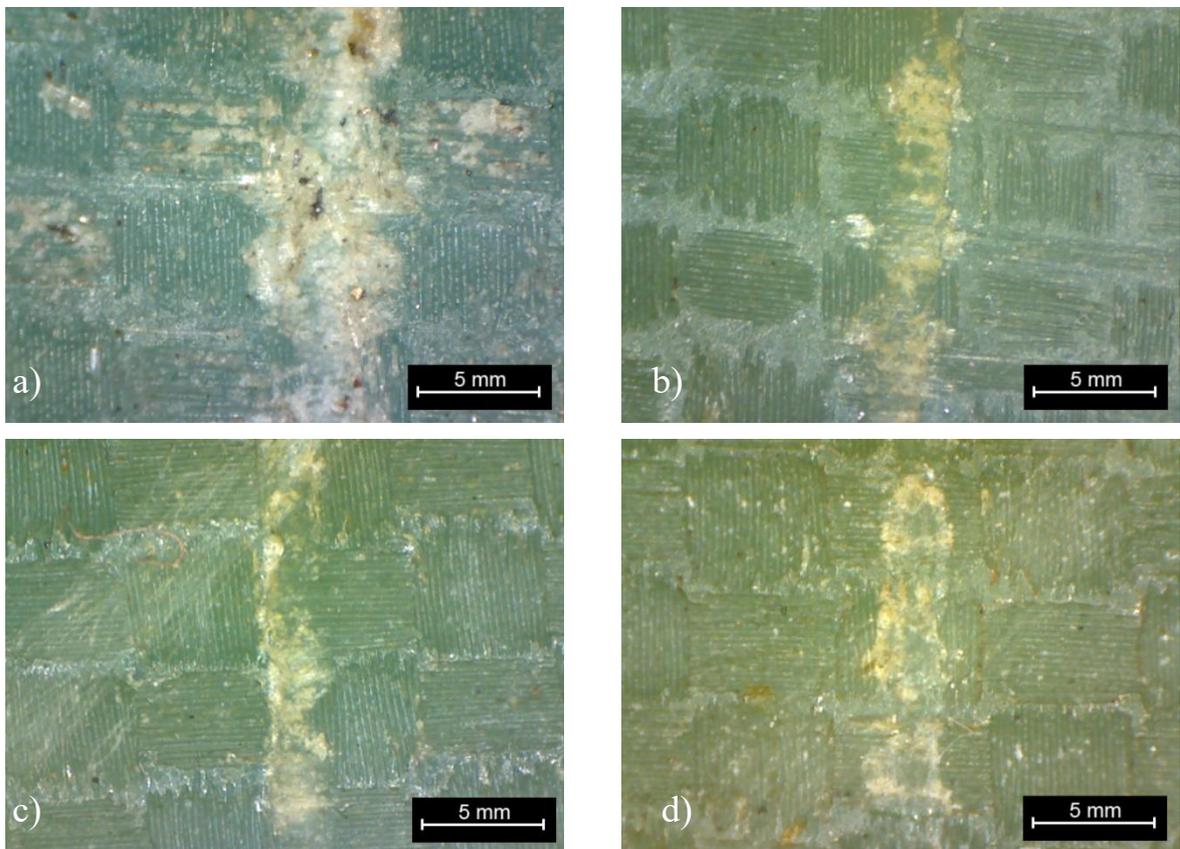


Figura 4.11 – Zona não uniforme comum a todas as placas: a) nova; b) após 500 h; c) após 750 h; d) após 1000 h

Verificou-se ainda que ao longo dos três provetes iam aparecendo manchas brancas na superfície. O provete retirado após 500 horas tinha pequenas manchas, o segundo retirado após 750 horas já tinha um número considerável de manchas e o terceiro provete retirado após 1000 h tinha praticamente metade da sua superfície coberta por manchas brancas. Imaginou-se numa primeira instância que esse fenómeno se deveria aos processos de humidade e secagem das amostras. Recorrendo novamente ao microscópio foi possível verificar a mudança na superfície dos provetes na Figura 4.12.

