



Bruna Sofia Oliveira Cardoso
Licenciatura em Engenharia Química e Biológica
Ramo Engenharia do Ambiente

**Estudo de Silicones
para
Aplicação no Módulo de Concentração Fotovoltaico
HSUN[®]**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Energias Renováveis - Conversão Eléctrica e Utilização Sustentáveis

Orientador: Stanimir Valtchev, Prof. Doutor, FCT
Co-orientador: Luis Pina, Doutor, WS Energia

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Adolfo Steiger Garção
Arguente: Prof. Doutor Jorge Pamies Teixeira
Vogais: Prof. Doutor Stanimir Stoyanov Valtchev
Doutor Luís Miguel Pereira Pina

A presente dissertação denominada “Estudo de Silicones para Aplicação no Módulo de Concentração Fotovoltaico HSUN[®]”, escrita por mim, Bruna Sofia Oliveira Cardoso, tem o seguinte termo de COPYRIGHT:

“A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem 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 objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.”

Agradecimentos

Gostaria de expressar a minha gratidão a todas as pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram para a concretização desta dissertação.

Começo por agradecer ao grupo do departamento I&D da WS Energia, pela oportunidade de desenvolvimento deste projecto, pelos conselhos, orientações, ajuda no laboratório e esclarecimento de dúvidas que surgiram ao longo deste projecto. Agradeço especialmente ao Mestre Sebastião Coelho e ao Doutor Luís Pina por todo o acompanhamento, orientação e pelas inúmeras sugestões surgidas para ultrapassar dificuldades e desafios. Agradeço ao Mestre Sebastião por todo o apoio prestado, pela paciência para comigo e pelo papel importantíssimo que teve no decurso deste trabalho. Agradeço também a todos os colaboradores da WS Energia por toda a simpatia prestada.

Agradeço ao meu orientador Prof. Doutor Stanimir Valtchev, por todo o apoio, disponibilidade, pelo interesse com que sempre acompanhou o meu trabalho e sobretudo pela sua amizade e simpatia.

Agradeço à empresa LÓGICA, pela disponibilidade dos equipamentos, para a realização de testes acelerados.

Agradeço ao Prof. Doutor Jorge Pamies Teixeira pela sua disponibilidade em realizar uma peça, para adaptar à máquina de tracção, para efectuar o teste de adesão.

À equipa do departamento de materiais, em especial ao Hugo Barbosa por me ter ensinado a trabalhar com a máquina de tracção e ao João Canejo por todo o apoio prestado durante a realização dos ensaios de tracção e nos ensaios de exposição à luz UV.

À Prof. Elvira Fortunato por disponibilizar o laboratório CEMOP, para a realização dos ensaios de espectroscopia. Um agradecimento especial à Adriana Nogueira pela ajuda na realização destes ensaios.

Dedico esta dissertação aos meus pais por serem os melhores do mundo e por acreditarem sempre em mim. Agradeço-lhes por todo o esforço, amizade, paciência e por todo o amor que me dedicaram ao longo da minha vida. Agradeço também ao meu irmão por apoio prestado.

Por fim, agradeço a amizade de todos os meus amigos. Agradeço em especial ao meu namorado Diogo Fernandes por todo o apoio e motivação prestado ao longo deste projecto e ao seu irmão Hugo Fernandes pelo apoio prestado no decorrer deste trabalho. À minha amiga Carina por todo o apoio prestado nas horas de maior dificuldade, agradeço-lhe principalmente pela sua amizade.

O meu obrigada a todos!

Resumo

Os sistemas fotovoltaicos (FV) e em especial os sistemas de concentração (CFV) representam uma das tecnologias de maior crescimento no sector das energias renováveis. Com este trabalho procurou-se caracterizar silicones, definir e desenvolver os seus métodos de produção, de modo a seleccionar o silicone mais adequado para aplicação no módulo fotovoltaico de concentração em desenvolvimento pela WS Energia, HSUN[®].

Neste trabalho começa-se por definir e desenvolver os métodos de preparação de silicones, através de várias experiências de encapsulamento em receptores. A caracterização dos diferentes silicones estudados é realizada através de diversas técnicas, nomeadamente: 1) Medição da curva I-V; 2) Espectroscopia UV-Visível-NIR; 3) Ensaios de tracção; 3) Exposição UV.

Nesta dissertação também é avaliada a durabilidade do sistema HSUN[®], nomeadamente do seu receptor. É utilizado um conjunto de testes acelerados e agressivos (*Crash Tests*), cuja finalidade é detectar possíveis falhas no receptor HSUN[®], especificamente ao encapsulamento, com o objectivo de induzir as reformulações necessárias ao seu design, para que o sistema, quando submetido a uma certificação, seja certificado com sucesso.

O receptor, do módulo HSUN[®] apresentou algumas falhas nos testes de durabilidade pelo que será necessário realizar algumas alterações ao seu design. Nos testes de caracterização dos vários silicones, o que apresentou melhores resultados e é economicamente viável é o Elastosil RT[®] 601. Os testes realizados são bons indicadores para o desempenho dos módulos HSUN[®] no terreno, no entanto o design e o silicone escolhido só serão definitivamente aprovados após a realização de todos os testes inscritos na norma IEC 62018.

Palavras-chave: CPV; Encapsulamento; Silicone; Durabilidade

Abstract

Photovoltaic systems (PV), specially concentration (CPV) systems, present themselves as one of the faster growing technologies in the field of renewable energies. This work attempts to characterize silicones, define and develop their production methods in order to select the most suitable silicone for use in concentrating photovoltaic module under development by WS Energia, the HSUN[®].

This work begins by defining and developing methods for preparation of silicones, through various experiences of encapsulation receptors. The characterization of the different silicones studied is accomplished through various techniques, such as: 1) I-V Curve 1) UV-visible-NIR, 2) traction tests, 3) UV exposure.

In this thesis we also evaluated the durability of the HSUN[®] system, particularly its encapsulation. We used a set of accelerated and aggressive tests (*Crash Tests*), in order to detect possible flaws in the HSUN[®] system and therefore induce its redesign, to prepare the system for the certification tests.

The HSUN[®] receiver presented some failures during the durability tests and some redesign is required. In the silicone characterization tests, the Elastosil RT[®] 601 presented the best results and is economically viable. The performed tests are good indicators for the on-field performance of the HSUN[®] modules however, the final design and the selected silicone can only be definitely approved after successful completing all the IEC62108 tests.

Keywords: CPV; Encapsulants; Silicone; Durability

Índice de Matérias

Resumo	vii
Abstract.....	ix
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas	xvii
Abreviaturas.....	xix
1 Introdução	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Motivação	1
1.3 Objectivos	1
1.4 Contribuições.....	2
1.5 Estrutura.....	2
2 Estado de Arte.....	5
2.1 Energia Solar Fotovoltaica – Sistema Energético.....	5
2.2 Tecnologias FV.....	7
2.2.1 Células Solares.....	7
2.3 Sistemas de Concentração Fotovoltaica.....	12
2.3.1 Descrição das Tecnologias de Concentração	13
2.4 Certificação e Qualidade de Sistemas Fotovoltaicos	16
2.4.1 Norma para Sistemas de Concentração Fotovoltaica.....	18
2.5 Materiais de Encapsulamento	21
2.5.1 Silicones.....	23
3 Definição do Processo de Produção de Silicones	35
3.1 Silicones e suas Propriedades	35
3.2 Testes Preliminares	37
3.3 Verificação de Anomalias no Processo de Produção dos Silicones a Curto Prazo	41
3.4 Descrição do Procedimento Final para Preparar Encapsulamentos com Silicóne	44
4 Metodologia para Caracterização de Silicones	47
4.1 Curva I-V de uma Célula Solar.....	47

4.1.1	Procedimento Experimental.....	47
4.2	Espectroscopia UV-Visível-NIR.....	48
4.2.1	Procedimento Experimental.....	48
4.3	Ensaio de Tracção	49
4.3.1	Procedimento Experimental.....	49
4.4	Exposição à luz UV	51
4.4.1	Procedimento Experimental.....	51
5	Análise e Discussão dos Resultados	53
5.1	Importância de um encapsulante numa célula solar.....	53
5.2	Características Ópticas do Silicene.....	55
5.2.1	Espectroscopia IV-Visível-NIR	55
5.3	Características Mecânicas do Silicene.....	65
5.3.1	Ensaio de resistência mecânica em tracção	65
5.4	Exposição ao UV	67
6	Avaliação dos Silicenes de acordo com a Norma IEC 62108.....	71
6.1	<i>Crash Tests</i>	72
6.1.1	<i>Damp Heat</i>	72
6.1.2	<i>Thermal Cycling</i>	75
6.1.3	<i>Ultraviolet conditioning</i>	77
6.2	Pré-Certificação	79
7	Conclusões	81
7.1	Trabalhos Futuros	82
8	Bibliografia	83
	Anexos	87

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Evolução da capacidade anual instalada da energia solar fotovoltaica, em alguns países .	5
Figura 2.2 – Evolução histórica da potência instalada das centrais de produção de energia eléctrica, em Portugal, nomeadamente da energia solar fotovoltaica	6
Figura 2.3 – Exemplos de células monocristalinas	8
Figura 2.4 – Eficiência das células solares dos últimos anos.....	9
Figura 2.5 – Representação da curva I-V e P-V de uma célula.	10
Figura 2.6 – Diferentes configurações dos sistemas de concentração.	12
Figura 2.7 – Sistemas de alta concentração.	14
Figura 2.8 – HSUN [®] tecnologia em desenvolvimento pela WS Energia.....	15
Figura 2.9 – Sistemas de média concentração.	15
Figura 2.10 – Sistemas de baixa concentração.	16
Figura 2.11 – Cronologia das normas para CFV.	19
Figura 2.12 – Metodologia geral para certificação de um produto.	20
Figura 2.13 – Células de CdTe submetidas a 60° C e 90% RH: a) Eficiência da célula; b) Factor de forma.....	21
Figura 2.14 – Exemplo da configuração de um módulo convencional.....	22
Figura 2.15 – Estrutura molecular típica do silicone.	24
Figura 2.16 – Estrutura molecular do Polidimetilsiloxanos.....	24
Figura 2.17 – Estrutura molecular do difenildimetilpolisiloxano.	25
Figura 2.18 – Mecanismo de reacção que ocorre durante a cura	25
Figura 2.19 – Comparação da transmitância do silicone, EVA e vidro, com 1 mm de espessura, representação do comportamento do espectro AM 1.5.....	28
Figura 2.20 – Transmitância em função do c.d.o. após exposição UV com radiação de 190 mW/cm ² , temperatura entre 75°C-90°C: a) Elastómero PDMS; b) Elastómero com grupo fenil. .	28
Figura 2.21 – Máquina de tracção <i>Autograph AG-IS SHIMADZU 20 KN</i>	30
Figura 2.22 – Esquema de funcionamento de uma máquina de tracção.	30
Figura 2.23 – Extensão de um cilindro submetido a uma força de tracção uniaxial	31
Figura 2.24 – Diagrama tensão-deformação para o Sylgard [®] 184.....	32
Figura 2.25 – Instrumentos para realizar testes de adesão <i>Peel Strenght</i>	34
Figura 3.1 – Sub-receptor do módulo HSUN [®] , encapsulado com o Elastosil Solar [®] 3210.....	38
Figura 3.2 – Principais problemas encontrados no sub-receptor	40
Figura 3.3 – Extremidade com um corte direito no protótipo HSUN [®] , com o uso de teflon.....	41
Figura 3.4 - Existência de bolhas: a) Junto à célula e ao Ribbon; b) Junto à periferia da parte superior do encapsulante.....	42
Figura 4.1 – Simulador onde se realizou a medição das curvas I-V.	47

Figura 4.2 – Traçador de curvas I-V	48
Figura 4.3 – Espectrofotômetro utilizado nas medições da transmitância e reflectância.....	48
Figura 4.4 – Esferas integradoras: a) Permite determinar a transmitância; b) Permite determinar a reflectância.....	49
Figura 4.5 – Máquina de tracção <i>Rheometric Scientific</i> , modelo Minimat – <i>FirmWare</i> 3.1.	50
Figura 4.6 – Instrumentos usados nas medições das dimensões dos provetes.....	50
Figura 4.7 – Amostra de silicone, com uma peça de adaptação para realizar o teste de adesão, na máquina de tracção.	51
Figura 4.8 – Lâmpada UV, para exposição dos silicões à radiação UV.....	51
Figura 5.1 – Curvas I-V da célula solar ao longo da exposição ao meio exterior.....	53
Figura 5.2 – Imagens da célula solar ao longo do tempo de exposição do meio exterior.....	55
Figura 5.3 – Medição de a) Transmitância e b) Absorvância e Reflectância, de um vidro com 2 mm de espessura.....	56
Figura 5.4 – Transmitância do Elastosil RT [®] 601 com espessura de 10 mm: a) Gráfico fornecido pelo produtor; b) Gráfico experimental.	57
Figura 5.5 – Relação entre a transmitância das duas melhores espessuras do silicone Elastosil RT [®] 601, o espectro AM 1.5 e a eficiência quântica da célula de silício, nas radiações do UV, visível e IV.....	58
Figura 5.6 – Relação entre a transmitância da espessura de 0,5 mm do silicone Sylgard [®] 184, o espectro AM 1.5 e a eficiência quântica da célula de silício, nas radiações do UV, visível e IV.....	59
Figura 5.7 – Transmitância do Qsil 216, para a espessura de 2 mm: a) Gráfico fornecido pelo produtor; b) Gráfico obtido experimentalmente.	60
Figura 5.8 – Relação entre a transmitância da espessura de 6 mm do silicone Qsil 216, o espectro AM 1.5, a eficiência quântica da célula de silício, nas radiações do UV, visível e IV.	61
Figura 5.9 – Relação entre a transmitância da espessura de 2 mm do silicone PV-6010, o espectro AM 1.5, a eficiência quântica da célula de silício, nas radiações do UV, visível e IV.	62
Figura 5.10 – Relação entre a transmitância da espessura de 0,5 mm do silicone 1- 2577 Low-VOC, o espectro AM 1.5, a eficiência quântica da célula de silício, nas radiações do UV, visível e IV.....	63
Figura 5.11 – Relação entre as melhores espessuras de cada silicone, o espectro AM 1.5 e a eficiência quântica da célula solar.....	64
Figura 5.12 – Determinação do módulo de Young no ensaio de tracção.....	65
Figura 5.13 – Elastosil [®] RT 601, logo no início do teste de adesão.	66
Figura 6.1 – Metodologia utilizada para certificar o módulo HSUN [®]	71
Figura 6.2 – Sequência dos <i>Crash Tests</i> , durante 3 dias.....	72
Figura 6.3 – Representação dos principais parâmetros durante o teste do <i>damp heat</i> , na primeira fase do teste.	73

Figura 6.4 – Representação dos principais parâmetros durante o teste do <i>damp heat</i> , na segunda fase do teste.	73
Figura 6.5 – Curvas I-V do sub-receptor ao longo do teste do <i>damp heat</i>	74
Figura 6.6 – Defeitos visuais após testes de <i>damp heat</i> : a) Aparecimento de bolhas; b) Efeitos da penetração da humidade na fita condutora térmica.....	74
Figura 6.7 – Condições de temperatura e humidade relativa a que os sub-receptores foram sujeitos no teste do <i>thermal cycle</i> (frequência 10 ciclos).....	75
Figura 6.8 – Curvas I-V, medidas durante o teste do <i>thermal cycling</i>	76
Figura 6.9 – Fotografias da célula solar capturadas pela técnica da electroluminescência.....	76
Figura 6.10 – Resultados após teste <i>thermal cycling</i> : a) Aparecimento de delaminações b) Amarelamento da placa de circuito impresso.	77
Figura 6.11 – Componentes utilizados na realização do teste <i>ultraviolet conditioning</i>	77
Figura 6.12 – Representação dos principais parâmetros do teste <i>ultraviolet conditioning</i> , nomeadamente a radiação acumulada que é acumulada em UV-A, UV-B e UV-C.	78
Figura 6.13 – Curvas I-V ao longo do teste <i>ultraviolet conditioning</i>	79
Figura 6.14 – Curvas I-V antes e após teste UV.	79
Figura 6.15 – Sequência de testes para pré-certificação, durante 1 mês.	80

Índice de Tabelas

Tabela 1.1 – Descrição do conteúdo que se encontra em anexo.	3
Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens da tecnologia FV.	7
Tabela 2.2- Descrição das classes CFV de acordo com o seu factor de concentração	13
Tabela 2.3 – Normalização para sistemas FV.	18
Tabela 2.4 – Descrição de testes descritos na norma, com o seu respectivo objectivo.	20
Tabela 2.5 – Vantagens e desvantagens da Espectroscopia UV-VIS-NIR.	27
Tabela 2.6 – Módulo de elasticidade para o Sylgard 184 e RTV 615.	32
Tabela 3.1 – Propriedades físicas, mecânicas, eléctricas e térmicas dos silicones estudados.	36
Tabela 3.2 – Temperatura e tempo de cura para cada encapsulante	37
Tabela 3.3 – Descrição geral dos testes realizados a silicones.	39
Tabela 3.4 – Etapas de resolução do problema do aparecimento de bolhas.	43
Tabela 3.5 – Resolução do problema das delaminações, com a aplicação de <i>primer</i>	44
Tabela 3.6 – Tempo de vida útil para cada silicone.	45
Tabela 3.7- Proporção da parte A e parte B dos vários encapsulantes.	45
Tabela 3.8– Tempo de mistura da parte A e parte B de cada encapsulante.	45
Tabela 5.1- Comparação entre os parâmetros eléctricos da célula obtidos pela curva I-V.	53
Tabela 5.2– Síntese dos parâmetros ópticos, para o Elastosil RT [®] 601.	57
Tabela 5.3– Síntese dos parâmetros ópticos, para o Sylgard [®] 184.	59
Tabela 5.4– Síntese dos parâmetros ópticos, para o Qsil 216.	60
Tabela 5.5– Síntese dos parâmetros ópticos, para o PV-6010.	61
Tabela 5.6– Síntese dos parâmetros ópticos, para o 1-2577 Low-VOC.	62
Tabela 5.7– Síntese dos valores de transmitância, de cada silicone e das suas diferentes espessuras, para o intervalo de c.d.o de 400 a 820 nm.	63
Tabela 5.8– Síntese dos valores de transmitância, de cada silicone e das suas diferentes espessuras, para o intervalo de c.d.o de 290 a 399 nm.	64
Tabela 5.9– Comparação do módulo de Young para os diferentes silicones.	66
Tabela 5.10 – Resumo da transmitância de cada silicone no intervalo de c.d.o de 300 a 399 nm, ao longo do tempo de exposição à radiação UV.	67
Tabela 5.11- Resumo da transmitância de cada silicone no intervalo de c.d.o 400 a 899 nm, ao longo do tempo de exposição à radiação UV.	67
Tabela 5.12 - Resumo da transmitância de cada silicone no intervalo de c.d.o 900 a 1500 nm, ao longo do tempo de exposição à radiação UV.	68
Tabela 5.13 – Resumo dos resultados dos testes, realizados aos silicones ao longo desta tese.	70

Abreviaturas

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CdTe	Telureto de Cádmió
CIGS	Cobre-Índio-Gálio-Selénio
CEMOP	<i>Center of Excellence in Microelectronics Optoelectronics and Processes</i>
CFV	Concentração Fotovoltaica
CuInSe ₂	Seleneto de Cobre e Índio
c.d.o	Comprimento de onda
EVA	Acetato de etileno vinil
FCT	Faculdade de Ciências Tecnologia
FV	Fotovoltaico
GaAs	Arseneto de gálio
HCPV	Alta Concentração Fotovoltaica
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
I&D	Investigação e desenvolvimento
IV	Infravermelho
I-V	Curva corrente-tensão
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LGBC	<i>Laser Groove Burried Contacts</i>
NIR	Near Infrared
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
PDMS	Polidimetilsiloxanos
PVB	Polivinilbutiral
P-V	Potência-tensão
RH	Humidade Relativa
Tg	Temperatura de transição vítrea
TiO ₂	Dióxido de titânio
UNSW	<i>University of New South Wales</i>
UV	Ultravioleta
ZSW	<i>Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung</i>

Símbolos

A	Absorvância
A_{cel}	Área da célula
A_0	Área da secção transversal do provete no estado de repouso
C	Concentração
E	Módulo de elasticidade
ϵ	Extensão
F	Força de tracção
FF	Fill Factor
I	Feixe de radiação transmitida através da amostra
I_m	Corrente máxima
I_{sc}	Corrente de curto-circuito
I_0	Feixe de radiação incidente
I_0	Corrente de saturação
J_{sc}	Densidade de corrente curto-circuito
K	Constante de Boltzman
l_0	Comprimento inicial da amostra
N	Factor do díodo
$P_{m\acute{a}x}$	Potência eléctrica gerada
P_{luz}	Potência luminosa incidente
Q	Carga do electrão
R	Reflectância
R_{SH}	Resistência shunt
R_S	Resistência serie
Σ	Tensão
T	Temperatura
T_r	Transmitância
V_{OC}	Tensão de circuito aberto
V_m	Tensão máxima
η	Rendimento de conversão

1 Introdução

1.1 Contexto

Actualmente o panorama energético mundial tem como base o consumo de combustíveis fósseis. Estas fontes de energia são prejudiciais ao meio ambiente, para além de serem recursos limitados. Assim, é importante a substituição das energias fósseis por energias renováveis.