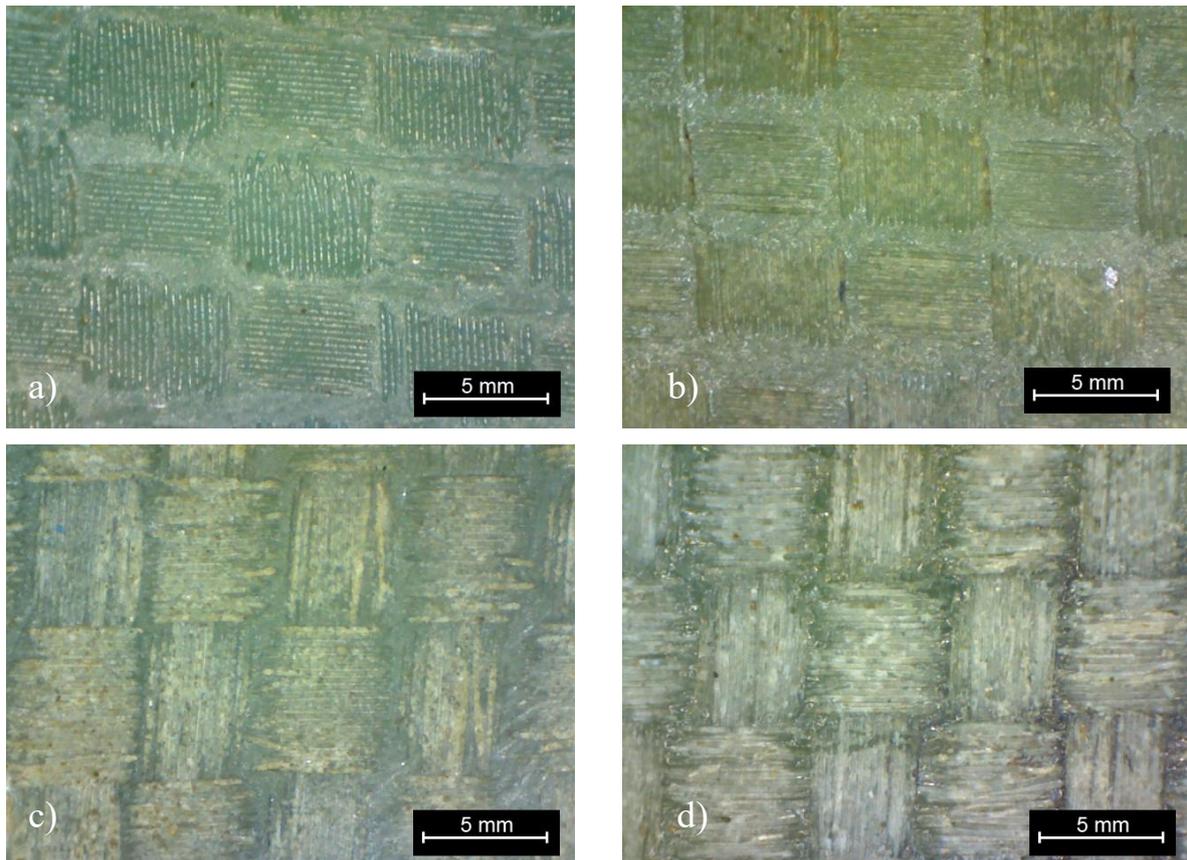


Figura 4.12 - Degradação da matriz: a) sem degradação; b) após 500 h; c) após 750 h; d) após 1000 h

De forma a poder ser avaliada a degradação da matriz e do PVC interno do provete, realizaram-se cortes transversais para avaliar a penetração da radiação UV. As amostras após o corte foram tratadas de forma a obter uma superfície lisa. Através do microscópio ótico Optika® foi possível verificar que a radiação atravessou toda a camada de laminado até ao PVC, como se pode observar na Figura 4.13.

Como é possível verificar, existiu penetração de radiação UV até ao PVC interior dos provetes. É possível verificar a descoloração do PVC logo após as fibras e a resina, demonstrando uma cor mais escura que o restante PVC. Com efeito, a exposição de PVC sem a adição de estabilizantes pode, dependendo da intensidade e tempo de exposição, causar a libertação de cloreto de hidrogénio (HCl) e alterar as cadeias poliméricas, o que resulta num rápido processo de degradação, revelado normalmente pela mudança de coloração para amarelo.

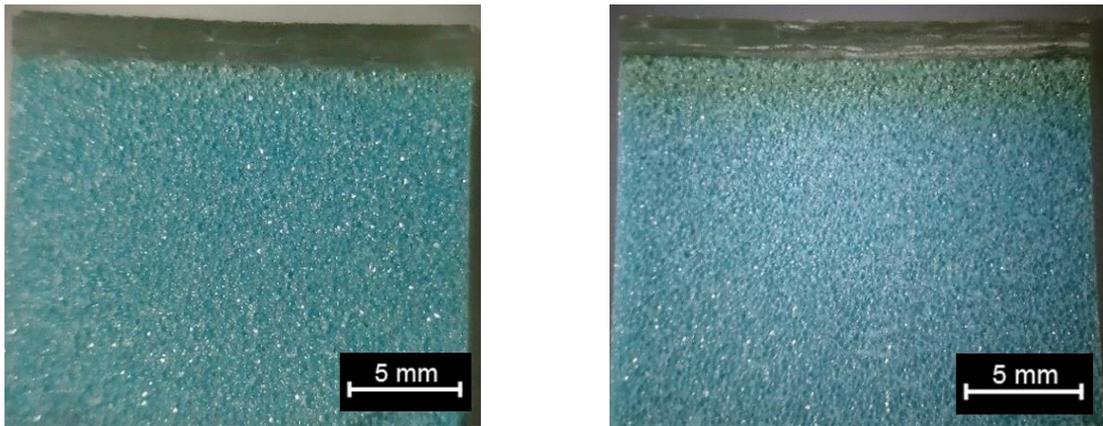


Figura 4.13 – Efeito da radiação UV na interface laminado/PVC

Através de outra amostra, resultante de outro corte transversal atravessando um furo do PVC, que está preenchido por resina apenas, conseguiu-se perceber que houve alguma radiação UV que atingiu uma distância de cerca de 5 mm através do furo (Figura 4.14).

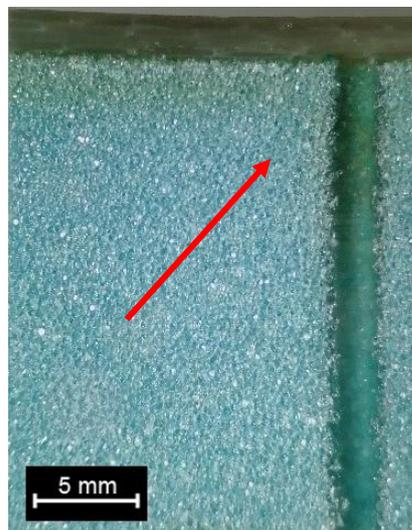


Figura 4.14 – Corte transversal na zona furada

Através de uma aproximação maior é possível verificar que a mudança não é apenas na cor, mas também no aparecimento de alguns vazios no PVC. Verifica-se um aumento dessa degradação com o aumento da exposição do UV.

Pode-se verificar facilmente a degradação na superfície de contacto do PVC e a resina, com o aparecimento de vazios no PVC. Sendo o PVC utilizado um material com uma estrutura perfurada, seria expectável que existissem esses vazios, mas nota-se um aumento com a exposição UV (Figura 4.15).

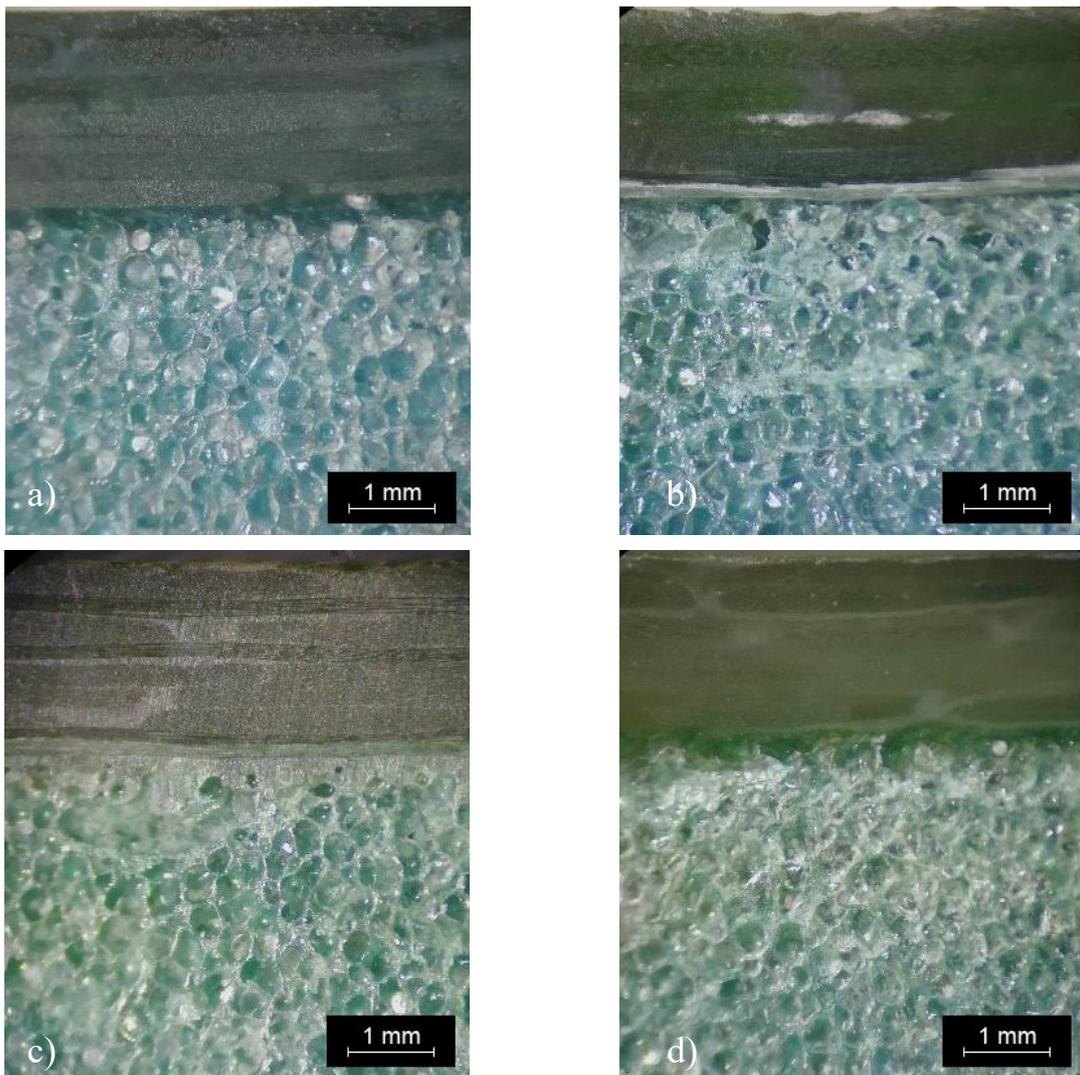


Figura 4.15 – Degradação da interface laminado/PVC

Fazendo inicialmente uma avaliação da degradação das fibras e resina através de microscopia, para verificar a existência de delaminações no laminado, verificou-se que não houve mudanças significativas (Figura 4.16). Observou-se que a degradação causada no polímero, devido às alterações da estrutura química da resina, se restringiu à camada superficial do laminado, que ficou diretamente exposta à radiação UV. Não se observam alterações na estrutura do laminado, sendo o efeito da radiação UV apenas observada à superfície. No entanto, este tipo de dano pode favorecer a entrada e a difusão de umidade no interior do laminado.