A presente dissertação de mestrado pretende contribuir para a evolução da ciência e técnica dos sistemas fotovoltaicos, e assim aumentar a sua eficiência e penetração no mercado. A presente dissertação foi desenvolvida em contexto de trabalho laboral, em colaboração com o grupo de investigação e desenvolvimento (I&D) da WS Energia, no desenvolvimento de um novo concentrador fotovoltaico (CFV), HSUN[®].

1.2 Motivação

A WS Energia dedica-se à concepção, desenvolvimento, produção e comercialização de produtos e sistemas fotovoltaicos de alta tecnologia. Apresentando as melhores perspectivas de sucesso no ramo das energias renováveis, a WS Energia está a desenvolver um módulo fotovoltaico de concentração, o HSUN[®]. De entre os muitos componentes do módulo HSUN[®], o encapsulante é muito importante para a sua performance e é crítico para a sua durabilidade. Assim, a WS Energia necessita de aprofundar o conhecimento sobre encapsulantes para módulos CFV com vista à selecção do encapsulante para integrar o módulo HSUN[®].

1.3 Objectivos

O objectivo principal é adquirir conhecimento sobre o encapsulamento de módulos CFV e contribuir para a selecção do encapsulante (silicone) a utilizar no receptor do módulo HSUN[®] e definir o seu processo de produção.

Assim, será necessário realizar vários ensaios aos diferentes silicones disponíveis para apurar as suas características de performance e de durabilidade. Estes testes deverão ser bons indicadores para o desempenho nos testes da norma IEC 62108 e, conseqüentemente para o desempenho do sistema em serviço.

Caso seja pertinente, deverão ser propostas alterações ao desenho dos módulos HSUN[®] para melhorar a sua performance e durabilidade.

1.4 Contribuições

Deste trabalho resultaram as seguintes contribuições:

- Definição do processo de preparação dos vários silicones.
- Estudo comparativo entre vários silicones para integrar o módulo HSUN[®].
- Definição de uma gama de testes a integrar os *Crash Tests*.
- Aplicação dos *Crash Tests* ao silicone Elastosil[®] RT 601.

Algumas partes deste trabalho foram apresentadas na 26th *European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2011*, Hamburg, Alemanha [1]. O artigo e o poster “PRE-CERTIFICATION OF HSUN[®] MODULE ACCORDING TO IEC 62108” estão apresentados no anexo I.

1.5 Estrutura

Esta tese está dividida em sete capítulos principais, aos quais se acrescentam a bibliografia e os oito anexos.

Capítulo 1 apresenta uma visão geral do contexto da presente tese, incluindo o seu objectivo.

Capítulo 2 apresenta um panorama geral das tecnologias da energia solar fotovoltaica (FV) e CFV, incluindo as suas normas de certificação. Este capítulo inclui também materiais de encapsulamento, dando especialmente ênfase aos silicones, onde se demonstra a descrição das suas principais características.

Capítulo 3 apresenta as principais características físicas, mecânicas, eléctricas e térmicas dos silicones estudados e a descrição do procedimento experimental final estudado para realizar encapsulamentos com silicone, bem como os problemas encontrados na obtenção desse mesmo procedimento.

Capítulo 4 contém a descrição das metodologias desenvolvidas na caracterização dos silicones.

Capítulo 5 apresenta e discute os resultados obtidos nos testes de caracterização dos silicones.

Capítulo 6 apresenta a descrição de testes acelerados e agressivos, denominados por *Crash Tests* aos receptores do módulo HSUN[®], estes são adaptados à norma IEC 62108.

Capítulo 7 ilustra as principais conclusões retiradas deste trabalho, bem como sugestões para futuros desenvolvimentos.

Este trabalho é ainda composto por oito anexos, a Tabela 1.1 apresenta o que consta em cada um dos anexos.

Tabela 1.1 – Descrição do conteúdo que se encontra em anexo.

Anexo	Conteúdo
I	Artigo e poster apresentados na 26 th <i>European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2011</i>
II	Datasheets dos Silicones
III	Relatórios “Testes Preliminares”
IV	Relatório “Inspeção Visual – Receptores”
V	Relatório “Encapsulamentos: Vácuo – Adesão”
VI	Descrição experimental detalhada para a preparação de silicones
VII	Resultados obtidos pela técnica da espectroscopia, a várias espessuras dos diferentes silicones estudados.
VIII	Estudo da transmitância aos diversos silicones estudados ao longo do teste de exposição UV

2 Estado de Arte

2.1 Energia Solar Fotovoltaica – Sistema Energético

O desenvolvimento das actividades económicas, a exploração de recursos de energia limitados e poluentes, como por exemplo os combustíveis fósseis, estão a provocar graves problemas ambientais. Assim, perante este cenário e com o crescente aumento do consumo de energia e a dependência de recursos energéticos não renováveis, surge a necessidade da adopção de fontes de energia mais limpas e menos dependentes de fontes esgotáveis. Estas designam-se por energias renováveis, cuja taxa de utilização é inferior à taxa de renovação. Estas permitem uma redução de gases com efeitos de estufa e a dependência de fontes energéticas externas.

Como exemplo de uma energia limpa, existe a energia (FV). Esta forma de energia utiliza células solares para converter a luz em electricidade [2]. Quanto maior for a intensidade de luz, maior será a corrente eléctrica gerada.

Esta forma de energia já se encontra instalada em praticamente todo o mundo. Em 2010 a capacidade instalada cresceu muito rapidamente, destacando-se um crescimento elevado na Europa, que supera os 29 GW e lidera o mercado FV com uma percentagem de cerca de 70% do total. Em 2010, a capacidade instalada de solar fotovoltaica apresenta uma variação entre 17 e 19 GW, representando este valor a rede do mercado fotovoltaico (Figura 2.1) [3].

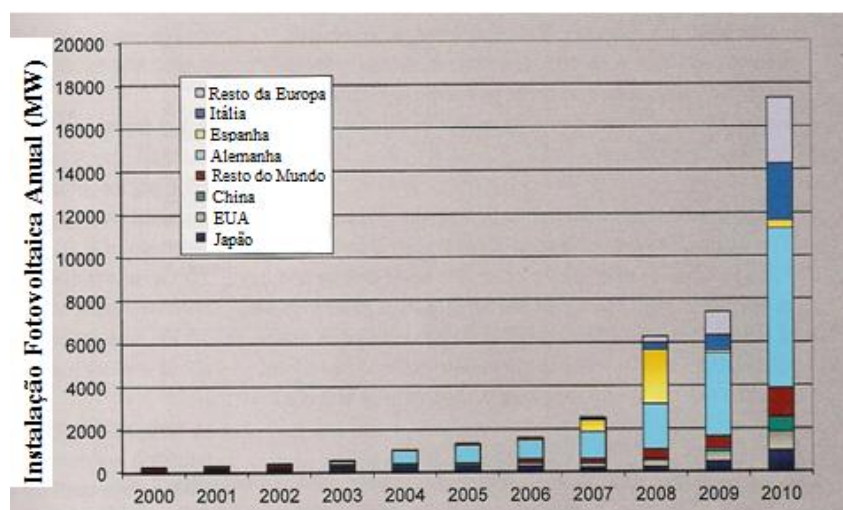


Figura 2.1 – Evolução da capacidade anual instalada da energia solar fotovoltaica, em alguns países [3].

A capacidade instalada desta forma de energia têm tendência a crescer, devido as seguintes razões [4]:

- Elevada taxa de aprendizagem no sector e conseqüente desenvolvimento de tecnologias;
- Redução de custos e crescente competitividade face à geração fóssil;
- Recurso abundante.

Em Portugal, o mercado fotovoltaico não têm sofrido grandes avanços significativos. Na Figura 2.2 visualiza-se a potência instalada da energia solar fotovoltaica desde 1995 até 2011[5].

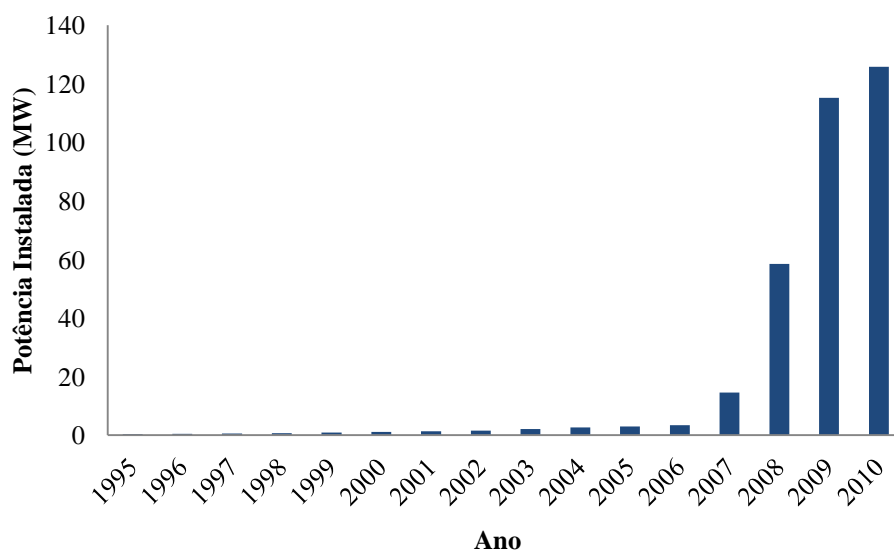


Figura 2.2 – Evolução histórica da potência instalada das centrais de produção de energia eléctrica, em Portugal, nomeadamente da energia solar fotovoltaica [5] .

Em 2003 a capacidade instalada em Portugal era apenas de 2,07 MW, mas com o sistema de incentivos à produção de energia existente por parte da União Europeia, por exemplo a energia produzida em excesso pode ser vendida à companhia eléctrica, começa-se a verificar o aumento de produção da energia fotovoltaica e a construção de centrais fotovoltaicas em Portugal. Atingindo em 2010 uma potência instalada de 125,80 MW [5].

As principais centrais em Portugal são a central da Amareleja, localizada no concelho de Moura, a qual possui uma potência instalada de 46 MW e a central instalada em Brinches, concelho de Serpa, com uma potência de 11 MW [6].

De uma forma geral, o cenário de evolução da capacidade instalada FV a nível mundial tende a continuar a evoluir. Prevê-se uma capacidade instalada de 77 GW em 2020 e 156 GW em 2030 [4].

2.2 Tecnologias FV

Os sistemas FV, como já foi referido, têm como objectivo converter directamente a luz solar em electricidade, sendo o módulo fotovoltaico o seu componente principal. Este é constituído por células solares, estas por sua vez são compostas por um material semiconductor, normalmente de silício, que se carrega electricamente quando submetido à luz solar, origina assim electricidade através do efeito fotoeléctrico.

Qualquer tecnologia apresenta vantagens e desvantagens. Na Tabela 2.1 mostra as principais vantagens e desvantagens da tecnologia FV [7].

Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens da tecnologia FV [7].

Vantagens	Desvantagens
Ausência de poluição	Baixo rendimento
Não produz cheiros ou ruídos	Custo de produção dos painéis
Estruturas robustas	-
Design simples que requer uma baixa ou nenhuma manutenção	-

Apresenta também como uma grande vantagem a construção de sistemas autónomos. Isto é, sistemas que operam isoladamente a energia eléctrica. Assim, estes podem ser utilizados nos sistemas de bombeamento de água, sinalização e para alimentação de sistemas de telecomunicação. Com este sistema é possível fornecer energia eléctrica a lugares remotos, onde os custos da montagem de linhas eléctricas são superiores ao sistema fotovoltaico, ou existe a impossibilidade deste tipo de fornecimento[7].

Em seguida serão descritas algumas das tecnologias relacionadas com o FV, com especial ênfase nas tecnologias utilizadas pela WS Energia.

2.2.1 Células Solares

Actualmente existem várias tecnologias de células solares. A tecnologia das células de silício tem sido as mais dominantes, na aplicação de módulos fotovoltaicos. Estas podem ser de diferentes tipos monocristalinas, policristalinas e amorfas. Além disso, existe uma diferença nos valores de eficiência entre os três tipos de silício. Tipicamente o silício monocristalino apresenta eficiências entre os 15% e os 18%, e é utilizado em todo o tipo de aplicações terrestres de média e elevada potência. O silício policristalino é uma alternativa um pouco menos dispendiosa, mas também com eficiências um pouco

inferiores entre 12% a 15% [8]. As células de silício amorfo apresentam eficiências entre 5 a 7% [2]. Na Figura 2.3 é possível visualizar dois exemplos de células monocristalinas.

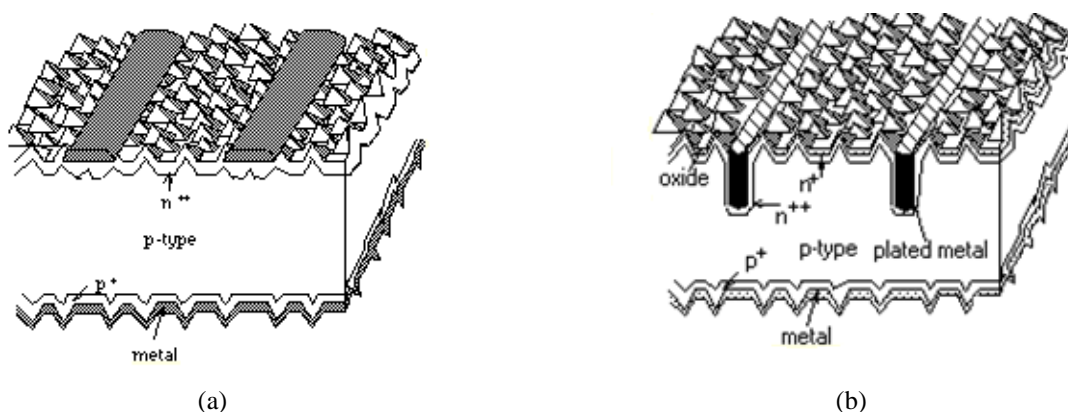


Figura 2.3 – Exemplos de células monocristalinas: a) célula convencional de *screen printed*; b) célula contacto enterrado (LGBC - *Laser Groove Buried Contacts*) [9].

A Figura 2.3a) mostra uma célula convencional monocristalina, nesta configuração os contactos são de prata e impressos por *screen printing* fazendo uma grelha metálica. O facto deste tipo de contacto não realizar um bom contacto óhmico com o silício e ainda o grande sombreamento da superfície da célula, levou a que a eficiência deste tipo de célula ficasse limitada a cerca de 14% [10]. A optimização deste ponto levou à definição de contactos optimizados através de processos fototipográficos ou laser, como mostra a Figura 2.3b). Devido a estes contactos serem enterrados haverá menos sombra na superfície da célula, levando a uma diminuição da resistência em serie da célula, o que consequentemente gera uma maior eficiência [11].

Na tecnologia de película fina ou filmes finos as células são constituídas por camadas finas de semicondutores aplicadas sobre substratos rígidos, isto designa-se por electrodeposição. Estas apresentam como vantagens a redução do custo de produção das células solares, pois como os filmes são muito finos a quantidade de material semiconductor necessário é muito reduzido, quando comparado com as células de silício. Os materiais mais usados nesta tecnologia são: Arseneto de gálio (GaAs), cobre, Telureto de Cádmio (CdTe), DiSeleneto de Cobre e Índio (CuInSe_2) e dióxido de titânio (TiO_2). No instituto ZSW (*Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung*), na Alemanha, as células solares de filme fino atingiram este ano um record de 20,3% [12] de eficiência (Figura 2.4). A Figura 2.4 mostra um resumo da progressão da eficiência das células solares das várias tecnologias, ao longo dos últimos anos.

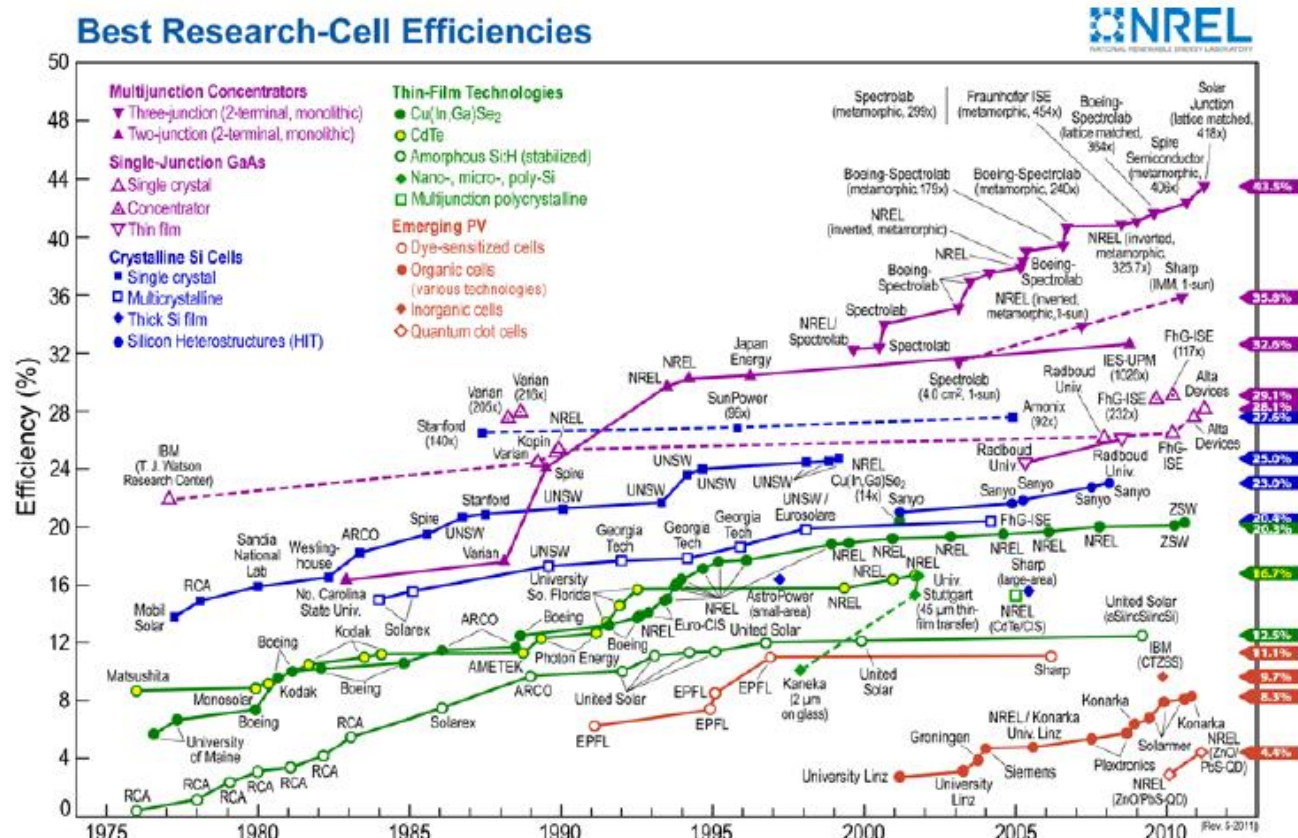


Figura 2.4 – Eficiência das células solares dos últimos anos [12].