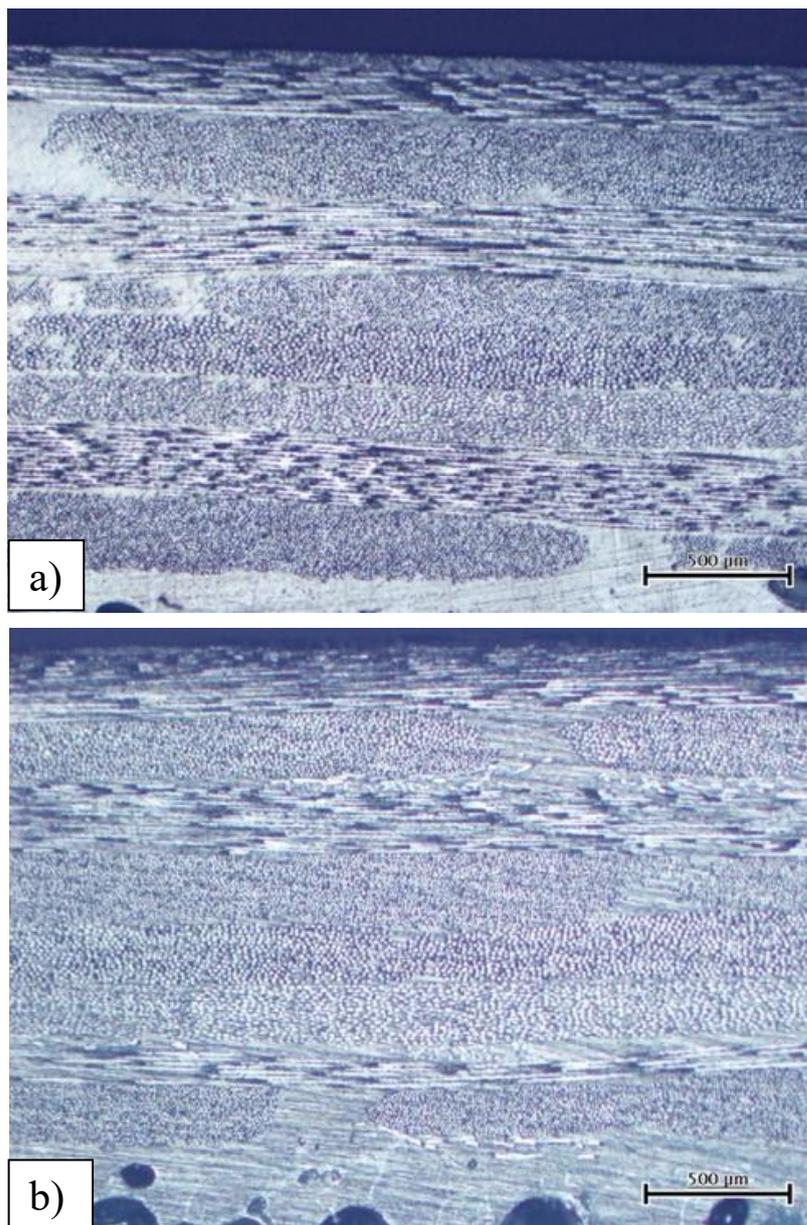


Figura 4.16 – Micrografia do laminado (fibra + resina): a) não envelhecida; b) após 1000 h

Avaliando a degradação do PVC, demonstrada no ensaio anterior, através deste ensaio é possível verificar com mais clareza a microestrutura do PVC e os vazios encontrados na superfície de contacto. Como se pode verificar pela Figura 4.17 a degradação do PVC é visível. Confirma-se o aumento dos vazios com o aumento do tempo de exposição UV e por isso é notório que a radiação UV incidente atravessou a superfície dos provetes até ao material interior, PVC, onde a degradação foi evidente. Estes vazios poderão também ser a razão pela qual surgiram as bolhas brancas na superfície do material.

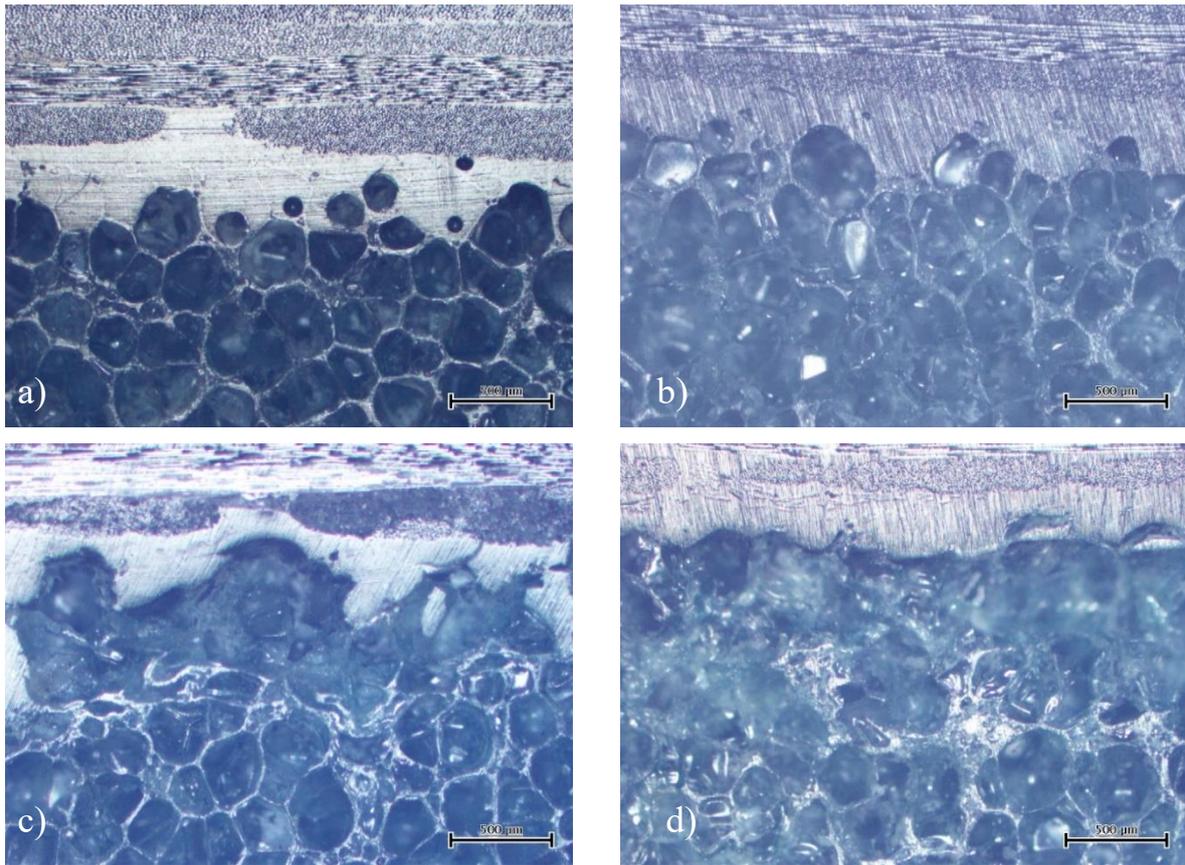


Figura 4.17 – Micrografia da interface fibras/PVC: a) não envelhecido; b) após 500 h; c) após 750 h; d) após 1000 h

4.4.1 Radiografia digital

Foram analisados vários pontos dos provetes, antes e depois do envelhecimento, para se verificar a existência de alterações na matriz do compósito. Seguidamente foram radiografadas perpendicularmente à fonte de radiação usando o sistema de raio-X Kodak 2100 com uma energia máxima de 70 Kv, 300 KHz e corrente de 7mA, associado a um sistema digital de aquisição de imagem Kodak RVG 5100, com um tempo de exposição de 0.2 s para todos os provetes, e foi possível verificar as alterações em cada provete dependendo do tempo de exposição à radiação UV. Foram realizadas radiografias em 9 regiões de cada provete, nomeadamente 4 referentes aos cantos, 4 às faces laterais e 1 ao centro. Como resultado do processo obtiveram-se as imagens que serviram para a posterior medição da zona delaminada. Estas foram guardadas em formato TIFF (*Tagged Image File Format*) de alta resolução (1200×1600 pixels) e seguidamente processadas de modo a caracterizar as regiões de interesse. Nas Figura 4.18, Figura 4.19 e Figura 4.20 são apresentados os exemplos de imagens radiográficas antes e depois do envelhecimento, respetivamente para as 500 h, 750 h e 1000 h. Todos as outras zonas mostraram o mesmo comportamento, não existindo diferenças significativas.

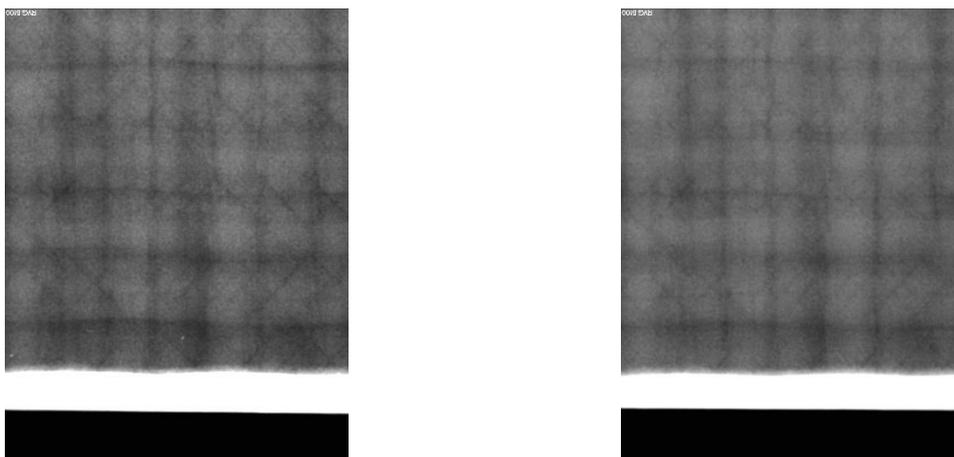


Figura 4.18 – Radiografia digital da zona lateral do provete antes e após 500 h

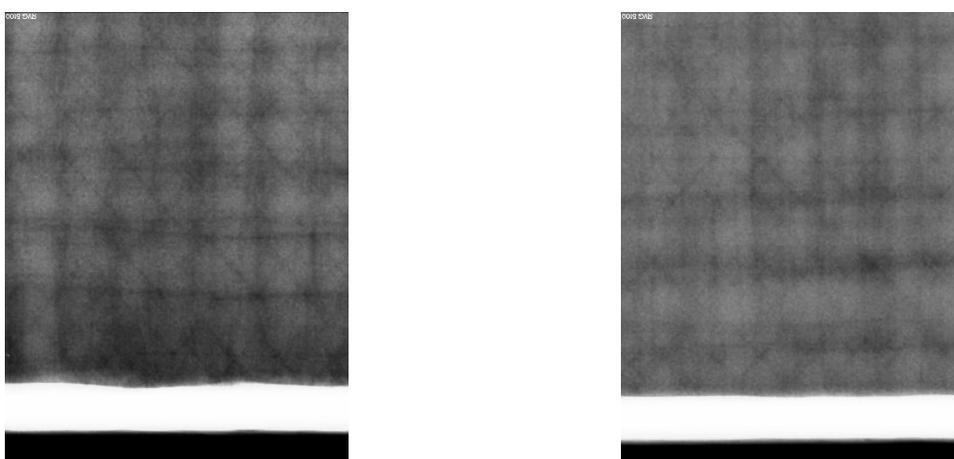


Figura 4.19 – Radiografia digital da zona lateral do provete antes e após 750 h

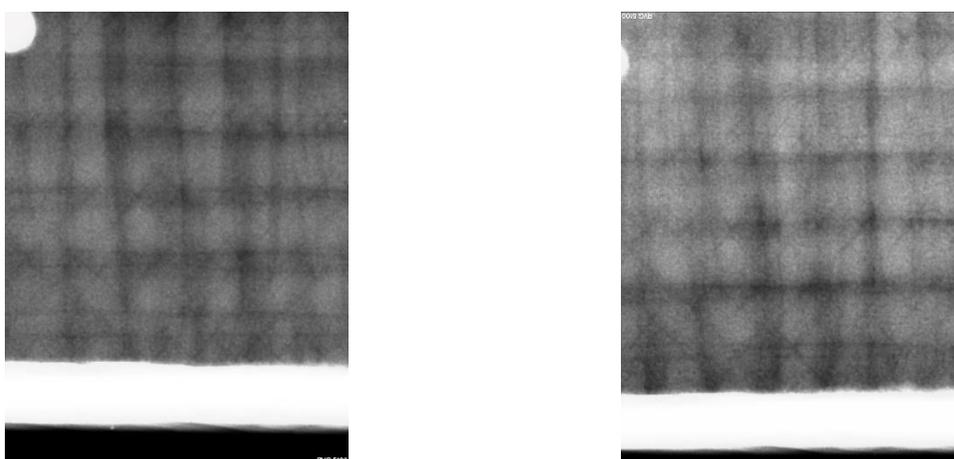


Figura 4.20 – Radiografia digital da zona lateral do provete antes e após 1000 h

O processamento de imagem teve como objetivo a verificação das diferenças entre o provete novo e envelhecido, principalmente na interface laminado/PVC. Selecionou-se a zona de interesse na imagem obtida por radiografia, usando um software de tratamento de imagem e procedeu-se à conversão da imagem com níveis de cinza para uma imagem com representação binária (dois tons), com um valor de *threshold* escolhido como referência. Para melhor visualização, inverteu-se esta imagem e alterou-se a cor da imagem relativa ao provete novo para verde. A sobreposição das duas

imagens permite observar as zonas onde surgiram os vazios. Nas Figura 4.21, \Figura 4.22 e Figura 4.23 pode observar-se a degradação do PVC e confirma-se o aumento dos vazios com o aumento do tempo de exposição UV.