Existem ainda as células de concentração, ou seja, as de multijunção que possuem o record de eficiência, de 43,5% [12]. A célula de maior eficiência foi testada em Abril deste ano pelo instituto *Solar Junction*, sediado na Califórnia. Estas possuem maior eficiência, porque estas células são compostas por vários materiais, como o Arsénio e Gálio, de modo a obter maior absorção de luz nas diferentes regiões do espectro solar. Consequentemente, estas células tornam-se mais dispendiosas.

As células de silício monocristalino fabricadas pela empresa Amonix em 2005 atingiram 27,6% [12] de eficiência. As células de silício policristalino do Instituto de *Fraunhofer* e as células de filme fino CIGS (Cobre-Índio-Gálio-Selénio) da NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) apresentam ambas um rendimento de 20,4% e 20,3% [12] respectivamente.

Parâmetros Eléctricos das Células Solares

A avaliação da qualidade e desempenho das células solares pode ser observada através da sua curva característica. Esta curva pode ainda ser denominada por curva corrente-tensão (I-V) e representa

graficamente a corrente gerada em função da tensão. Na Figura 2.5 encontra-se a representação gráfica de uma curva I-V e uma curva potência-tensão (P-V) de uma determinada célula solar.

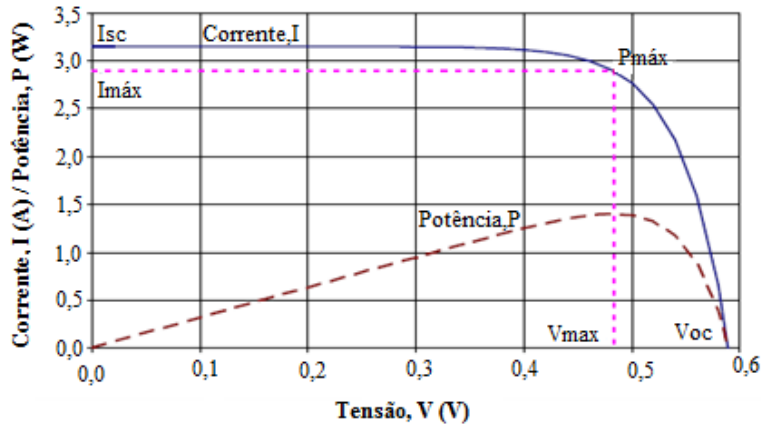


Figura 2.5 – Representação da curva I-V e P-V de uma célula.

A curva I-V fornece parâmetros externos que são usualmente utilizados para caracterização eléctrica das células solares [13].

O V_{OC} (tensão de circuito aberto) é medido quando não existe passagem de corrente no módulo, ou seja, trata-se do valor máximo de tensão aos terminais da célula e é medido quando a $I = 0$. Como tal, pode obter-se a equação (1) [10],

$$V_{oc} = \frac{nKT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0}\right) + 1 \quad (1)$$

onde k é a constante de Boltzman ($1,38066 \times 10^{-23}$ J/K), T a temperatura (K), n é o factor do díodo, q é a carga do electrão ($-1,602177 \times 10^{-19}$ C), I_0 a corrente de saturação (A) e I_{SC} a corrente de curto-circuito (A).

O I_{SC} (corrente de curto-circuito) é obtido quando a célula se encontra em curto-circuito, ou seja, corresponde ao máximo de corrente que o dispositivo atinge, quando a tensão é nula. A sua expressão (2) é a seguinte [14]:

$$I_{sc} = J_{sc} \cdot A_{cel} \quad (2)$$

onde,

J_{SC} é a densidade de corrente curto-circuito (A/cm^2)

A_{cel} é a área da célula (cm^2)

O FF (Fill Factor) é o parâmetro que define a razão entre a potência máxima atingida pelo dispositivo e a potência teórica. Como o valor da potência teórica é sempre superior ao da potência máxima, o FF é sempre inferior a um. Quanto maior o FF, maior o rendimento da célula. Este parâmetro pode então ser definido pela seguinte expressão (3) [10]:

$$FF = \frac{P_{máxima}}{P_{teórica}} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (3)$$

onde V_m e I_m representam os valores no ponto onde a potência é máxima.

A eficiência de conversão ou rendimento é definida como a razão entre a potência eléctrica gerada ($P_{máx}$) e a potência luminosa incidente (P_{luz}) (4) [10].

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{incidente}} * 100 \Leftrightarrow \eta = \frac{P_{máx}}{P_{luz}} \Leftrightarrow \eta = \frac{V_m \cdot I_m}{P_{luz}} \quad (4)$$

Para além dos parâmetros eléctricos já descritos, pode ainda ser obtido através da curva I-V a resistência shunt (R_{SH}) e a resistência em série (R_S). A R_{SH} é um parâmetro associado a fugas de corrente, devido a, por exemplo defeitos de fabrico ou imperfeições na célula. Uma R_{SH} baixa provoca perdas de potência nas células solares, o que consequentemente leva a uma quebra na eficiência da célula. Numa célula solar que apresenta um correcto funcionamento, o valor de R_{SH} deve ser elevado (idealmente seria infinito), sendo a sua expressão (5) a seguinte [13]:

$$R_{SH} \cong \left(\frac{\partial V}{\partial I} \right)_{I_0} \quad (5)$$

No que respeita a R_S , esta resistência encontra-se associada aos contactos metálicos da célula, levando a que influencie directamente o FF da célula solar, levando à sua diminuição. Consequentemente, esta resistência leva à diminuição do I_{sc} . Assim, o ideal seria este parâmetro possuir um valor baixo, tendendo para o valor nulo ($R_S = 0$). A sua expressão (6) é a seguinte [13]:

$$R_S = \left(\frac{\partial V}{\partial I} \right)_{V_0} \quad (6)$$

O FF é um parâmetro fundamental para avaliar o desempenho das células, isto porque tem especial importância na qualidade do material, devido a estar dependente da R_{SH} e da R_S da célula. Idealmente um FF seria igual 1, quando $R_S = 0$ e $R_{SH} = \infty$. Assim, maior seria a energia eléctrica produzida, logo teria maior eficiência de conversão. Esta eficiência de conversão, pode ser aumentada através de sistemas CFV.

2.3 Sistemas de Concentração Fotovoltaica

Os sistemas CFV consistem numa tecnologia que utiliza uma estrutura de espelhos ou lentes. Estes permitem, concentrar a radiação da luz solar numa dada superfície de células solares. Além disto, também possuem um mecanismo para dissipar o excesso de calor e vários contactos. Esta unidade base pode ser combinada em módulos de diferentes tamanhos e formas [15], devido aos espelhos possuírem diferentes configurações. A Figura 2.6 mostra vários esquemas das configurações mais típicas.

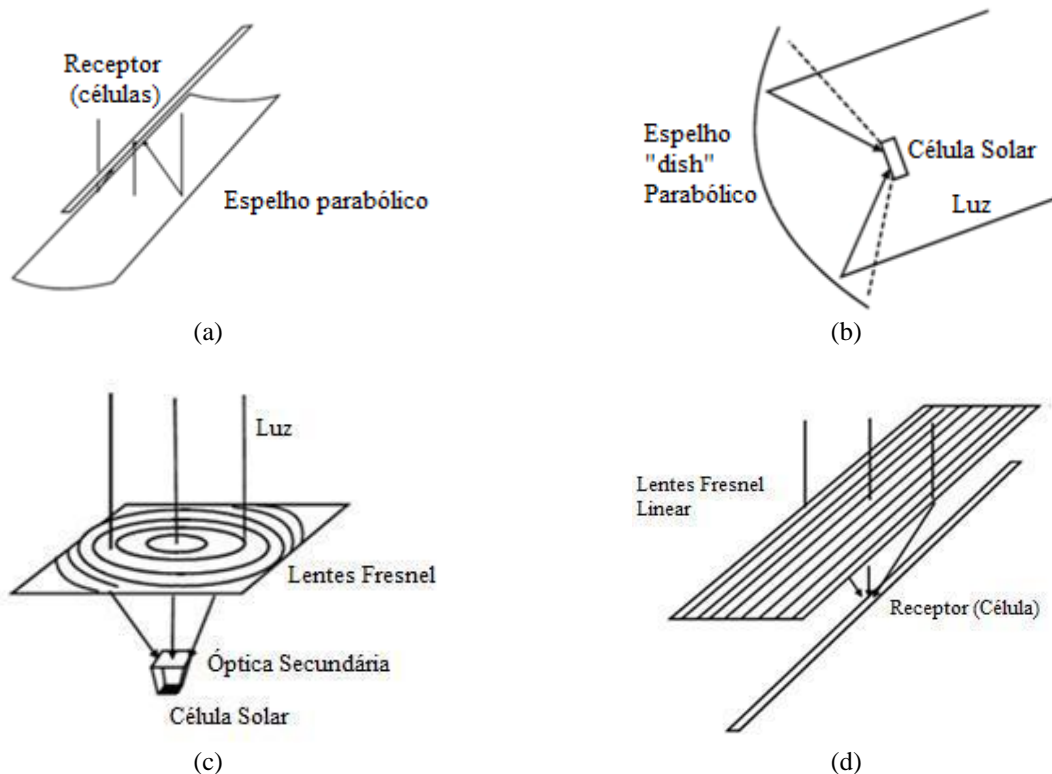


Figura 2.6 – Diferentes configurações dos sistemas de concentração: a) Espelho parabólico linear; b) Espelho parabólico em disco; c) Lente de fresnel circular; d) Lente de fresnel linear [14].

Esta tecnologia, em geral, tem associado ao seu funcionamento um mecanismo de seguimento solar necessária para aumentar e rentabilizar o investimento. Assim, o seguidor solar permite aos concentradores tirarem partido da máxima radiação incidente nas células solares, desde o nascer até ao pôr-do-sol, aumentando assim a eficiência do sistema [10].

Este tipo de tecnologia apresenta diversas vantagens tais como [16]:

- Maior eficiência de conversão energética;
- Menor dependência dos stocks de componentes à base de silício;
- Redução de peso da indústria pesada de produção de silício;
- Redução de custos, devido à diminuição da área das células solares (representam o componente mais caro do sistema). Estas são substituídas por materiais concentradores mais baratos.

2.3.1 Descrição das Tecnologias de Concentração

As tecnologias CFV variam muito consoante o tipo de células, o índice de concentração, o tipo de óptica (refractiva ou reflexiva), assim como sua geometria [12]. São geralmente classificadas em três categorias principais: alta, média e baixa concentração. Na Tabela 2.2 apresenta os tipos de células fotovoltaicas e o índice de concentração para cada classe.

Tabela 2.2 – Descrição das classes CFV de acordo com o seu factor de concentração [12].

Classe de CFV	Índice de Concentração Típica	Tipo de Célula
Alta concentração	> 400X	Multijunção
Média concentração	~3X- 100X	Silício ou outras células
Baixa concentração	< 3X	Silício

A tecnologia de alta concentração fotovoltaica (HCFV) representa a tecnologia associada aos concentradores solares com elevada eficiência. Os diferentes tipos de sistemas de alta concentração ($C > 400X$), apresentam características comuns, tais como: óptica 3D e menor número de células, o que implica material óptico mais exigente e um sistema de seguimento de 2 eixos. Além disso, estes sistemas requerem um sistema de refrigeração activo que ocupa grande parte do sistema, implicando custos mais elevados [16].

Na Concentrix Solar, os módulos são constituídos por lentes de Fresnel, que conseguem concentrar a luz 500X [17] e atingem uma eficiência de 27,2% [18] (Figura 2.7a). Na empresa Amonix os módulos são

constituídos por lentes Fresnel, que colectam a luz concentrando-a até 500X [19] da sua intensidade habitual, consegue atingir eficiências entre 23 a 25% [19] nos seus sistemas de concentração (Figura 2.7b). A Solar Systems usa um sistema de espelhos, com uma forma côncava, que concentra a radiação 500X [20] e foca-a num receptor, local onde se encontram as células solares, estas são capazes de atingir os 40% [20] de eficiência (Figura 2.7c).



(a)



(b)



(c)

Figura 2.7 - Sistemas de alta concentração: a) Módulo da empresa Concentrix Solar b) Concentrador referente à empresa Amonix. c) Sistema concentrador “dish”, referente à empresa Solar Systems® [21], [22], [23].

Os sistemas de média concentração (3X -100X) são uma tecnologia em expansão. Esta tecnologia tem como objectivo combinar as vantagens da baixa e da alta concentração, de modo a se conseguir atingir com precisão, com eficiência a produção da energia, através da utilização de células mais baratas. Neste sistema de concentração são usadas células de silício modificadas para concentração, de modo a ser alcançada a eficiência máxima deste sistema [16].

Uma das vantagens da média concentração relativamente à alta concentração centra-se na menor precisão de seguimento o que torna este sistema menos dispendioso em termos de manutenção e operação.

O sistema em desenvolvimento pela WS Energia, o HSUN® (Figura 2.8), é um sistema de média concentração. Este sistema foi projectado para ter um desempenho estável, com o objectivo de obter um preço de electricidade competitivo com o preço fornecido pela rede eléctrica. É um sistema baseado em sete espelhos semi-parabólicos, que reflectem e concentram a radiação solar de 15X nas células de silício desenhadas especificamente para CFV (células de contacto enterrado), que têm de ser protegidas do meio exterior através de materiais encapsulantes. Os espelhos possibilitam ainda um arrefecimento passivo do sistema [24]. Na parte traseira destes espelhos semi-parabólicos estão acopladas as ópticas secundárias (que recebem a luz solar concentrada). Por sua vez, estas ópticas secundárias encontram-se acopladas a

um receptor solar, sendo este componente do sistema onde as células solares se encontram inseridas e conectadas em série, além dos diodos *bypass* (servem como uma protecção ao bom funcionamento do receptor). Cada receptor é composto por três sub-receptores, sendo estes unidades constituintes do receptor.



Figura 2.8 – HSUN[®] tecnologia em desenvolvimento pela WS Energia.

O concentrador ENTECH (Figura 2.9a) com concentração de 20X, usa uma lente de Fresnel que tem como objectivo focar a luz numa linha de células de silício modificadas, com maiores contactos, de modo a que as perdas pelas resistências sejam menores (maiores contactos, maior superfície de passagem de corrente, o que consequentemente origina menores perdas devido a resistências parasitas). Um elemento prismático dieléctrico abrange as células e actua como sistema óptico secundário que direcciona a luz para a célula [16]. Outro exemplo de concentração média é o sistema concentrador EUCLIDES[®] (Figura 2.9). Este sistema é constituído por espelhos em forma de parábola, que atingem uma concentração 50X.



(a)



(b)

Figura 2.9 – Sistemas de média concentração: a) Concentrador ENTECH [25] ; b) Concentrador EUCLIDES[®] [22].

Nos sistemas de baixa concentração normalmente são usados os módulos convencionais, com um ou mais espelhos planos. A tecnologia Double-Sun[®] (Figura 2.10), apresentada pela empresa WS Energia,

consegue concentrar 2X a intensidade da luz nas células solares. Este sistema é constituído por um módulo convencional, um sistema de seguimento de 2 eixos e dois espelhos planos, que aumentam a quantidade de radiação que incide sobre os módulos [26].



(a)



(b)

Figura 2.10 – Sistemas de baixa concentração: a) Double-Sun[®] parque Solar em Itália b) Concentrador Double-Sun[®].

Os CFV têm mostrado uma tendência de crescimento no mercado da energia. Isto deve-se a um desenvolvimento da indústria fotovoltaica. A continuação deste crescimento pode-se tornar um sucesso com a melhoria contínua na tecnologia e com a criação simultânea de normas de padronização que certificam a confiabilidade e durabilidade dos sistemas CFV [27].

2.4 Certificação e Qualidade de Sistemas Fotovoltaicos

A indústria FV encontra-se focada no aumento de confiabilidade e de durabilidade dos módulos. O termo confiabilidade significa uma súbita perda total da capacidade do módulo desempenhar as suas funções, ou seja, perda total da produção de energia eléctrica. No entanto, o termo durabilidade está relacionado com a degradação ambiental que provoca uma perda gradual contínua do seu desempenho [28].

Os módulos fotovoltaicos são fabricados com o um tempo de vida útil de 20 a 25 anos. Existem fabricantes que dão garantias de manufactura nos primeiros 10 anos, assegurando perdas de eficiência não superiores a 10% e nos restantes 15 anos de 20% [29]. No entanto, existe um obstáculo ao desenvolvimento de novos produtos fotovoltaicos e a produtos com um tempo de vida elevado. Isto porque, o tempo necessário para a realização de testes em condições reais, com o objectivo de avaliar a

sua performance ao longo de todo o seu tempo de vida é demasiado longo e impraticável, não sendo possível esperar 20 a 25 anos, para introduzir um produto no mercado. Torna-se necessário antever possíveis problemas de perda de desempenho, revelando uma acumulação de danos resultantes da exposição a longo prazo ao ar livre, provocadas por degradação química, térmica ou mecânica. Assim, para resolução destes problemas torna-se obrigatório o desenvolvimento e utilização de testes acelerados [29]. Sendo, a *International Electrotechnical Commission* (IEC) que normalizou um conjunto de testes acelerados de stress para prever eventuais danos e acelerar o processo de desenvolvimento de módulos FV.

Estes testes acelerados existentes nas normas aplicadas aos sistemas FV são subdivididos em cinco categorias de testes [1]:

- 1- Diagnósticos;
- 2- Eléctricos;
- 3- Climáticos;
- 4- Irradiância;
- 5- Mecânicos.

Estes testes apresentam um critério passa/falha de acordo com as especificações de cada teste a que o módulo é submetido. Alguns exemplos de avaliação da performance podem ser realizados através do desempenho do sistema, perda de performance, segurança, resistência a condições adversas de humidade, temperatura e raios UV. Estes testes possuem durações limitadas, o que significa que estes podem ser concluídos dentro de um período razoável de tempo [29].

Deste modo, passar na sequência de testes de qualificação, significa que o produto atende a um conjunto específico de testes e que este se encontra apto para ser produzido. Como desvantagem, a certificação não garante que a vida útil do produto seja a inicialmente prevista, tornando-se como um dos principais requisitos comerciais de garantia.