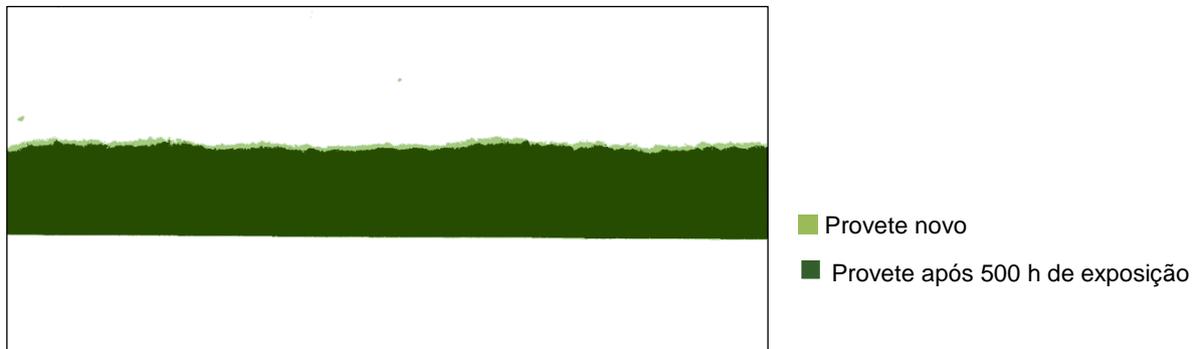
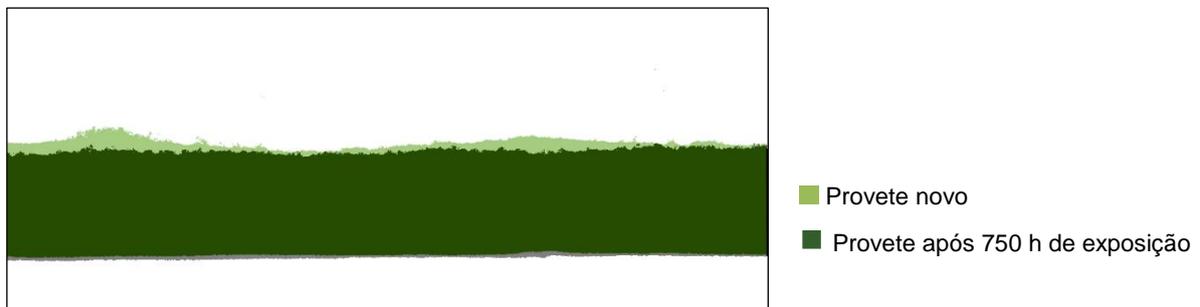


Figura 4.21 – Imagem processada de comparação da zona de interface do provete antes e após 500 h



\Figura 4.22 – Imagem processada de comparação da zona de interface do provete antes e após 750 h

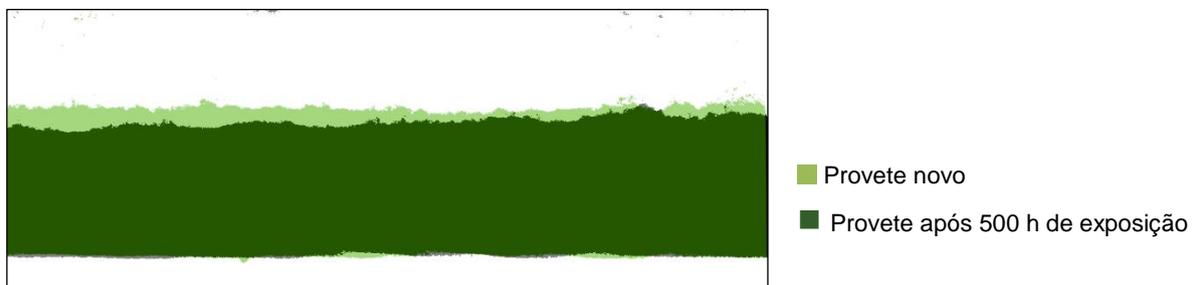


Figura 4.23 – Imagem processada de comparação da zona de interface do provete antes e após 1000 h

5 Conclusões e desenvolvimentos futuros

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido durante esta dissertação e as propostas de desenvolvimentos futuros. Uma vez que a discussão de resultados foi sendo desenvolvida o capítulo anterior, este capítulo tem como objetivo resumir e evidenciar as conclusões mais importantes

5.1 Conclusões e contribuições

Esta dissertação teve como principal objetivo o desenvolvimento de um equipamento para o estudo do envelhecimento de um compósito reforçado com fibra de vidro sujeito a radiações UV. Para a realização desse envelhecimento houve a necessidade de criar um protótipo funcional de que simulasse o envelhecimento de uma forma acelerada.

Na conceção do protótipo funcional surgiram alguns pontos que tiveram de ser corrigidos. No sistema de radiação, a lâmpada, que inicialmente estava descoberta, recebia a condensação proveniente da tina. Para evitar a sua deterioração teve de ser colocada num suporte isolado com sistema de arrefecimento próprio. Com efeito, devido à condensação os contactos da lâmpada e do respetivo suporte oxidaram levando à fratura dos topos cerâmicos da lâmpada. Sendo a lâmpada a principal fonte de calor do protótipo, após ser isolada, a os valores máximos de temperatura na câmara baixaram. Contudo, verificou-se que a temperatura ficou dentro dos parâmetros das normas aplicadas.

Também no sistema de condensação houve um ponto que teve de ser corrido face ao projeto inicial, que foi o sensor de nível de água. Inicialmente um sensor de nível de água específico para Arduino®, que mede a condutividade e dessa forma o nível de água, sofreu oxidação severa e consequentemente as leituras não estavam a ser medidas corretamente. Assim o problema do controlo do nível de água foi substituído por um sistema autónomo ao sistema de controlo, sendo criado um sensor de bóia acionado por um *micro switch* e dessa forma controlou-se o nível de água da tina de condensação.

A validação do protótipo funcional dividiu-se em várias etapas. Primeiramente realizou-se o teste ao sistema de radiação com a lâmpada isolada e sem estar isolada e conseguiu-se perceber o bom funcionamento do mesmo e principalmente do sistema de arrefecimento da câmara de forma a controlar a temperatura desejada no interior.

Seguidamente realizou-se o teste ao sistema de condensação e verificou-se que o termostato instalado realizava uma boa gestão da temperatura da água durante todo o ciclo e também o bom funcionamento do sensor de nível de água criado.

Finalmente um teste cíclico entre ambos os sistemas, foi capaz de demonstrar a capacidade do Arduino®, com os respetivos sensores de temperatura e humidade, controlar todo o sistema sem

falhas. Contudo é de evidenciar alguns problemas no sensor de humidade pois devido à sua construção acumulou alguma humidade em alguns ensaios. Desta forma teve de ser repensada a localização do mesmo na câmara para que a lâmpada tivesse a capacidade de secar o mesmo no seu ciclo.

Foram colocados três provetes dentro da câmara sujeitos a ensaios cíclicos de radiação UV com condensação de água destilada durante 500, 750 e 1000 horas. Os provetes colocados foram amostras do casco da embarcação em construção no Arsenal do Alfeite, uma placa de PVC coberta por uma matriz polimérica reforçada com fibra de vidro.

Após retirado o primeiro provete após 500 horas, foi possível verificar visualmente uma descoloração em relação à cor inicial. Este efeito evidenciou-se também nos restantes provetes onde o provete retirado após 750 horas demonstrava uma maior descoloração e o retirado após 1000 horas mais ainda. Será ainda de realçar que ao longo do tempo de exposição houve um aumento da exposição das camadas das fibras, isto é, foi possível verificar as costuras através da resina.

Fazendo uma análise mais profunda da superfície das amostras, recorrendo a macro e microscopia digital, foi possível verificar o aparecimento de zonas amareladas na textura da superfície demonstrando assim a degradação da matriz na superfície.

Recorrendo a equipamento de radiografia digital, realizaram-se várias imagens de cada amostra antes e após a exposição. Assim sendo, depois de sobrepor as imagens foi possível verificar que se poderia esperar uma degradação na interface entre o laminado e o material interno, PVC.

Assim realizaram-se cortes transversais em cada provete de forma a poder avaliar a degradação do PVC. Logo após o corte foi evidente que a radiação foi suficientemente forte para atravessar a resina e as fibras incidindo sobre o PVC. Isto porque na interface, foi possível verificar visualmente a descoloração do PVC, onde inicialmente era da cor verde e após o ensaio apresentava uma certa espessura de cor amarelada. Esta cor amarelada identifica claramente que existiram quebras nas cadeias poliméricas devido à exposição UV e humidade. Após a limpeza das amostras recorreu-se a um microscópio para avaliar a degradação da zona de interface. Foi possível verificar o aparecimento de vazios nessa área, cuja densidade aumentou com o aumento de exposição, isto é o provete de 1000 horas apresentava mais vazios que o exposto a 500 horas.

Em suma, o objetivo desta dissertação foi cumprido, pois foi possível verificar através destes ensaios que ao protótipo funcional está apto para os ensaios de envelhecimento acelerado sobre radiação UV, capaz de realizar ensaios de longa duração em vários tipos de materiais.

5.1.1 Desenvolvimentos futuros

De forma a poder otimizar o equipamento desenvolvido e dessa forma podê-lo tornar mais polivalente para qualquer tipo de envelhecimento recomenda-se que se realize alguns ajustes ou até mesmo algumas alterações, tais como:

- Testar a influencia da distância entre a lâmpada e os provetes.
- Substituir o vidro temperado por um material capaz de deixar passar toda a radiação, mas tendo a capacidade de suportar altas temperaturas da lâmpada.
- Comparar os resultados obtidos, na mesma amostra, com um equipamento já existente no mercado de forma a obter um padrão e assim definir parâmetros ideais (por exemplo o equipamento QUV®).
- Desenvolver um sistema de aquecimento da câmara que não esteja dependente do calor da lâmpada e dessa forma criar condições mais extremas para alguns ensaios.
- Substituir o sensor de humidade por um sensor capaz de transmitir leituras mais fiáveis.
- Sugere-se também um estudo de ensaios mais longos de modo a observar uma maior degradação das amostras