A empresa TUV Rheinland PTL, responsável pela certificação de painéis solares, considera que os testes de *stress* acelerado existentes nas normas consistem em dois objectivos [30]:

- 1- Acelerar mecanismos de falha num período de tempo reduzido (6-90 dias);
- 2- Qualificação de curto prazo de problemas no campo, enquanto o teste de qualificação/certificação é impulsionada principalmente pelas exigências do mercado.

Sarah Kurtz do instituto NREL refere que os principais problemas de confiabilidade gerais nas tecnologias FV são [29]:

- Corrosão
- Isolamento inadequado
- Delaminações
- Quebras de vidros
- Falha dos díodos
- Entrada de humidade

Na Tabela 2.3 encontram-se as normas aplicadas aos sistemas FV constituídos por células de silício e por células de filmes finos, com a sua respectiva data de publicação. Além disso, apresenta a norma de segurança.

Tabela 2.3 – Normalização para sistemas FV [31], [32].

Normas		Publicações
IEC 61215	<i>Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (FV) modules – design qualification and type approval</i>	2005
IEC 61646	<i>Thin-film terrestrial photovoltaic (FV) modules – Design qualification and type approval</i>	2008
IEC 61730 ¹	<i>Photovoltaic (FV) module safety qualification, Part 1: Requirements for construction and Part 2: Requirements for testing</i>	2004

2.4.1 Norma para Sistemas de Concentração Fotovoltaica

Com o contínuo desenvolvimento da tecnologia CFV e devido as normas para sistemas FV (IEC 61215 e IEC 61646) possuírem especificações técnicas, que não se mostram adequadas aos diferentes tipos e designs dos sistemas CFV, houve a necessidade de criar uma norma específica para sistemas CFV.

Assim, em 2002 constituiu-se um grupo de trabalho específico com as melhores empresas do ramo de modo a que se conseguisse responder as especificações técnicas do CFV. A norma CFV provém de uma fusão entre duas normas anteriormente lançadas a IEC 61215 e a IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 1513, *Recommended Practice for Qualification of Concentrator Photovoltaic (FV) Receiver Sections and Modules*, que foi desenvolvida por representantes dos EUA, usuários e auditores de tecnologia CFV e engenheiros de laboratórios do governo. Em 2007 surge a primeira norma internacional desenvolvida exclusivamente para certificação da tecnologia CFV, IEC 62108 - *Concentrator photovoltaic (CFV) modules and assemblies – Design qualification and type approval*, com

¹ Projectada para ser coordenada com a norma IEC 61215 e IEC 61646.

o intuito de garantir durabilidade e viabilidade destes sistemas, esta descreve testes e requisitos mínimos necessários para avaliar os módulos fotovoltaicos de concentração [33].

Após o aparecimento de um grande número de tecnologias emergentes [27], o mercado sentiu a necessidade de reformular a norma IEC 62108 devido a esta não se adequar a todos os produtos existentes.

Desde 2009, a WS Energia está incluída no grupo de trabalho (IEC TC82 WG7) que promove a discussão técnica e revisão da IEC 62108. Neste momento, já existe uma revisão (IEC 62108 Draft 1b 2º edição) que está actualmente em curso servindo de base para o trabalho que se irá efectuar durante o decorrer desta dissertação.

Na Figura 2.11 é apresentada uma cronologia sobre a evolução da história das normas para CFV:



Figura 2.11 – Cronologia das normas para CFV.

Na Tabela 2.4 estão descritos alguns dos principais testes da IEC 62108, nos quais assentam esta dissertação. Nesta tabela também constam os principais objectivos a atingir por cada um dos testes e os seus próprios critérios de aprovação.

Tabela 2.4 – Descrição de testes descritos na norma, realizados em laboratório, com o seu respectivo objectivo [34].

	Testes	Objectivos	Principais critérios de aprovação
Testes diagnósticos	<i>Visual inspection</i>	Identifica e determina defeitos visuais do sistema	Não se pode verificar as seguintes alterações físicas: módulos, receptores e espelhos, partidos ou desalinhados; Células partidas; Presença de bolhas; Corrosão; Falhas adesivas. ²
Testes eléctricos	<i>Electrical performance measurement</i>	Identifica o poder de degradação do sistema, após testes. Através do desempenho eléctrico	-
Testes de envelhecimento acelerado	<i>Thermal cycling</i>	Determina a capacidade dos receptores resistirem a incompatibilidade térmica, fadiga causados por mudanças bruscas de temperatura.	Poder de degradação, não deve exceder os 8% ³
	<i>Damp heat</i>	Determina a capacidade de penetração de humidade	Poder de degradação, não deve exceder os 8% ³
	<i>Ultraviolet conditioning</i>	Mostra as possíveis falhas prematuras de integridade física e eléctrica devido à exposição U.V	Poder de degradação, não deve exceder os 5% ³

Caso os critérios não sejam cumpridos, e devido ao critério passa/falha é necessário realizar reformulações ao sistema CFV. O que torna este conjunto de ensaios essenciais, pois permitem resolver problemas encontrados durante a realização dos testes nos sistemas CFV, que podem ser eliminados ou drasticamente reduzidos. O sistema após reformulações é de novo sujeito aos testes e se cumprir com os requisitos, torna-se um sistema certificado [27]. A Figura 2.12 representa um resumo da metodologia utilizada na certificação de um produto.

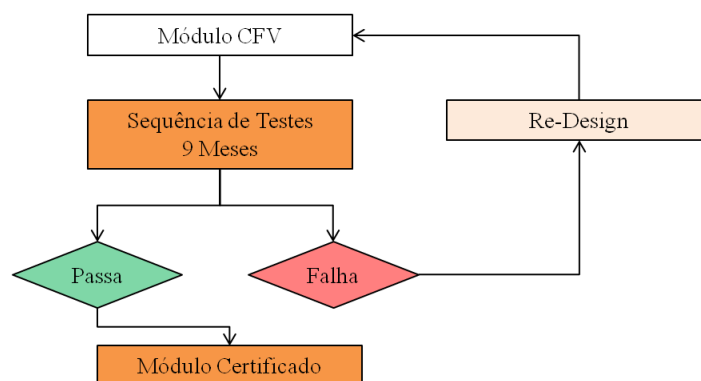


Figura 2.12 – Metodologia geral para certificação de um produto.

² Critérios de avaliação aplicados aos testes de envelhecimento acelerado.

³ Medição da curva I-V realizada em simulador solar.

Na norma actual, existem alguns inconvenientes detectados tais como: a sequência de testes para avaliar a confiabilidade, durabilidade do módulo CFV é demorada e dependem das condições ambientais. Normalmente este problema ocorre no final do ciclo de desenvolvimento, tornando-se uma consideração crítica para comercializar o produto e ainda mais importante no mercado actual em rápido desenvolvimento. Além disso, não é viável o mesmo padrão de testes para uma gama bastante variada de sistemas CFV, isto porque cada sistema tem especificações técnicas diferentes [1].

2.5 Materiais de Encapsulamento

As células solares necessitam de ser protegidas das condições atmosféricas adversas que vão enfrentar durante o seu tempo de vida. Para tal utilizam materiais encapsulantes que as protegem de danos físicos e atmosféricos, para além de proporcionarem resistência mecânica às células.

Em [35] foi realizado um estudo sobre o efeito da água numa célula solar de película fina de CdTe para demonstrar a importância do processo de encapsulamento. Para realização deste teste, a célula foi colocada sem encapsulante numa câmara ambiental, sendo submetida à temperatura de 60°C e 90% de humidade relativa, durante 1000 horas. Foram efectuadas medições das características eléctricas durante o decorrer da experiência que demonstraram alterações nos seus valores.

Os valores de decréscimo de eficiência e do FF ao longo do tempo de *stress* estão representados na Figura 2.13a e Figura 2.13b respectivamente. Este decréscimo deve-se, ao facto de todos os parâmetros eléctricos das células sem encapsulamento e sujeitas a calor húmido serem todos afectados. No caso do FF este decresce, devido a depender do V_{OC} , V_m , I_{SC} e I_m . Com este estudo, prova-se a importância do encapsulante, na eficiência da célula.

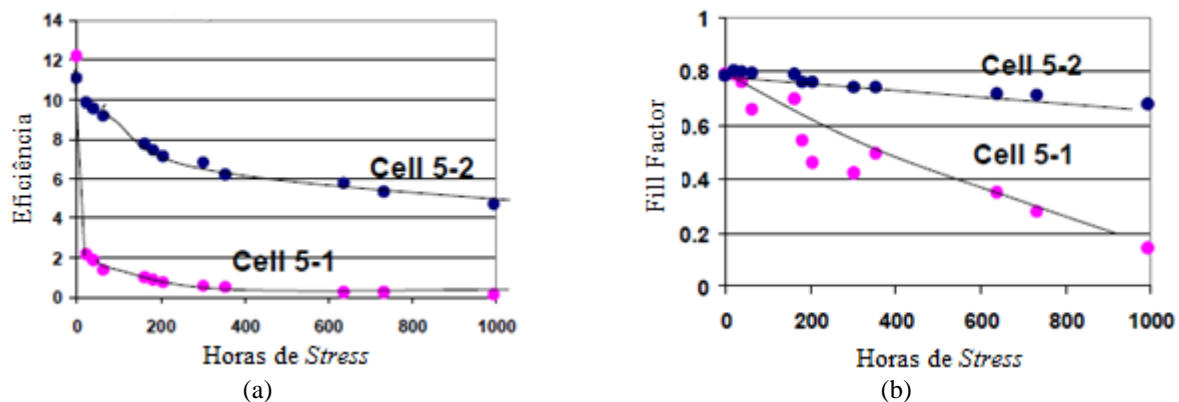


Figura 2.13 – Células de CdTe submetidas a 60° C e 90% RH: a) Eficiência da célula; b) Factor de forma [35].

Em [36] e [37] foram identificadas as propriedades mais importantes que os encapsulantes devem conter:

- A estabilidade a temperaturas elevadas;
- Possuírem uma baixa resistência térmica;
- Ópticamente transparentes;
- Elevada resistência à degradação da radiação UV (UltraVioleta);
- Bons isolantes eléctricos;
- Boa adesão a diferentes materiais;
- Resistirem entre 20 a 30 anos em meio exterior;
- Possuírem um baixo custo.

Existem vários materiais para encapsulamento que são aplicados em células solares, como por exemplo o PVB (polivinilbutiral), EVA (acetato de etileno vinil) e os silicones.

O PVB foi usado pela primeira vez em módulo FV, na década de 1970. Possui boas qualidades, tais como boa aderência (forma pontes de hidrogénio com o vidro), elevada resistência à radiação UV o que permite uma desejada durabilidade. No entanto, o PVB deixou de ser utilizado devido a ser demasiado higroscópico, provocando uma perda de transmitância, na região do visível [38]. Assim, os produtores de FV começaram a investir em EVA. Sendo actualmente o EVA um polímero muito usado na indústria do FV, devido a possuir excelentes propriedades ópticas, mecânicas e físicas e ter um preço competitivo que permite ter uma alta escala de produção. O EVA é normalmente fornecido em folhas poliméricas que encapsulam as células solares. Como é sensível à água podendo gerar compostos secundários afectando a sua qualidade, necessita de ser protegido com backsheet e vidro. A Figura 2.14 demonstra os componentes de um módulo convencional, incluindo o EVA [14].

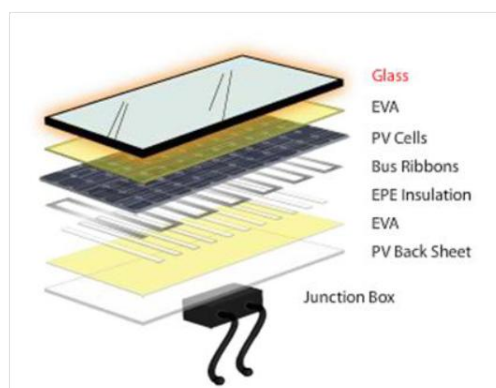


Figura 2.14 – Exemplo da configuração de um módulo convencional, com os seus principais constituintes [14].

Em [14] foi realizado um estudo na empresa WS Energia, sobre o desenvolvimento de métodos de encapsulamento, nomeadamente EVA e silicone para aplicação no projecto HSUN[®]. Desde estudo conclui-se que os resultados obtidos são insatisfatórios para o encapsulante EVA, este mostrou-se incapaz de resistir à radiação concentrada, isto porque ao fim de alguns dias surgiu o aparecimento de uma tonalidade amarela. Este acontecimento ocorre devido à acumulação da radiação UV que provoca reacções secundárias formando ácido acético e consequentemente origina uma cor amarela. Por outro lado, o silicone mostrou-se ser o encapsulante ideal, apresentou satisfazer características relevantes, tais como: boa aderência, não foi detectado o aparecimento de amarelamento após alguns dias de exposição à radiação de luz concentrada e nenhum efeito negativo foi verificado na curva I-V da célula solar.

2.5.1 Silicones

Os silicones apresentam-se como um material extremamente versátil, com excelentes propriedades, térmicas, ópticas e mecânicas tornando-o, numa alternativa viável para ser utilizado como encapsulante de células solares fotovoltaicas. Os encapsulamentos de silicone têm uma grande variedade de aplicações na indústria, tais como: materiais semicondutores, materiais electrónicos e eléctricos, módulos FV.

Estes apresentam como características gerais [39]:

- Resistência à chama;
- Hidrofóbicos (repelam a água), logo possuem baixa absorção de humidade;
- Excelente rigidez dieléctrica e maior nível de resistência;
- Um amplo intervalo de temperaturas de trabalho entre -45°C a 200°C;
- Excelente adesão ao vidro e a substratos solares.

Propriedades Químicas

A constituição química dos polímeros de silicone possibilita a origem de diferentes tipos de aplicações, devido ao conjunto diversificado da composição do material que o constitui. Assim, encontra-se disponível uma ampla gama de silicones, cada um com as suas propriedades [40].

Os silicones possuem como composição química um esqueleto inorgânico de silício-oxigénio, com grupos de materiais orgânicos (podem ser um metil, etil ou fenil) ligados aos átomos de silício. A sua estrutura molecular, denominada por polisiloxanos, encontra-se representada na Figura 2.15.

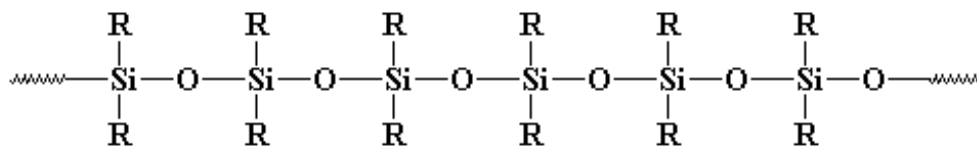


Figura 2.15 – Estrutura molecular típica do silicone [40].

Esta estrutura molecular possibilita que o silicone usufrua de movimentos de translação, vibracionais e de rotação. As ligação Si–O permitem que a cadeia principal da molécula de silicone seja extremamente flexível ao contrário da cadeia carbonada dos outros tipos de encapsulantes (EVA e PVB).

Os polímeros de silicone são conhecidos por possuírem uma alta estabilidade. Isto deve-se à energia das suas ligações químicas, entre os átomos de silício e carbono (Si–C) e silício e oxigénio (Si–O). A ligação química entre Si–O é polarizada, isto porque a electronegatividade do silício (1,8) é inferior à electronegatividade do carbono (2,5). Esta ligação também é altamente iónica, com grande energia de ligação, de 452 kJ/mol. E a energia da ligação Si–C é de 318 kJ/mol [14].

Polidimetilsiloxanos (PDMS) são os polímeros de silicones mais comuns e os mais usados industrialmente. Estes são polímeros mais rentáveis a nível de produção e geralmente contêm boas propriedades físicas em elastómeros de silicone e gel. A sua estrutura molecular encontra-se na Figura 2.16, possuindo como radical o grupo metil, nesta estrutura também consta o grupo vinil ($\text{CH}_2=\text{CH}$).

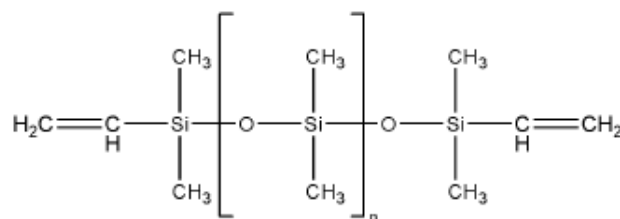


Figura 2.16 – Estrutura molecular do Polidimetilsiloxanos [40, 41].

Os silicones que contêm como radical o grupo fenil são designados por difenil-dimetilpolisiloxano (Figura 2.17). Estes são normalmente aplicados em LED (*Light Emitting Diode*).

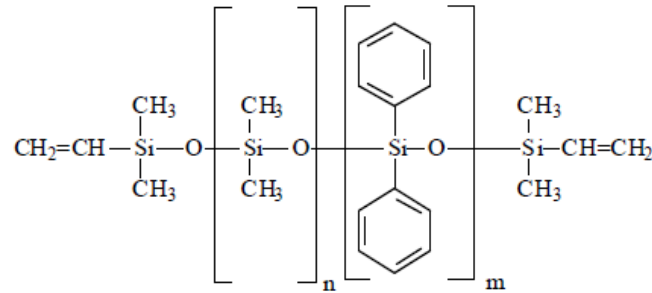


Figura 2.17 – Estrutura molecular do difenildimetilpolisiloxano [40].

Vulcanização:

O processo de vulcanização, reticulação ou cura é a reacção química responsável pela formação de múltiplas ligações entre as cadeias adjacentes ao polímero. Assim, é a cura que torna este material capaz de desempenhar a sua função nas inúmeras aplicações tecnológicas [42].

Os silicones PDMS aplicados como encapsulantes são usualmente constituídos por duas partes líquidas: a parte A (componente principal) e a parte B o agente de cura de platina (catalizador) [39]. Podem ser combinados em diferentes proporções (volume/volume ou peso/peso). O catalizador de platina é o responsável por acelerar o processo de cura, pois este elemento participa na reacção entre o polímero hidreto siloxano e o polímero vinil siloxano. O resultado é uma ponte etílico entre os dois polímeros e a formação do silicone. O mecanismo desta reacção encontra-se discriminado na Figura 2.18 [40].

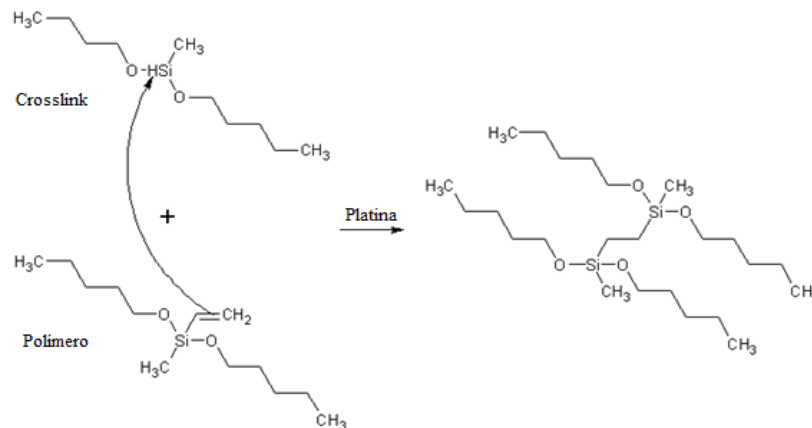


Figura 2.18 – Mecanismo de reacção que ocorre durante a cura [40].

Esta reacção pode ocorrer rapidamente, isto porque a platina tem a possibilidade de permitir acelerar o processo de cura a temperaturas elevadas, tornando-se benéfico para as montagens de módulos FV. Antes

da reacção de cura o polímero possui baixa viscosidade, o que possibilita a sua fluidez e adaptação à estrutura da célula solar, permitindo total cobertura [43].

Assim, o uso da platina como catalisador apresenta várias vantagens na formação de silicones, tais como:

- Diferentes tempos e temperaturas de cura.
- Não ocorre formação de subprodutos;
- Não ocorre perdas de peso;
- Retracção, cerca de 0,1%.

Sendo a principal desvantagem da platina a inibição da reacção de cura, pelo contacto com vários elementos químicos, tais como: enxofre, estanho e compostos que contêm aminas. Assim, torna-se importante garantir que o material se encontre limpo durante todo o processo de preparação para evitar contaminações. Caso contrário, pode a platina ser contaminada, levando à dispersão do catalisador, ocorrendo problemas na formação do silicone [40].

Relativamente à combinação da parte A com a B dos silicones, estas devem ser realizadas com proporções correctas e misturadas de forma precisa, com o fim de se obter tempos de vida e tempos de cura do silicone reprodutíveis. Caso contrário, quantidades incorrectas do catalisador de platina podem provocar impactos significativos no tempo de cura, no tempo de vida, silicone com baixa resistência mecânica, possível inchaço e efeitos na adesão.

Propriedades Ópticas

As propriedades ópticas dos encapsulantes são uma das características mais importante, pois influenciam directamente o rendimento do módulo FV.

Os espectros ópticos, são obtidos através da técnica da espectroscopia do UV-Visível-NIR (*Near infra-red*), esta consiste numa técnica de caracterização óptica de materiais e baseia-se na interacção entre a radiação e a amostra. Permite o estudo das características ópticas, nomeadamente transmitância (T_r), absorvância (A) e reflectância (R) em função do c.d.o (comprimento de onda) da luz incidente. Estes parâmetros ópticos relacionam-se entre si através da seguinte equação (7) [44]:

$$T_r + A + R = 1 \quad (7)$$

Num espectrofotômetro de feixe duplo, a intensidade de radiação é gerada através de dois tipos de lâmpadas, uma para a radiação UV geralmente de deutério (160 nm até 375 nm) e outra para a radiação do visível e próximo do IV de tungstênio (350 nm até 2500 nm) [45]. De seguida o feixe de radiação incide no monocromador, ao emergir deste é dividido em dois feixes com intensidades e distribuições espectrais idênticas. Destes dois feixes, um deles passa através da amostra e o outro é considerado o feixe de referência. Assim, a quantidade de luz que é transmitida ou reflectida pela amostra é então comparada com a da referência. Sendo a transmitância dada pela seguinte expressão (8) [44]:

$$T_r = \frac{I}{I_0} \quad (8)$$

em que,

I - Feixe de radiação transmitido através da amostra;

I_0 - Feixe de radiação incidente.

A transmitância está relacionada com a absorvância, através da seguinte expressão (9) [44]:

$$A = -\log \frac{I}{I_0} = -\log T_r \quad (9)$$

Na Tabela 2.5 encontram-se dispostas as principais vantagens e desvantagens desta técnica.

Tabela 2.5 – Vantagens e desvantagens da Espectroscopia UV-VIS-NIR [46].

Vantagens	Desvantagens
Equipamento comum em laboratórios	O procedimento de troca de lâmpada é demorado
Não-destrutivo para a amostra	Calibrações frequentes
Fácil de usar	Desvios à lei Lambert- Beer

Na literatura encontram-se vários estudos ópticos a encapsulantes de células solares, isto porque o ideal para encapsulantes de células solares, é que estes apresentem estabilidade óptica, durante vários anos, de modo a conseguir manter o fluxo de fótons na célula [41].

Em [47] foi realizado um estudo em que se demonstraram os benefícios ópticos do silicone quando comparado com o EVA em termos de transmissividade (Figura 2.19) e respectiva comparação com o espectro AM 1.5 (corresponde à radiação solar incidente de 1000W/m^2) [48].

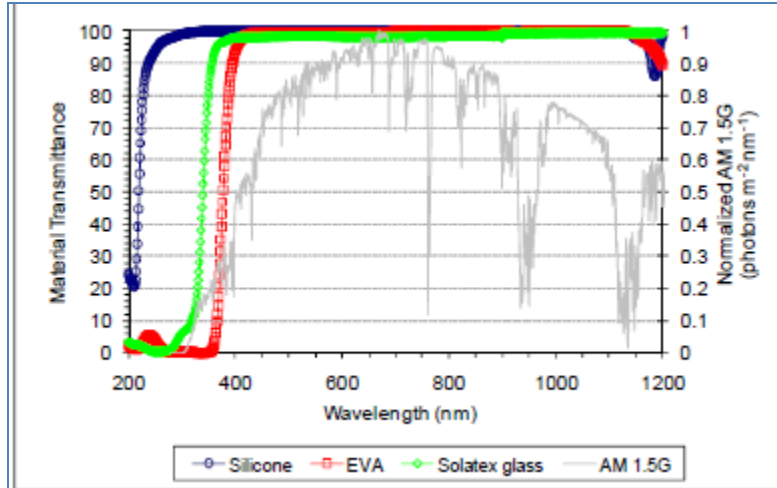


Figura 2.19 – Comparação da transmitância do silicone, EVA e vidro, com 1 mm de espessura, obtida através de um espectrofótopmetro-Varian Cary 5000 UV-VIS-NIR. Representação do comportamento do espectro AM 1.5 [47].

Como se pode verificar o silicone apresenta uma transmitância superior na região do UV (300 a 400 nm) e uma alta transmitância na região do visível (400 a 800 nm). Sendo assim, o silicone não absorve a radiação UV, não ocorrendo formação de reacções, nem o aparecimento da cor amarela. Uma das formas de avaliar o grau de degradação é verificar se a transmitância do encapsulante diminui significativamente, ao longo de um teste de stress [49].

A empresa Nusil [41] realizou um estudo sobre os benefícios e riscos de PDMS e silicones que contêm o grupo fenil. Para tal, realizaram-se testes de envelhecimento acelerado sob radiações UV onde a percentagem de transmissividade e a sua perda ao longo do tempo foi medida. Na Figura 2.20, estão dispostos os resultados obtidos.

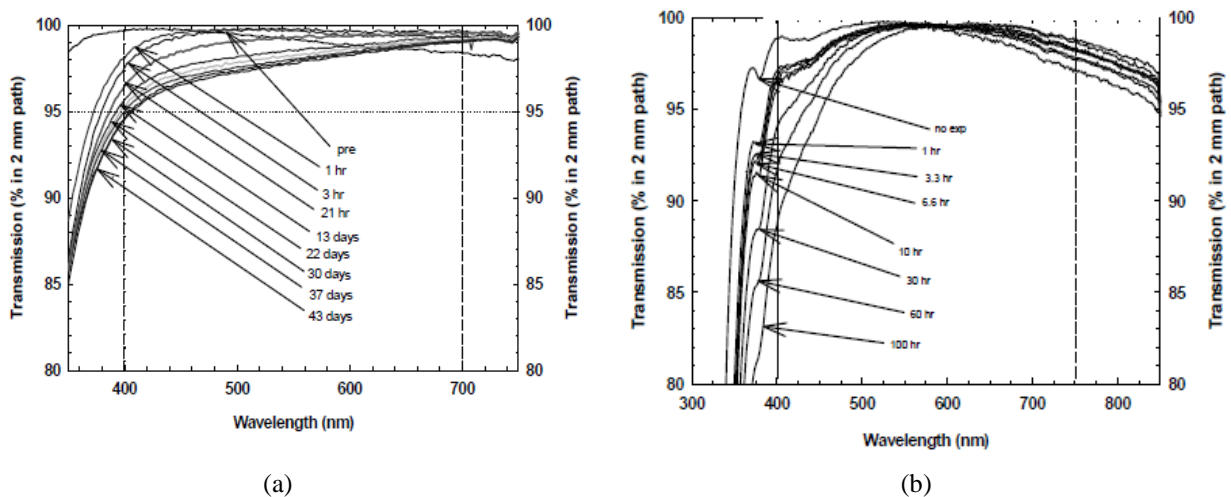


Figura 2.20 – Transmitância em função do c.d.o. após exposição UV com radiação total de 190 mW/cm^2 , à temperatura entre 75°C - 90°C : a) Elastómero PDMS; b) Elastómero com grupo fenil [41].

A Figura 2.20b apresenta percentagem da transmitância após exposição ao UV dos silicones que contêm o grupo fenil, este decresce na região do visível quando comparado com os silicones PDMS Figura 2.20a. Este resultado revela que ainda existe um grande percurso a efectuar em investigação deste tipo de silicones já que são vistos como uma futura alternativa aos PDMS. Os silicones com o grupo fenil, revelaram um aparecimento de “amarelamento” quando submetidos a radiação UV. Estes silicones absorvem o c.d.o da radiação UVB acelerando este factor [41].

A empresa Nusil também realizou um estudo sobre o índice de refração. Este relaciona a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz, num determinado meio. Assim a velocidade da radiação incidente depende do meio onde se propaga. Sendo o índice de refração usado para controlar o caminho da luz, de modo a reduzir a perda de luz. Este parâmetro em silicones varia de 1,38 a 1,54, dependendo da natureza do grupo R [50].

O índice de refração medido, com um comprimento de onda de 598 nm, a 25°C ao silicone PDMS é de 1,40. Enquanto que um silicone que possua na sua constituição química o grupo fenil, o seu índice de refração é aumentado de 1,40 para 1,60. No entanto, com o aumento do índice de refração a transmitância diminui [51].

Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas têm como objectivo descrever o comportamento dos materiais quando submetidos a uma influência mecânica externa. Estas também indicam a força ou tensão que o material deve resistir.

Os silicones que possuem uma viscosidade acima de 10000 mPa.s, contêm excelentes propriedades mecânicas, tais como: tensão de rotura (tensão máxima que um material suporta, antes de ficar danificado), alongamento (máximo de extensão) e *tear strenght* (resistência que o material oferece ao aumento de uma fissura quando sujeito a um movimento de rasgar). Os que possuem baixa viscosidade, inferior a 10000 mPa.s, possuem propriedades mecânicas mais fracas [39].

Ensaio de Tracção

Algumas propriedades mecânicas podem ser medidas através de um ensaio de tracção, como por exemplo tensão de rotura, alongamento, módulo de Young ou módulo de elasticidade (E). A Figura 2.21 apresenta uma fotografia de uma máquina de tracção moderna.



Figura 2.21 – Máquina de tracção *Autograph AG-IS SHIMADZU 20 KN*, localizada no CENIMAT na FCT (Faculdade de Ciência e Tecnologia).

Neste ensaio de tracção, o provete do material é traccionado até à rotura, num intervalo de tempo relativamente curto e com velocidade constante. Na Figura 2.22 ilustra-se esquematicamente o modo como o provete é ensaiado em tracção.

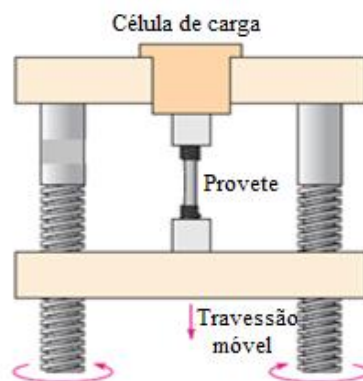


Figura 2.22 – Esquema de funcionamento de uma máquina de tracção [52].

Nestes ensaios o provete é submetido uma força uniaxial, provocando a sua extensão desde o l_0 (comprimento inicial) até l (comprimento final) (Figura 2.23b). Na Figura 2.23 encontra-se ilustrado um varão cilíndrico de comprimento (l_0) e área a secção recta (A_0), submetido a uma força de tracção uniaxial (F).

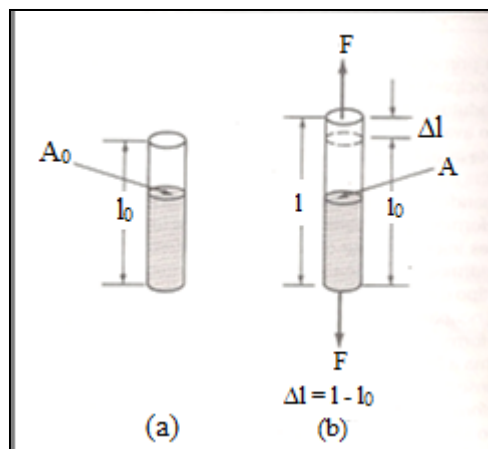


Figura 2.23 – Extensão de um cilindro submetido a uma força de tração uniaxial: a) Cilíndrico sem qualquer força aplicada; b) Cilindro submetido a uma força de tração uniaxial [52].

Durante estes ensaios são medidos os valores de tensão sobre o provete assim como o alongamento sofrido pelo mesmo. A partir dos valores obtidos é possível obter uma curva tensão (σ) em função extensão (ϵ).

Sendo a tensão dada pela seguinte expressão (10) [52] :

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (10)$$

em que:

F – Força de tração uniaxial;

A_0 – Área da secção transversal do provete no estado de repouso.

E a extensão dada pela seguinte expressão (11) [52]:

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (11)$$

em que:

Δl – Variação do comprimento de referência

l_0 – Comprimento de referência

Através da curva tensão-deformação é possível deduzir o valor E. Isto porque, quando o material se comporta de forma linear elástica existe uma relação entre a tensão e a deformação, que pode ser estimado segundo a seguinte equação (12) [52]:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (12)$$

Assim, é possível determinar o E, através do declive da recta.

Normalmente valores baixos de E, significam baixa densidade de reticulação, isto é, ligações fracas entre os seus constituintes químicos, o que implica um aumento de flexibilidade. Estes fenómenos devem-se à baixa temperatura de transição vítrea (tg), o que significa que abaixo desta temperatura os polímeros sofrem uma transformação abrupta das suas características, ficando no estado vítreo, implicando o bloqueamento dos movimentos moleculares. No polímero polidimetilsiloxano a transição vítrea é de -120°C [43]. Para os polímeros que possuem o grupo fenil o tg é de -115°C [40]. Por esta razão os polímeros com grupos fenil são quimicamente resistentes e têm mostrado mais estabilidade, o que aumenta a sua vida útil em ambientes termicamente agressivos. Estes silicones possuem também a vantagem de serem menos permeáveis ao vapor de água [53].

Em [54] foi realizado um estudo sobre as propriedades mecânicas a PDMS, com o objectivo de caracterizar este material pela determinação do módulo de elasticidade. Foram estudados dois silicones, o Sylgard[®] 184 e o RTV 615, o seu estudo foi baseado na norma DIN 53504. A Figura 2.24 apresenta o diagrama tensão-deformação, relativamente ao Sylgard[®] 184 com diferentes percentagens de ductilidade, ou seja, com reduções de 0%, 5% e 10% na secção resistente.

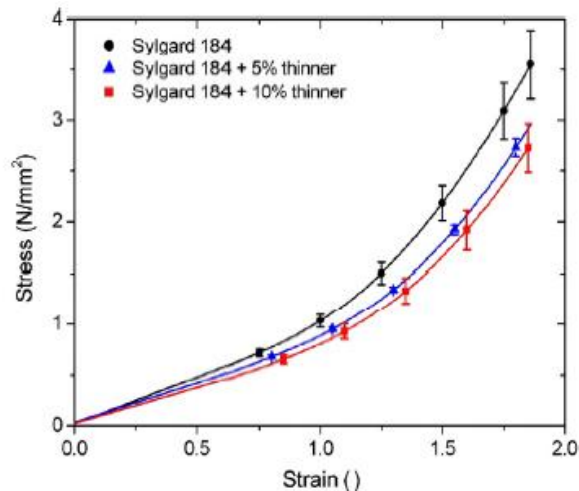


Figura 2.24 – Diagrama tensão-deformação para o Sylgard[®]184 [54].

Os resultados do módulo de elasticidade obtidos para o Sylgard[®]184 e RTV 615 encontram-se na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Módulo de elasticidade para o Sylgard 184[®] e RTV 615, com diferentes ductilidades [54].

Ductibilidade (%)	Módulo de Elasticidade	
	Sylgard 184 (MPa)	RTV 615 (MPa)
0	1.820 ± 0.055	1.528 ± 0.055
5	1.546 ± 0.018	1.455 ± 0.075
10	1.407 ± 0.085	1.197 ± 0.055

A Tabela 2.6 mostra que com aumento da ductibilidade dos silicões, existe uma diminuição do módulo de elasticidade. Isto significa, a existência de uma diminuição das forças das ligações químicas do silicone.

Adesão

A adesão é definida como a ligação química entre dois substratos. Assim, substratos com grupos reactivos disponíveis, permitem uma adesão mais facilitada, ao contrário de substratos sem grupos reactivos a adesão torna-se mais difícil. Os silicões, como já referido, são conhecidos por serem bastante aderentes a qualquer tipo de material.

No entanto, para alguns substratos é necessária aplicação de *primer*, que é um promotor de adesão que forma ligações químicas muito fortes. Normalmente, o *primer* é um solvente volátil constituído por silixanos, sendo bastante reactivo, tornando-se o responsável por permitir a adesão entre as superfícies [55].

Assim, com uma excelente adesão entre as células solares e o silicone pode obter-se inúmeras vantagens, tais como [39]:

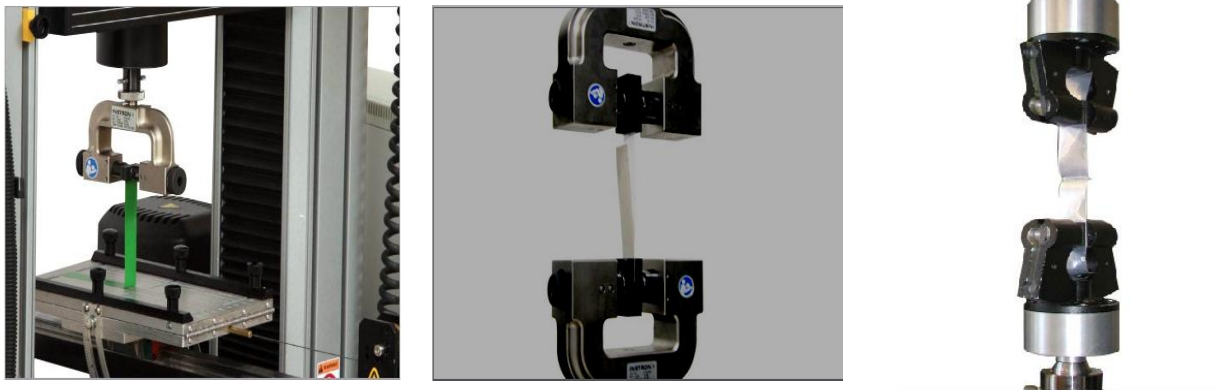
- *Stress* distribuído uniformemente;
- Possibilidade de minimizar o *stress* em certas localizações;
- Evita a corrosão e a entrada de humidade;
- Garante a integridade e segurança das células solares.

Para testar a durabilidade da adesão são realizados testes. A realização desses testes é bastante importante, pois permitem perceber o comportamento da adesão do encapsulante às células solares, durante o seu tempo de vida útil [39].

A realização dos testes de adesão denomina-se por *Peel Strength*. Estes têm como objectivo medir a força de uma ligação adesiva, nomeadamente em determinar a resistência de separação. Para a realização deste

teste, normalmente são utilizadas as normas ASTM (*American Society for Testing and Materials*). Esta entidade é reconhecida mundialmente no desenvolvimento de normas internacionais.