Referências bibliográficas

- [1] G. Neşer, "Polymer Based Composites in Marine Use: History and Future Trends," *Procedia Eng.*, vol. 194, pp. 19–24, Jan. 2017.
- [2] A. P. Mouritz, E. Gellert, P. Burchill, and K. Challis, "Review of advanced composite structures for naval ships and submarines," *Compos. Struct.*, vol. 53, no. 1, pp. 21–42, Jul. 2001.
- [3] D. Mathijssen, "Now is the time to make the change from metal to composites in naval shipbuilding," *Reinf. Plast.*, vol. 60, no. 5, pp. 289–293, Sep. 2016.
- [4] A. G. de M. Moura Alfredo B. de Moraes Marcelo F. S. F. de, *Materiais Compósitos Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. Publindústria, Porto, 2009.
- [5] "Central Glass - Products." [Online]. Available: http://www.cgc-jp.com/products/search_category/fiberglass/. [Accessed: 02-Dez-2018].
- [6] K. K. Kar, Ed., *Composite Materials: Processing, Applications, Characterizations*, 1st ed. 2017 edition. New York, NY: Springer, 2016.
- [7] NPTEL, "Lecture 5.4: Hand Lay-up and Spray Lay-up," Online Course, NPTEL, Mechanical Engineering, Processing of non metals, 19-Jul-2018. [Online]. Available: <http://www.nptel.ac.in/courses/112107085/module5/lecture4/lecture4.pdf>. [Accessed: 19-Jul-2018].
- [8] R. A. V. Sousa, "Produção de Componentes em Materiais Compósitos por Infusão de Resina," Dezembro 2008.
- [9] S. L. Donaldson and D. B. Miracle, *ASM Handbook Composites Volume 21*, 10 edition. Materials Park, Ohio: ASM International, 2001.
- [10] T. John, MACT, 'Professional Boatbuilder,' No. 60, Aug/Sept 1999.
- [11] A. Hammami and B. R. Gebart, "Analysis of the vacuum infusion molding process," *Polym. Compos.*, vol. 21, no. 1, pp. 28–40, Jul. 2018.
- [12] J. D. Nunemaker, M. M. Voth, D. A. Miller, D. D. Samborsky, P. Murdy, and D. S. Cairns, "Effects of moisture absorption on damage progression and strength of unidirectional and cross-ply fiberglass–epoxy composites," *Wind Energy Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 427–438, Jun. 2018.
- [13] D. Yuexin, T. Zhaoyuan, Z. Yan, and S. Jing, "Compression Responses of Preform in Vacuum Infusion Process," *Chin. J. Aeronaut.*, vol. 21, no. 4, pp. 370–377, Aug. 2008.
- [14] K. van Rijswijk, H. E. N. Bersee, W. F. Jager, and S. J. Picken, "Optimisation of anionic polyamide-6 for vacuum infusion of thermoplastic composites: choice of activator and initiator," *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 37, no. 6, pp. 949–956, Jun. 2006.
- [15] R. Petrucci, C. Santulli, D. Puglia, F. Sarasini, L. Torre, and J. M. Kenny, "Mechanical characterisation of hybrid composite laminates based on basalt fibres in combination with flax, hemp and glass fibres manufactured by vacuum infusion," *Mater. Des.*, vol. 49, pp. 728–735, Aug. 2013.

- [16] L. Reis, N. Lopes, C. Alves, and M. Freitas, "ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE JUTA E FIBRA DE VIDRO EM AMBIENTE CONTROLADO," Lisboa, APAET Mecânica Experimental, 2012, Vol 21, Pgs 27-36
- [17] W. B. Nelson, "A Bibliography of Accelerated Test Plans," IEEE Trans. Reliab., vol. 54, no. 2, pp. 194–197, Jun. 2005.
- [18] Vassilious, A & Mettas, Adamantios.. Understanding accelerated life testing analysis, 2001.
- [19] L. A. Escobar and W. Q. Meeker, "A Review of Accelerated Test Models," Stat. Sci., vol. 21, no. 4, pp. 552–577, Nov. 2006.
- [20] Seyyedeh Zohreh Fatemi, Fabrice Guerin, Laurent Saintis. Accelerated Life Testing : Analysis and Optimization. QUALITA2013, Mar 2013, Compiègne, France.
- [21] C.-M. Chang, "Developing Highly Accelerated Life Test (HALT) Method to Improve Product Robustness and Shorten Development Cycle," p. 81.
- [22] Department of Defense, "HALT HASS Report to Congress July 2016," United States of America.
- [23] "What is HALT HASS Testing? | ESPEC Qualmark Corporation." [Online]. Available: <https://www.qualmark.com/whatishalthasstesting>. [Accessed: 14-Feb-2019].
- [24] Department of Defense, "Environmental Stress Screening Guidelines," United States of America, 1993.
- [25] J. Virkki, L. Chen, Y. Zhu, and Y. Meng, "Challenges in Qualitative Accelerated Testing of WSN Hardware," Engineering, vol. 03, no. 12, pp. 1234–1239, 2011.
- [26] F. Pascual, W. Meeker, and L. Escobar, "Accelerated Life Test Models and Data Analysis," in Springer Handbook of Engineering Statistics, H. Pham, Ed. London: Springer London, 2006, pp. 397–426.
- [27] J. W. S. Hearle, Polymers and their properties. Chichester : New York: E. Horwood ; Halsted Press, 1982.
- [28] Markovičová, Lenka & Zatkalíková, Viera & Vaško, A.. Accelerated aging of polymeric composites in laboratory conditions. 16. 1033-1037, 2016.
- [29] A. P. Cysne Barbosa et al., "Accelerated aging effects on carbon fiber/epoxy composites," Compos. Part B Eng., vol. 110, pp. 298–306, Feb. 2017.
- [30] G03 Committee, "Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials," ASTM International.
- [31] B. G. Kumar, R. P. Singh, and T. Nakamura, "Degradation of Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Composites by Ultraviolet Radiation and Condensation," J. Compos. Mater., vol. 36, no. 24, pp. 2713–2733, Dec. 2002.

[32] T. Lu, E. Solis-Ramos, Y. Yi, and M. Kumosa, "UV degradation model for polymers and polymer matrix composites," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 154, pp. 203–210, Aug. 2018.

[33] L. N. Chang and W. S. Chow, "Accelerated Weathering on Glass Fiber/Epoxy/Organo-montmorillonite Nanocomposites," *J. Compos. Mater.*, vol. 44, no. 12, pp. 1421–1434, Jun. 2010.

[34] A. Afshar, M. Alkhader, C. S. Korach, and F.-P. Chiang, "Effect of long-term exposure to marine environments on the flexural properties of carbon fiber vinylester composites," *Compos. Struct.*, vol. 126, pp. 72–77, Aug. 2015.

[35] Korach, C.S. & Chiang, Fu-Pen. Characterization of carbon fiber-vinylester composites exposed to combined uv radiation and salt spray. ECCM 2012 - Composites at Venice, Proceedings of the 15th European Conference on Composite Materials.

[36] "Equilam - Produtos." [Online]. Available: <http://equilam.com.br/produtos/serie-equiv>. [Accessed: 19-Feb-2019].

[37] D20 Committee, "Practice for Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus Exposure of Plastics," ASTM International.