Os testes *Peel Strength* podem ser realizados de três formas diferentes 90° , 180° e *T-peel*. Para realizar o teste de 90° a silicões (elastômeros e borrachas) pode ser usada a máquina apresentada na Figura 2.25a, este teste encontra-se descrito na norma ASTM D429-08 [56], neste teste é utilizado um material flexível e um material não flexível. O teste de 180° , para aplicação em elastômeros e borrachas encontra-se descrito na ASTM D413-98, o teste pode ser realizado na máquina que se encontra na Figura 2.25b [57]. Para a realização do teste *T-peel*, pode ser usada a norma ASTM D1876, podendo ser utilizada o instrumento representado na Figura 2.25c [58]. Nos testes de 180° e *T-peel* ambos os materiais utilizados têm de ser flexíveis.



(a) (b) (c)
Figura 2.25 – Instrumentos para realizar testes de adesão *Peel Strength*: a) 90° ; b) 180° ; c) *T-peel*.

3 Definição do Processo de Produção de Silicones

Neste capítulo são apresentados testes preliminares realizados a vários silicones estudados, que tiveram como objectivo definir o processo de produção e caracterização preliminar dos silicones, para aplicação no módulo HSUN[®]. Bem como resolução de anomalias existentes no processo de produção.

3.1 Silicones e suas Propriedades

Foi efectuado um estudo de mercado onde foram contactados vários fornecedores de silicones de entre os quais se destacam as empresas *Dow Corning*, *ACC Silicones Europe* e a *Wacker Silicones*, as quais forneceram várias amostras dos seus produtos para a realização dos testes desta dissertação. No anexo II da presente tese, encontram-se as datasheets dos diversos silicones fornecidos pelas empresas. Um resumo das suas principais propriedades encontram-se na Tabela 3.1.

Nesta dissertação, foram estudados diversos tipos de silicone como elastómeros, géis e resinas de silicone. Estes apresentam algumas diferenças entre si, como por exemplo:

- Proporções, os géis possuem proporções de 1:1 e os elastómeros de 10:1 e 9:1;
- Viscosidades, os géis possuem viscosidades mais baixas de 630 mPa.s e elastómeros viscosidades mais elevadas de 3500 mPa.s.
- Dureza, géis tratam-se de compostos muito macios, possuem uma dureza baixa sendo expressos na escala shore 00. Para materiais elastómeros são expressos na escala shore A e materiais mais rígidos são expressos na escala shore D.

No entanto, também apresentam propriedades bastante semelhantes, tais como:

- Índice de refração normalmente de 1,40 e 1,41;
- Transmitância, na ordem dos 90%;
- Condutividade térmica, em todos os silicones estudados encontra-se entre 0,15 a 0,20 W/m.K).

Definição do Processo de Produção de Silicones

Tabela 3.1 – Propriedades físicas, mecânicas, eléctricas e térmicas dos silicones estudados.

Empresas	Dow Corning			ACC Silicones Europe		Wacker	
Produto	Sylgard® 184	PV-6010	1-2577 Low-VOC	Qsil 216	EGel 3000	Elastosil Solar® 3210	Elastosil® RT 601
Características	Elastómero	Gel	Resina	Elastómero	Gel	Elastómero	Elastómetro
Cor	Transp.	Transp.	Transp.	Transp.	Transp	Transp.	Transp.
Relação de mistura	2 Partes 10:1	2 Partes 1:1	1 Parte	2 Partes 10:1	2 Partes 1:1	2 Partes 9:1	2 Partes 9:1
Viscosidade (mPa.s)	3900	925	1250	4500	630	3500	3500
Tempo de vida útil	>2h	24h	- ⁴	4h	> 45 min	90 min	90 min
Primer	1200 OS primer	Não	1204 Primer Coat	PrimerNo. 3	Não	Primer G790 Wacker Silicones	Primer G790 Wacker Silicones
Propriedades Físicas							
Densidade (25°C)	1,03	1	0,88	1,02	0,98	1,02	1,02
Índice de Refracção	1,41	1,41	-	≈1,40	1,40	1,41	-
Transmitância (%)	94,4 ± 0.3	>90	-	>90	>90	>90	> 88
Propriedades Mecânicas							
Tensão de Rotura (N/mm ²)	-	-	-	48	-	7,00	6,00
Alongamento (%)	-	-	-	100	-	100	100
Tear Strength (N/m)	-	-	-	-	-	3,00	3,00
Dureza, shore A/00/D	50 ⁵	34 ⁶	25 ⁷	40 ⁵	-	45 ⁵	45 ⁵
Propriedades Térmicas							
Temperatura de trabalho (°C)	-45 a 200	-	-60 a 200	-60 a 204	-55 a 200	-50 a 180	-
Condutividade Térmica (W/m.K)	0,2	0,15 a 0,20	-	0,18	0,18	-	0,2
Propriedades Eléctricas							
Volume Resistivity (Ω-cm)	1,2x10 ¹⁴	1,0x10 ¹⁵	1,9x10 ¹⁴	1,7x10 ¹⁵	2,0x10 ¹⁵	1,0x10 ¹⁵	1,0x10 ¹⁵
Dielectric Strength (kV/mm)	21,20	17,00	13,40	19,70	18,50	23,00	23,00

Sendo os silicones Elastosil Solar® 3210 e Elastosil® RT 601 os que apresentam maiores semelhanças entre si, apenas diferem na percentagem de transmitância e na propriedade tensão de rotura.

⁴ Depende do método e do local de aplicação.

⁵ Dureza medida na escala shore A.

⁶ Dureza medida na escala 00.

⁷ Dureza medida na escala D.

De entre os silicones estudados, os do tipo gel apresentam uma grande vantagem, não necessitam do uso de *primer*, sendo assim possível poupar tempo numa produção em grande escala e evitar custos secundários [14].

Na Tabela 3.2 encontra-se uma comparação das diferentes temperaturas de cura com seu respectivo tempo para cada silicone, verifica-se que para os silicones de elastómeros é possível obter uma cura bastante rápida, a elevadas temperaturas e também é possível a cura à temperatura ambiente. Enquanto que para o silicones gel (PV 6010) a sua cura só é possível a elevadas temperaturas. Como demonstrado, o aumento de temperatura acelera o processo de cura dos silicones reduzindo o tempo necessário para tal operação.

Tabela 3.2 – Temperatura e tempo de cura para cada encapsulante.

	Sylgard® 184	Elastosil® Solar 3210	Elastosil® RT 601	Qsil 216	PV-6010	EGel 3000	1-2577 Low-VOC
Temperatura Tempo de cura	25°C 48h	23°C 24 h	23°C 24 h	25°C 20h	80°C 30 min	25°C 24h	80°C 10min ⁸
	100°C 45min	70°C 20 min	70°C 20 min	100°C 60 min	-	100°C 1h20min	-
	125°C 20 min	100°C 10 min	100°C 10 min	-	-	-	-
	150°C 10 min	-	-	-	-	-	-

3.2 Testes Preliminares

Realizaram-se uma variada gama de testes com a finalidade de perceber a metodologia de preparação dos silicones e de detectar os seus principais problemas ao longo do processo de produção dos receptores. Desde modo, foi possível obter a descrição detalhada de todos os procedimentos necessários ao encapsulamento de receptores do módulo HSUN[®] utilizando silicones.

Assim, para se dar início ao estudo do processo de encapsulamento e perceber o comportamento dos diversos silicones, realizaram-se os seguintes testes:

- Avaliação do processo de encapsulamento com silicone no protótipo sub-receptor;
- Avaliação do processo de encapsulamento com silicone no protótipo receptor;
- Avaliação do processo de encapsulamento com silicone no receptor;
- Estudo do comportamento do encapsulante PV 6010;
- Estudo do comportamento do encapsulante EGel 3000;

⁸ Temperatura e tempo de cura específico para uma espessura de 75 µm.

- Estudo da utilização de vácuo após cura do silicone e sua adesão;
- Estudo do comportamento dos vários tipos de silicones;
- Estudo do comportamento dos silicones sujeitos a reparações;
- Estudo do comportamento de uma estrutura limitativa para colocar nas extremidades dos receptores;

Durante a realização desta gama de testes foram detectados os seguintes problemas:

- Bolhas;
- Ausência de silicone nas periferias;
- Derrame de silicone na óptica secundária;
- Corte irregular na extremidade;
- Cura insuficiente;

Na Tabela 3.3 encontra-se a descrição geral destes testes e seus resultados. No anexo III encontram-se os Relatórios internos da empresa “Testes Preliminares” que descrevem detalhadamente estes testes de encapsulamento.

Na Figura 3.1 encontra-se um dos primeiros protótipos dum sub-receptor do módulo HSUN[®] encapsulado, com as suas respectivas dimensões.

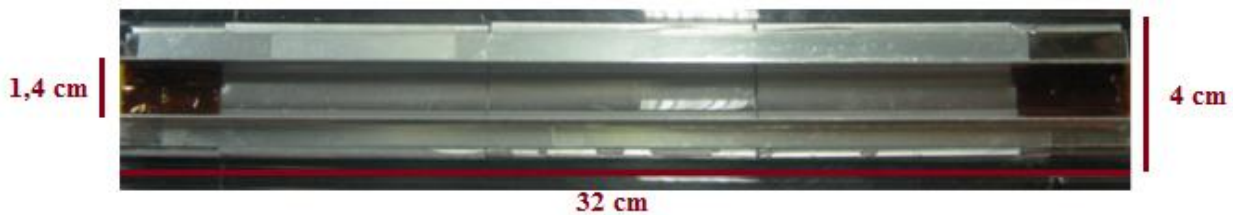


Figura 3.1 – Sub-receptor do módulo HSUN[®], encapsulado com o Elastosil Solar[®] 3210.

Tabela 3.3 – Descrição geral dos testes realizados a silicones.

Teste	Procedimento	Resultados
Avaliação do processo de encapsulamento com silicone no protótipo sub-receptor	<u>Sub-receptor</u> : 32x4 cm <u>Silicone</u> : Elastosil Solar® 3210 <u>Mistura</u> : 15 min <u>Cura</u> : 125°C – 40 min	Bolhas nas periferias e extremidades (óptica secundária e fita kapton); Corte irregular da extremidade.
Avaliação do processo de encapsulamento com silicone no protótipo receptor	<u>Receptor</u> : 100x4 cm <u>Silicone</u> : Elastosil Solar® 3210 <u>Mistura</u> : 15 min <u>Cura</u> : 125°C – 20 min	Derrame de silicone na óptica secundária; Ausência de silicone na periferia; Bolhas na periferia da óptica secundária;
Avaliação do processo de encapsulamento com silicone no receptor	<u>Receptor</u> : 100x4 cm <u>Silicone</u> : Elastosil Solar® 3210 <u>Mistura</u> : 20 min <u>Cura</u> : 20°C – 48 horas	Derrame de silicone na óptica secundária; Superfície do silicone não se encontra completamente regular; Silicone vazou do receptor.
Estudo do comportamento do encapsulante PV 6010	<u>Amostras</u> : 2 com 7x4cm; 2 com 5x4 cm <u>Silicone</u> : PV 6010 <u>Mistura</u> : 20 min <u>Cura</u> : 80°C – 30 minutos <u>Cura</u> : 20°C – 8 dias	Cura a 80°C – 30 minutos: Silicone Solidificou Cura a 20°C – 8 dias: Silicone não solidificou, vazou pela base e pelas laterais da estrutura. Silicone mais difícil de se sustentar na estrutura limitativa.
Estudo do comportamento do encapsulante EGel 3000	<u>Amostras</u> : 2 com 7x4cm <u>Silicone</u> : EGel 300 <u>Mistura</u> : 20 min <u>Cura</u> : 80°C – 30 minutos <u>Cura</u> : 20°C – 8 dias	Solidificou, mas apresenta dureza muito reduzida; Não vazou da estrutura Não apresenta mudanças de cor durante o processo de preparação
Estudo utilização de vácuo após cura do silicone e sua adesão	<u>Amostras</u> : 2 com 6x4cm; 2 com 4x4cm <u>Silicone</u> : Elastosil Solar 3210 <u>Mistura</u> : 15 min <u>Cura</u> : 100°C – 10 minutos	A utilização de vácuo durante a cura facilita a remoção de bolhas do encapsulante. A utilização de <i>primer</i> é essencial para a adesão do encapsulante à base.
Estudo do comportamento dos vários tipos de silicones	⁹	Elastosil® Solar 3210, Sylgard® 184, Qsil 216: solidificados, boa resistência e não apresentaram mudanças de tonalidade.
Comportamento dos silicones a reparações	⁹	Reparação com cura à temperatura ambiente apresenta melhores resultados, do que a reparação com cura a elevadas temperaturas.
Estudo do comportamento de uma estrutura limitativa para colocar nas extremidades dos receptores	<u>Amostras</u> : 2 com 6x4cm <u>Silicone</u> : Elastosil Solar® 3210 <u>Mistura</u> : 15 min <u>Cura</u> : 100°C – 10 minutos	Teflon otimiza o método de colocação do silicone no protótipo; O modo de aplicação é mais satisfatório quando aplicação do encapsulante é realizada ao longo do protótipo do centro para a periferia.

⁹ Consulte os relatórios que se encontram no anexo III.

Soluções para problemas encontrados:

Durante a realização dos testes, foram detectadas algumas falhas no processo de produção (Figura 3.2), nomeadamente na colocação do silicone em protótipos do sub-receptor.

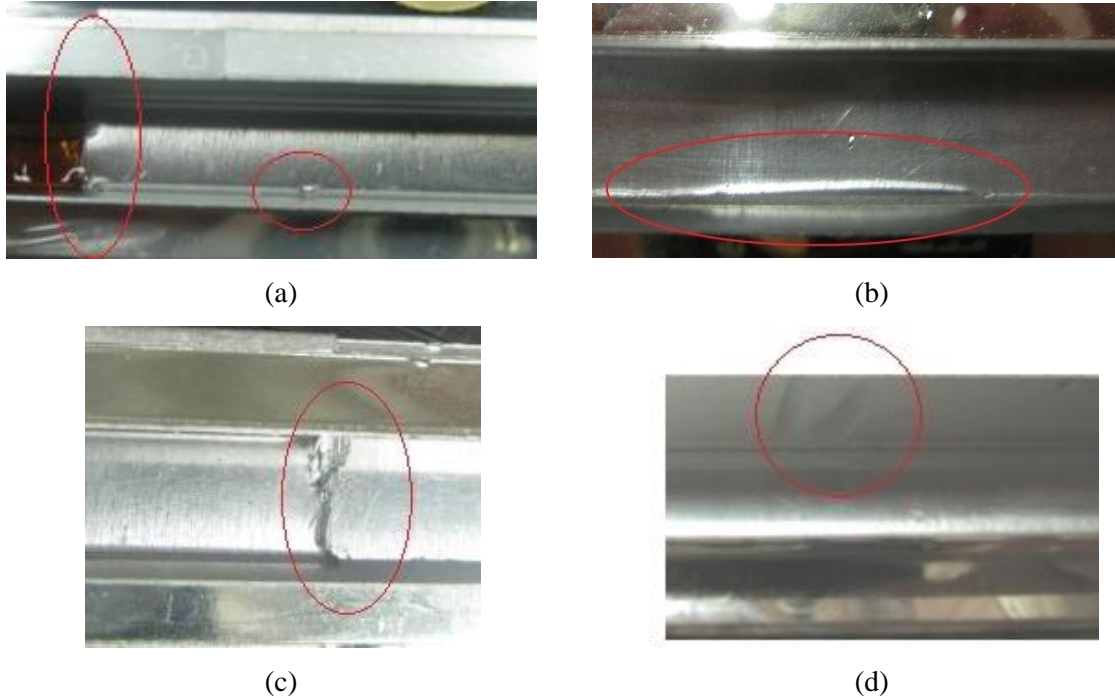


Figura 3.2 – Principais problemas (evidenciados a vermelho) encontrados no sub-receptor: a) Bolhas nas periferias e extremidades (óptica secundária e fita kapton); b) Ausência de silicone na periferia; c) Corte irregular da extremidade; d) Derrame de silicone na óptica secundária.

Os problemas encontrados na Figura 3.2 foram melhorados, com o fim de obter um ótimo processo de preparação dos silicones e melhorar o processo de produção do módulo HSUN[®]. Assim resolveram-se os problemas da seguinte forma:

- O problema do aparecimento das bolhas (Figura 3.2a) advém de ar existente entre os espelhos (ópticas secundárias) e as placas de alumínio, originado aquando da incorrecta colocação das ópticas secundárias. Como tal, após esta conclusão, um maior cuidado e rigor foi tido em atenção na montagem dos receptores.
- Na Figura 3.2b observa-se uma ausência parcial de silicone na periferia da óptica secundária. Enquanto que noutros pontos do sub-receptor (Figura 3.2d), o silicone solidificou no espelho. Estas situações ocorreram devido ao método de colocação de silicone realizado (uso de um gobelé). Estas falhas foram melhoradas com o uso de seringas na aplicação do silicone.
- Como melhorias do corte irregular da extremidade, verificou-se que o teflon otimiza o método de colocação do silicone no protótipo (Figura 3.3), ao contrário do ocorrido com o uso da fita de

kapton que retira bolhas nas várias camadas e ao ser retirada do encapsulante danificava o silicone (deixando um corte vertical irregular no mesmo) (Figura 3.2c).

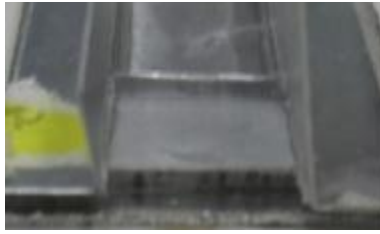


Figura 3.3 – Extremidade com um corte direito no protótipo HSUN[®], com o uso de teflon.

3.3 Verificação de Anomalias no Processo de Produção dos Silicones a Curto Prazo

Com o processo experimental praticamente definido, partiu-se para a produção de receptores. Assim, todos os receptores produzidos na WS Energia depois de encapsulados, foram inspeccionados de forma visual, a fim de se detectar falhas a curto prazo no processo de produção do HSUN[®]. No anexo IV, encontra-se um Relatório interno da empresa “Inspeção Visual – Receivers”, em que se realiza uma visualização dos defeitos visuais nos receptores, de acordo com a norma IEC 62108.

Relativamente aos problemas encontrados nos silicones, verificou-se que o principal defeito encontrado é a presença de bolhas de ar, no silicone. Estas surgem principalmente na periferia da óptica secundária (Figura 3.4a), junto das células solares e Ribbons¹⁰ (Figura 3.4b). Este defeito poderá tornar-se problemático a longo prazo, uma vez que, e consequentemente no encapsulante, as bolhas aí presentes irão ter uma tendência para se expandir, danificando o silicone, provocando problemas de corrosão nos contactos das células solares.

¹⁰ Conecta as células solares entre si através do processo de soldadura.

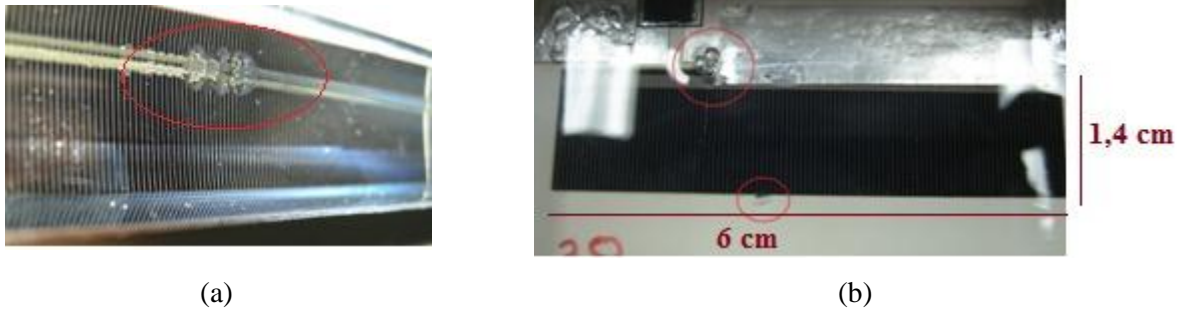


Figura 3.4 - Existência de bolhas (evidenciadas a vermelho): a) Junto à periferia da parte superior do encapsulante; b) Junto à célula e ao Ribbon.




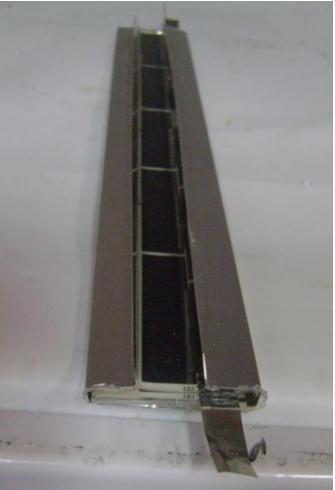
Outro problema encontrado a curto prazo após o encapsulamento de células solares é o aparecimento de delaminações. Estas devem-se à perda de aderência entre o encapsulante de silicone e as células solares contidas nos receptores, originando perdas de adesão. Verificou-se que este defeito foi evoluindo ao longo do tempo.

Eliminação de Bolhas:

Na tentativa de eliminar as bolhas de ar foram realizados os testes que se encontram na Tabela 3.4. Verifica-se que este problema advém do processo de produção dos receptores, nomeadamente da óptica secundária, de bolhas de ar existentes debaixo das células solares e dos Ribbons.

Na experiência decorrida nos testes preliminares (Estudo utilização de vácuo após cura do silicone e sua adesão), verificou-se que a utilização de vácuo durante a cura remove as bolhas existentes no encapsulante. No entanto, é importante referir que as bolhas existentes provêm de ar existente na periferia da placa de alumínio. No caso em que as amostras são receptores, a remoção de bolhas a temperaturas elevadas não é viável, visto que estas também provêm da parte traseira das células solares e Ribbons.

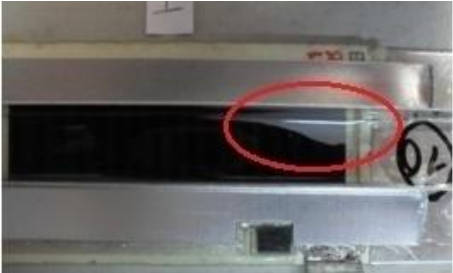


Tabela 3.4 – Etapas de resolução do problema do aparecimento de bolhas.

Problema	Possíveis Soluções	Resultado	Solução de Re-Design
<p data-bbox="310 451 590 483">Aparecimento de bolhas</p> 	<p data-bbox="716 532 953 711">Utilização de vácuo durante a cura do silicone, a elevadas temperaturas</p> <p data-bbox="705 951 963 1032">Utilização de vácuo à temperatura ambiente</p>	 <p data-bbox="1026 688 1478 818">Não se mostrou eficaz na remoção das bolhas, por solidificar o silicone antes destas serem removidas.</p>  <p data-bbox="1020 1065 1488 1243">Verifica-se a remoção das bolhas, mas a superfície do encapsulante encontra-se irregular, devido ao modo de como as bolhas saem do encapsulante.</p>	<p data-bbox="1520 428 1850 509">Nova óptica secundária para o módulo HSUN®</p>  <p data-bbox="1520 1094 1850 1224">Minimiza o problema das bolhas e resolve o problema do vazamento do silicone.</p>

Eliminação de Delaminações:

Algumas delaminações (Tabela 3.5) também são visíveis nos receptores. Como solução para este problema, existe a aplicação de *primer* nas células solares dos receptores, antes da realização do encapsulamento.

Tabela 3.5 – Resolução do problema das delaminações, com a aplicação de *primer*.

Problema	Resolução	Resultado
<p>Aparecimento de delaminações</p> 	<p>Aplicação de <i>primer</i></p> 	<p>Sem delaminações</p> 

No relatório interno da empresa “Encapsulamentos: Vácuo - Adesão” que se encontra no anexo V, realizou-se um estudo da avaliação da colocação de *primer* em diferentes áreas do sub-receiver de modo a avaliar a sua adesão.

3.4 Descrição do Procedimento Final para Preparar Encapsulamentos com Silicone

De acordo com o trabalho anteriormente desenvolvido, chegou-se ao procedimento final para a preparação dos silicones.

Em algumas datasheets dos diversos silicones estudados, encontra-se discriminado o modo de preparação dos silicones de uma forma muito generalizada. Este subcapítulo apresenta de forma resumida os principais passos do procedimento de preparação de silicones. No entanto, no anexo VI encontra-se um Relatório interno da empresa “Encapsulamento-Silicones” com a descrição detalhada de todos os procedimentos necessários ao encapsulamento de receptores utilizando silicones.

Principais passos para preparar silicones, com o fim de coloca-los em receptores:

Passo 1 – Tomar atenção ao tempo de vida útil de cada silicone (Tabela 3.6)

Tabela 3.6 – Tempo de vida útil para cada silicone.

	Sylgard® 184	Elastosil® Solar 3210	Elastosil® RT 601	Qsil 216	PV-6010	EGel 3000
Tempo de vida útil	2h	90 min	90 min	4h	24h	90 min

Passo 2 – Colocar num gobelé a proporção correcta de cada silicone (Tabela 3.7), excepto o 1-2577 Low-VOC (1 componente).

Tabela 3.7- Proporção da mistura da parte A e parte B dos vários encapsulantes (dados do fabricante).

	Sylgard® 184	Elastosil® Solar 3210	Elastosil® RT 601	Qsil 216	PV-6010	EGel 3000
Proporção da Mistura (v/v)	10:1	9:1	9:1	10:1	1:1	1:1

Passo 3 – Misturar parte A e B do silicone, os seus tempos de mistura encontram-se na (Tabela 3.8).

Tabela 3.8 – Tempo de mistura da parte A e parte B de cada encapsulante.

	Sylgard® 184	Elastosil® Solar 3210	Elastosil® RT 601	Qsil 216	PV-6010	EGel 3000
Tempo de Mistura (min)	30	15	20	20	30	20

Passo 4 – Processo de desgasificação.

Passo 5 – Colocação de *primer*.

Passo 6 – Derramar o silicone ao longo do receptor.

Passo 7 – Cura do silicone, tempo e temperatura de cura encontram-se na Tabela 3.2.

4 Metodologia para Caracterização de Silicones

Ao longo deste capítulo descrevem-se as técnicas experimentais realizadas, a fim de avaliar a performance e durabilidade dos diversos silicones estudados e de se proceder à escolha do mais adequado ao encapsulamento das células solares do módulo HSUN[®]. Recorreu-se ao uso de várias tecnologias, tais como: Medição da curva I-V, Espectroscopia, Ensaio de tracção e Efeito da exposição UV.

4.1 Curva I-V de uma Célula Solar

4.1.1 Procedimento Experimental

Medição da Curva I-V:

Como teste inicial, para provar a importância do encapsulante num receptor, foi exposta uma célula solar, sem qualquer protecção, às condições atmosféricas do meio exterior. Com a finalidade de obter os parâmetros eléctricos da célula e assim avaliar a sua perda de performance ao longo do tempo.

Este teste realizou-se durante os meses de Abril a Julho, no concelho de Oeiras. Neste período de tempo, foi medida uma curva I-V inicial antes da exposição ao meio exterior, sendo as restantes curvas medidas na segunda, sétima e nona semana de exposição.

Para realizar estas medições a célula solar foi colocada no interior de um simulador solar (Figura 4.1) localizado nas instalações da WS Energia. Este é constituído por 5 lâmpadas de halogéneo, cada uma com capacidade de 230W, com intensidade de radiação de 1 sol (1000 W/m^2).



Figura 4.1 – Simulador onde se realizou a medição das curvas I-V.

As medições das curvas I-V, das quais se obtêm os parâmetros eléctricos da célula, foram obtidas através de um traçador de curvas I-V (Prova 210), apresentado na Figura 4.2.



Figura 4.2 – Traçador de curvas I-V, utilizado durante os ensaios.

4.2 Espectroscopia UV-Visível-NIR

4.2.1 Procedimento Experimental

Com o objectivo de seleccionar o silicone mais adequado foi realizada uma avaliação do comportamento da transmitância, absorvância e reflectância dos vários silicones: Elastosil RT[®] 601, Sylgard[®] 184, Qsil 216, PV-6010 e 1-2577 Low-VOC, nas regiões do UV e visível do espectro electromagnético. Estes apresentavam diferentes espessuras (nomeadamente 0.5,1,2,4,6 e 10 mm), cada amostra com dimensão 4x4 cm. Como base, cada silicone possuía um vidro com 2 mm de espessura.

Os espectros da transmitância e reflectância foram obtidos através do espectrofotómetro de feixe duplo UV-VIS-NIR 3101 da *Shimadzu* (Figura 4.3). Este equipamento encontra-se na sala escura do CEMOP (Center of Excellence in Microelectronics Optoelectronics and Processes), na FCT.



Figura 4.3 – Espectrofotómetro utilizado nas medições da transmitância e reflectância, existente na câmara escura do CEMOP.

No espectrofotómetro colocou-se, a esfera integradora que permite determinar a transmitância (Figura 4.4a) num c.d.o de 190 a 2500 nm. Para determinar a reflectância num c.d.o de 190 a 820 nm, colocou-se a esfera integradora representada na Figura 4.4b.



Figura 4.4 – Esferas integradoras: a) Permite determinar a transmitância; b) Permite determinar a reflectância.

A realização deste estudo inicia-se com a execução de uma linha de base, com o objectivo de eliminar o ruído de fundo, permitindo assim obter resultados sem qualquer influência do espectro das lâmpadas que compõem o aparelho.

A absorvância foi determinada no intervalo de c.d.o de 300 a 900 nm pela expressão 7 (capítulo 2).

4.3 Ensaaios de Tracção

4.3.1 Procedimento Experimental

Os ensaios de tracção, foram realizados numa máquina de tracção *Rheometric Scientific*, modelo Minimat – *FirmWare* 3.1 (Figura 4.5), à temperatura ambiente.

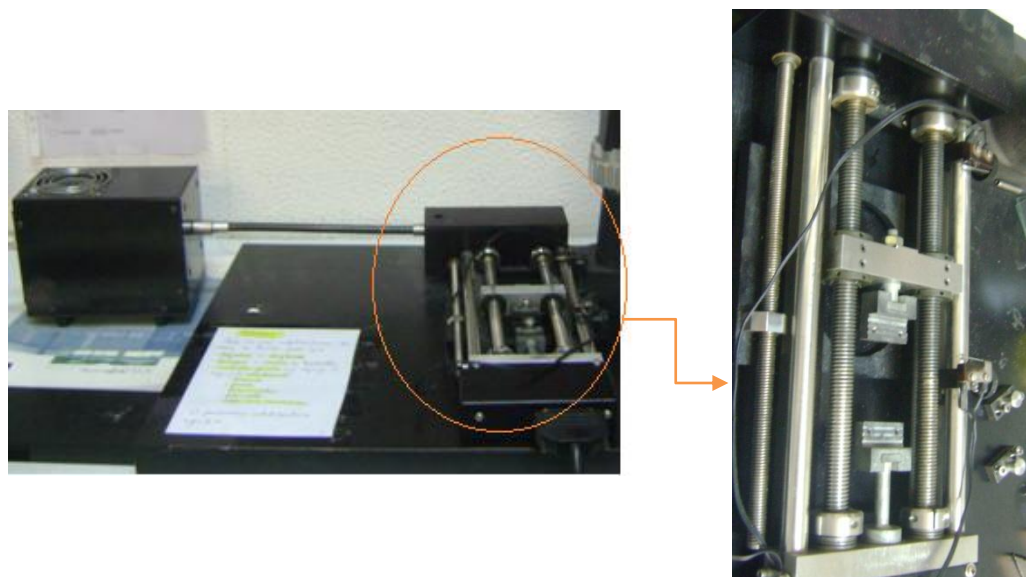


Figura 4.5 – Máquina de tracção *Rheometric Scientific*, modelo Minimat – *FirmWare 3.1*, localizada no Departamento de Materiais na FCT.

De seguida preparam-se os provetes, mediram-se as suas dimensões através do paquímetro (Figura 4.6a) e do medidor de espessura (Figura 4.6b).



(a)



(b)

Figura 4.6 – Instrumentos usados nas medições das dimensões dos provetes: a) Paquímetro; b) Medidor de espessura.

Foram ensaiadas 4 provetes de $\approx 4 \times 2$ cm para cada silicone (Elastosil RT[®] 601, Sylgard[®] 184, Qsil 216 e PV-6010). Para cada ensaio colocou-se e apertou-se o provete nas garras da máquina de tracção. Este foi traccionado, uniaxialmente, com velocidade de deslocamento constante de 5 mm/min.

Nesta máquina de tracção também se realizou um teste de adesão. Para a realização deste ensaio adaptou-se uma peça à máquina de tracção, a peça que se encontra na Figura 4.7. A amostra de silicone apresentava uma dimensão de $4 \times 3,5$ cm. Esta foi colocada na máquina de tracção e traccionada uniaxialmente, com velocidade de deslocamento constante de 5 mm/min.

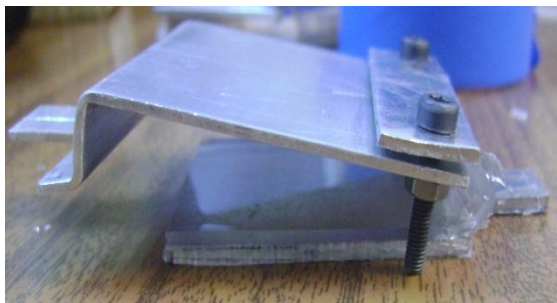


Figura 4.7 – Amostra de silicone, com uma peça de adaptação para realizar o teste de adesão, na máquina de tracção.

4.4 Exposição à luz UV

4.4.1 Procedimento Experimental

Nesta dissertação, para realizar o estudo da influência da exposição dos silicones à radiação UV, foram preparadas 5 amostras dos silicones (Elastosil[®] RT 601, Sylgard[®] 184, Qsil 216, PV-6010 e o Low 1-2577). As amostras foram expostas à radiação UV com c.d.o de 254 nm (radiação UV-C), com radiação de $2,14 \times 10^{-6} \text{ W/cm}^2$, a lâmpada UV é de Xénon em forma de tubo (Figura 4.8), com capacidade de 4 W. A experiência foi realizada à temperatura ambiente.



Figura 4.8 – Lâmpada UV, para exposição dos silicones à radiação UV.

5 Análise e Discussão dos Resultados

Ao longo deste capítulo serão apresentados os resultados obtidos neste trabalho, nomeadamente as características de vários tipos de silicões.

5.1 Importância de um encapsulante numa célula solar

Após a realização do procedimento experimental elaborado para provar a importância do encapsulante numa célula solar, obtiveram-se periodicamente os parâmetros eléctricos da célula. Na Figura 6.3 encontra-se um resumo da evolução dos parâmetros eléctricos da célula, ao longo do tempo de exposição ao meio exterior.

Tabela 5.1 – Comparação entre os parâmetros eléctricos da célula obtidos pela curva I-V.

Tempo (semanas)	$V_{OC}(V)$	$I_{SC}(A)$	$P_{max}(W)$	$V_{max}(V)$	$I_{max}(A)$	FF	$R_S(\Omega)$	$R_{SH}(\Omega)$	Poder de degradação (%)	η célula (%)
0	0,537	0,16	0,058	0,407	0,142	0,686	1,000	228,122	--	10,919
2	0,56	0,14	0,044	0,437	0,101	0,580	1,111	111,991	24,138	8,339
7	0,56	0,12	0,045	0,437	0,103	0,664	1,250	108,247	22,414	8,504
9	0,283	0,11	0,01	0,18	0,057	0,318	1,500	44,182	82,759	1,938

Analisando a Figura 5.1 e o gráfico da Tabela 5.1 pode visualizar-se que todos os parâmetros eléctricos da célula são afectados. De notar que da sétima para a nona semana, os valores de V_{OC} , P_{max} , V_{max} , I_{max} , FF, R_S e R_{SH} sofreram grandes alterações, o que indica que a célula sofreu uma forte degradação de 22,414% para 82,759%, logo a eficiência da célula diminuiu de 8,504% para 1,938%.

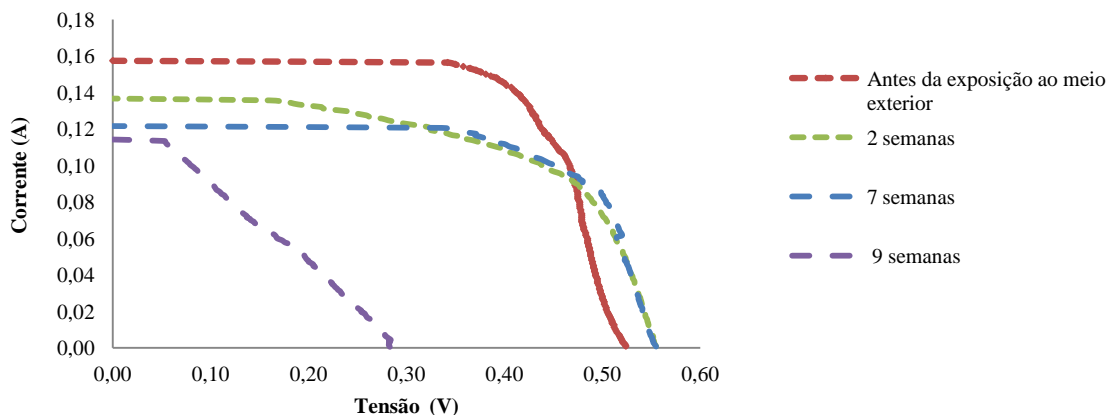
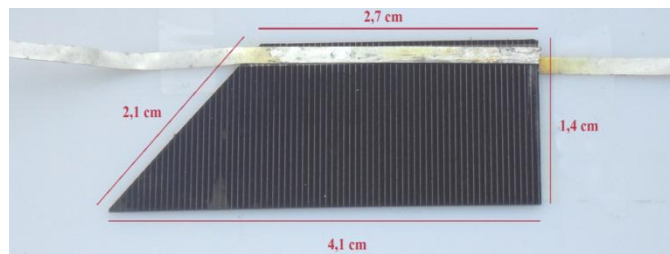


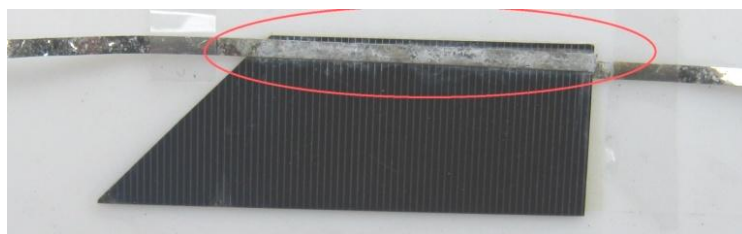
Figura 5.1 – Curvas I-V da célula solar ao longo da exposição ao meio exterior.

O valor de P_{\max} diminui, uma vez que este parâmetro depender de V_{\max} e I_{\max} , e como estes valores estão a diminuir, logo a P_{\max} também será cada vez menor. O FF diminui, pois está relacionado com o V_{OC} , I_{SC} , V_{\max} e I_{\max} , valores esses que sofreram grande diminuição da sétima para a nona semana. No entanto, da segunda para a sétima semana o FF subiu, podendo esta subida advir de um erro de medição (maus contactos ou a uma posição diferente no simulador aquando da medição da curva I-V). O aumento da R_S , tal como esperado, aumenta ao longo do tempo, uma vez que este parâmetro está associado à resistência dos contactos metálicos da célula. A R_{SH} é o parâmetro que melhor consegue avaliar a degradação da célula. Isto porque, esta resistência depende da qualidade do material, sendo o material melhor quanto maior for o valor desta resistência.

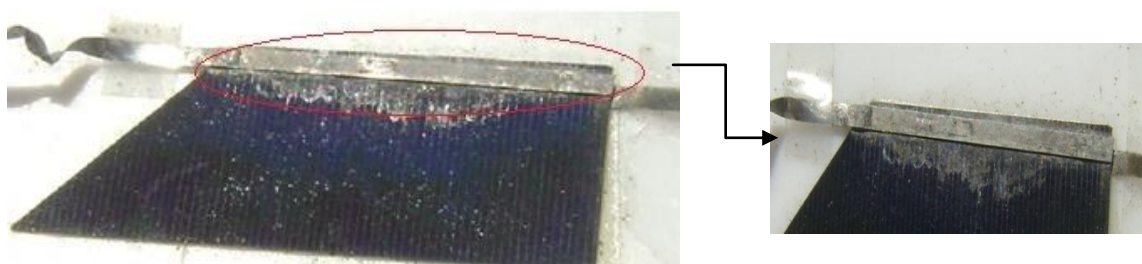
Na Figura 5.2 podem visualizar-se imagens que demonstram a evolução da degradação da célula. Verifica-se a degradação dos contactos metálicos, nomeadamente o aparecimento de corrosão, logo após a segunda semana. Na nona semana os contactos encontram-se mais corroídos e observa-se o aparecimento de manchas na célula.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.2 – Imagens da célula solar ao longo do tempo de exposição do meio exterior: a) Antes da exposição; b) Após 2 semanas; c) Após 9 semanas.

5.2 Características Ópticas do Silicóne

5.2.1 Espectroscopia IV-Visível-NIR

Nesta secção são apresentadas e analisadas através dos gráficos e tabelas as características ópticas (transmitância, absorvância e reflectância), dos vários silicónes, com diferentes espessuras, através do procedimento descrito na secção 4.2.1.

Inicialmente mediu-se as características ópticas do vidro, onde este material serve de suporte às amostras de silicóne, e posteriormente, foram então medidas as características ópticas dos silicónes.

Vidro

Na Figura 5.3a), observa-se a transmitância do vidro, onde se verifica que o vidro começa a transmitir radiação a partir dos 290 nm. Na região do UV, apresenta uma transmitância de 32,77% e na região do visível uma transmitância de 90,14%.

Na Figura 5.3b), observa-se a reflectância e a absorvância do vidro. Verifica-se que o vidro reflecte maior intensidade de radiação na região do visível (com um valor de 8,49%).

Contudo, ao comparar a reflectividade do vidro na região do visível e do UV, é possível observar um ligeiro decréscimo (8,49 % para 7,94%).

Relativamente à absorvância, observa-se que existe uma elevada absorção da intensidade de radiação na região dos UV, sendo o seu valor de 59%, contrariamente ao ocorrido na região do visível, onde o vidro absorve 1% da radiação.

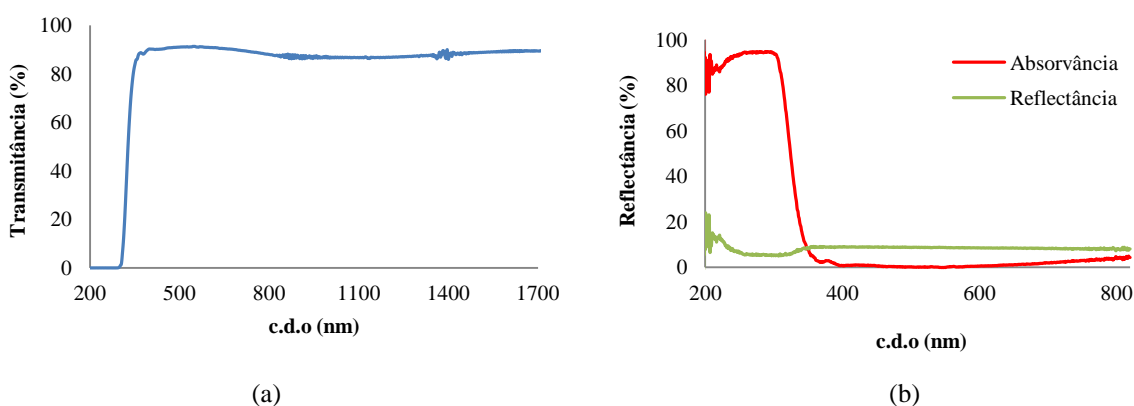


Figura 5.3 – Medição de a) Transmitância e b) Absorvância e Reflectância, de um vidro com 2 mm de espessura.

Elastosil RT[®] 601

No caso do silicone Elastosil RT[®] 601 foram estudados os parâmetros ópticos para espessuras de 0,5;1,2,4,6,10 mm, nas regiões do visível e UV. Para este silicone estudou-se a espessura de 10 mm, devido à existência de um gráfico teórico com esta espessura, permitindo a comparação entre o gráfico obtido experimentalmente e o gráfico fornecido pelo fornecedor. Neste estudo é ainda apresentado o espectro AM 1.5 e o espectro de silício, comparados com a transmitância das melhores espessuras.

Na Figura 5.4, observa-se a comparação entre a transmitância do gráfico fornecido pelo produtor (Figura 5.4a) e do obtido experimentalmente (Figura 5.4b). Verifica-se que os dois gráficos apresentam o mesmo perfil. No entanto, o gráfico experimental da transmitância começa a transmitir radiação, apenas aos 290 nm, visto que o vidro somente permite a passagem de radiação nesse c.d.o.

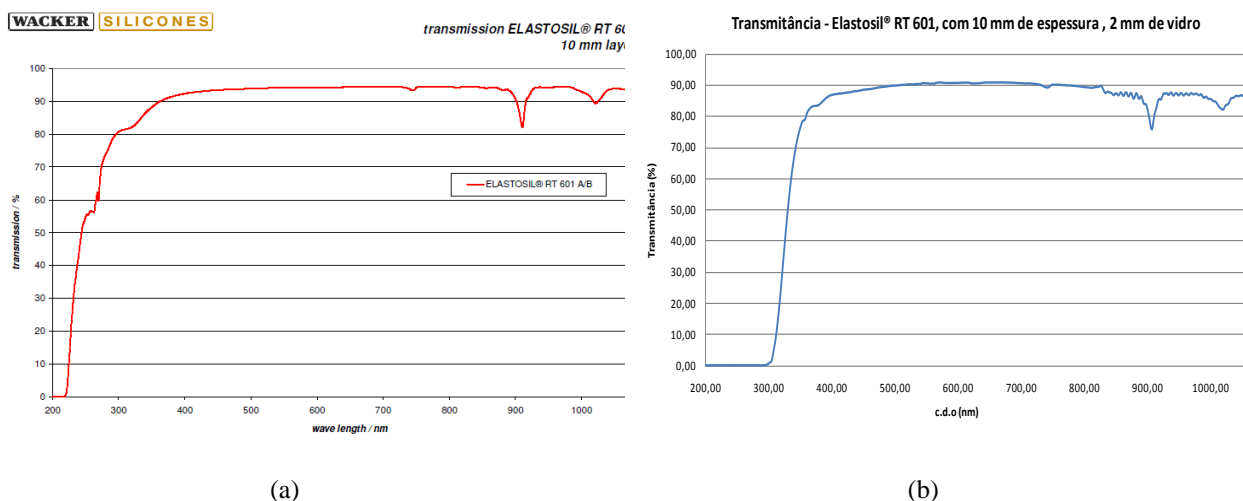


Figura 5.4 – Transmitância do Elastosil RT[®] 601 com espessura de 10 mm: a) Gráfico fornecido pelo produtor; b) Gráfico experimental.

Na Tabela 5.2 pode visualizar-se um quadro síntese de todas as medidas de transmitância, absorvância e reflectância do Elastosil RT[®] 601. Pela análise da tabela, verifica-se que as melhores espessuras são:

- 2 mm, por possuir maior transmitância (32,92%) e menor absorvância (61,60%) na região UV, além de possuir uma transmitância de 90,10% e uma absorvância de 2,71% na região visível.
- 1 mm, devido a apresentar maior transmitância na região do visível de 91,24% e uma absorvância de 1,63%. Apresenta ainda os valores de transmitância de 31,83% e uma absorvância de 62,62% na região dos UV.

Tabela 5.2 – Síntese dos parâmetros ópticos, para o Elastosil RT[®] 601.

Espessura	Elastosil RT [®] 601					
	Região do UV (290≤λ≤399)			Região do Visível (400≤λ≤820)		
	Transmitância (%)	Absorvância (%)	Reflectância (%)	Transmitância (%)	Absorvância (%)	Reflectância (%)
0,5	31,63	63,00	5,51	84,39	8,13	7,48
1	31,83	62,62	5,69	91,24	1,63	7,12
2	32,92	61,6	5,62	90,10	2,71	7,19
4	31,74	62,79	5,62	88,85	3,93	7,22
6	29,89	64,52	5,73	86,77	5,84	7,39
10	30,00	64,73	5,40	89,81	2,94	7,25

Na Figura 5.5 pode visualizar-se uma comparação entre a eficiência quântica de uma célula solar de silício (KVAZAR) [59], o espectro AM 1.5 [60] e a transmitância das duas espessuras acima escolhidas.

Observa-se que a célula possui uma maior capacidade de converter os fótons incidentes em energia eléctrica, nas regiões do visível e IV (Infravermelho). Ambas as espessuras do encapsulante apresentam uma transmitância capaz de permitir o correcto desempenho da célula solar.

Após comparação das duas espessuras, nota-se que a espessura de 1 mm apresenta uma maior transmitância onde um maior índice de radiação na zona do espectro e onde a célula de silício apresenta uma melhor eficiência de conversão.

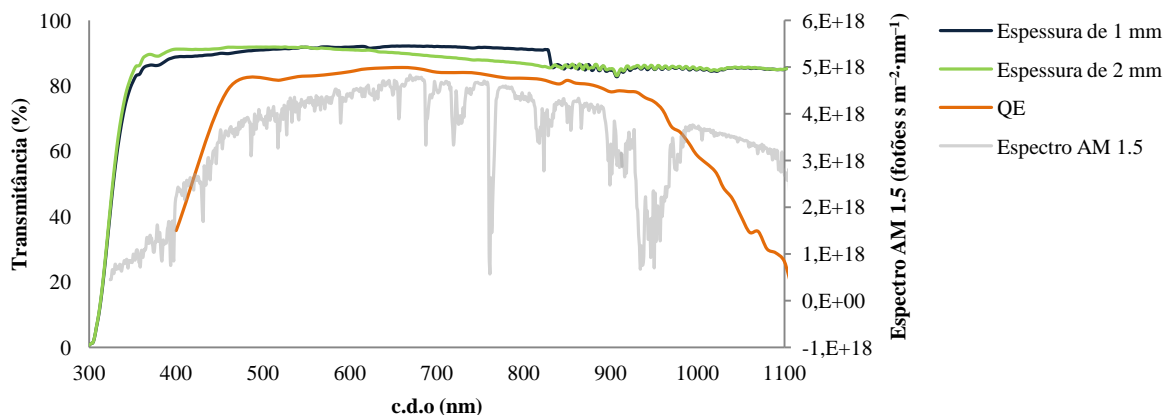


Figura 5.5 – Relação entre a transmitância das duas melhores espessuras do silicone Elastosil RT[®] 601, o espectro AM 1.5 e a eficiência quântica da célula de silício, nas radiações do UV, visível e IV.

Sylgard[®] 184

Para o Sylgard[®] 184 foi efectuado o mesmo procedimento de análise realizado anteriormente. No entanto apenas foram estudadas as características ópticas para as espessuras de 0,5;1;2;4 e 6 mm, esta escolha deve-se ao espaçamento existente entre elas, o que permite uma melhor observação do seu comportamento no gráfico. Pela análise da Tabela 5.3, verifica-se que a espessura de 0,5 mm permite uma maior transmitância da radiação incidente, na região do UV e visível, quando comparada com as restantes espessuras (33,02% e 90,19%, respectivamente).

A espessura de 0,5 mm apresenta valores de reflectividades de 5,41% na região do UV e de 7,19% na região do visível. Em relação à absorvância, esta espessura é a que absorve menos radiação, apresentando um valor de 2,62% na região do visível e 60,92% na região do UV.

Tabela 5.3 – Síntese dos parâmetros ópticos, para o Sylgard® 184.

Sylgard® 184						
Espessura	Região do UV ($290 \leq \lambda \leq 399$)			Região do Visível ($400 \leq \lambda \leq 820$)		
	Transmitância (%)	Absorvância (%)	Reflectância (%)	Transmitância (%)	Absorvância (%)	Reflectância (%)
0,5	33,02	60,92	5,41	90,19	2,62	7,19
1	31,18	62,63	5,32	88,43	3,96	7,61
2	31,62	62,71	9,02	87,14	5,57	7,29
4	27,06	66,71	4,47	83,75	9,05	7,2
6	29,37	64,55	3,49	87,99	4,84	7,17

Na Figura 5.6 pode visualizar-se uma comparação entre a eficiência quântica de uma célula de silício, o espectro AM 1.5 e a transmitância do Sylgard® 184, para a espessura de 0,5 mm. Observa-se que a transmitância desta espessura é sempre superior à eficiência quântica, obtendo-se um menor número de perdas na eficiência de conversão da célula.

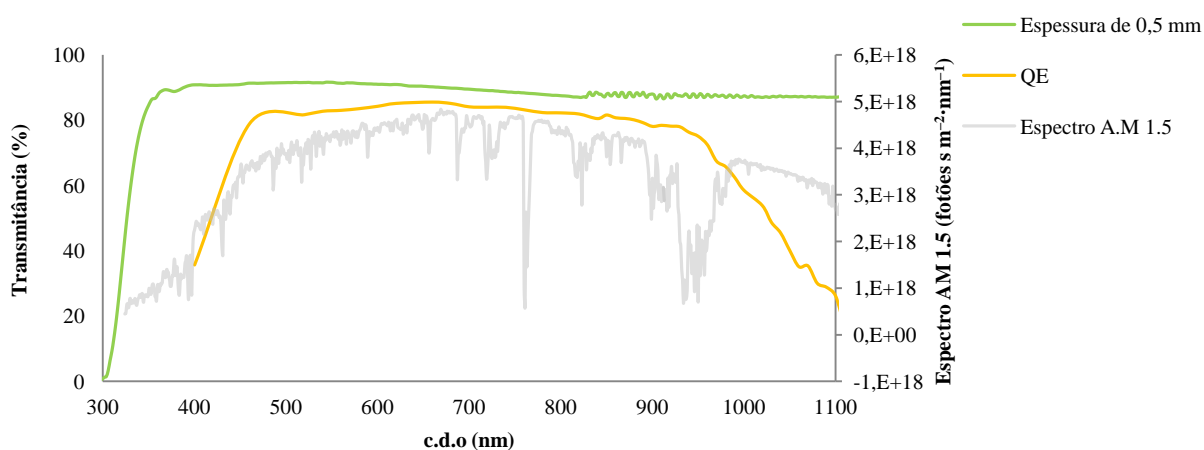


Figura 5.6 – Relação entre a transmitância da espessura de 0,5 mm do silicone Sylgard® 184, o espectro AM 1.5 e a eficiência quântica da célula de silício, nas radiações do UV, visível e IV.

Qsil 216

Para o Qsil 216 é usado o mesmo procedimento experimental descrito para o Slygard® 184. No entanto, começa-se por observar uma comparação entre transmitância do gráfico fornecido pelo produtor (Figura 5.7a) e do gráfico obtido experimentalmente (Figura 5.7b), para a espessura de 2 mm. Como se pode verificar os gráficos não apresentam o mesmo perfil de transmitância, o que se poderá dever a erros ocorridos durante o processo de produção (tempos de cura e aplicação do encapsulante, condições ambientais não controladas, reacção de vulcanização não finalizada).

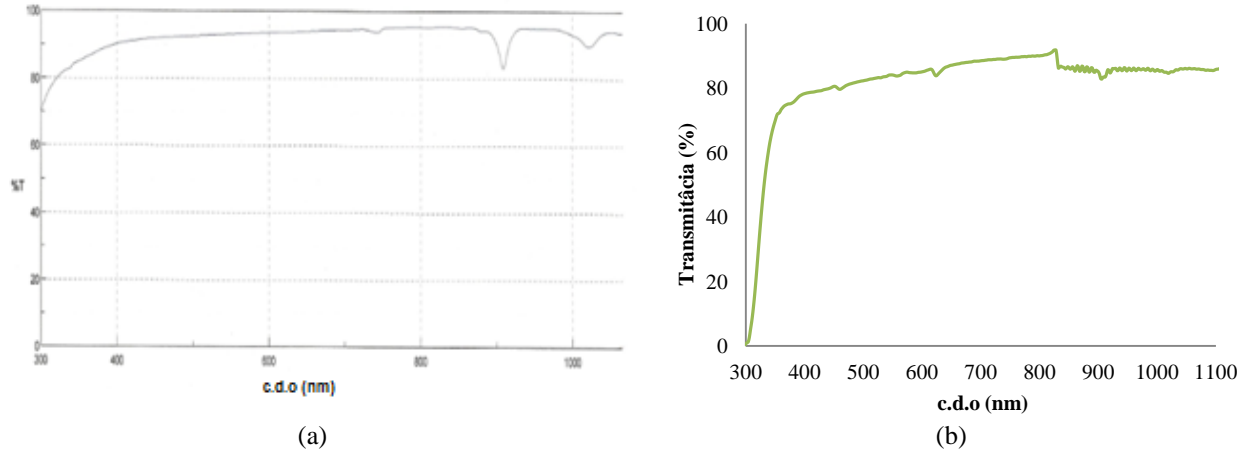


Figura 5.7 – Transmitância do Qsil 216, para a espessura de 2 mm: a) Gráfico fornecido pelo produtor; b) Gráfico obtido experimentalmente.

Na Tabela 5.4 pode visualizar-se um quadro síntese de todas as medidas de transmitância, absorvância e reflectância do Qsil 216. Verifica-se que a espessura de 6 mm permite uma transmitância de 89,93%, reflectância de 6,23% e absorvância de 3%, na região do visível. As restantes amostras com menores espessuras apresentam menor transmitância, na região do visível.

Relativamente à região UV, a espessura de 6 mm é uma das que transmite, absorve e reflecte menos radiação com valores de 29,67%, 64,25% e 6,23%, respectivamente.

Tabela 5.4 – Síntese dos parâmetros ópticos, para o Qsil 216.

Espessura	Qsil 216					
	Região do UV ($290 \leq \lambda \leq 399$)			Região do Visível ($400 \leq \lambda \leq 820$)		
	Transmitância (%)	Absorvância (%)	Reflectância (%)	Transmitância (%)	Absorvância (%)	Reflectância (%)
0,5	30,99	62,75	6,42	86,96	5,86	7,17
1	27,71	65,81	6,65	82,51	10,14	7,35
2	27,62	66,14	6,4	85,22	7,68	7,1
4	28,09	65,71	6,36	87,55	5,3	7,15
6	29,67	64,25	6,23	89,93	3,00	7,07

Na Figura 5.8 pode visualizar-se uma comparação entre a eficiência quântica de uma célula de silício, o espectro AM 1.5 e a transmitância do Qsil 216, para a espessura de 6 mm. De acordo com os resultados demonstrados anteriormente, a transmitância desta espessura é sempre superior à eficiência quântica da célula.

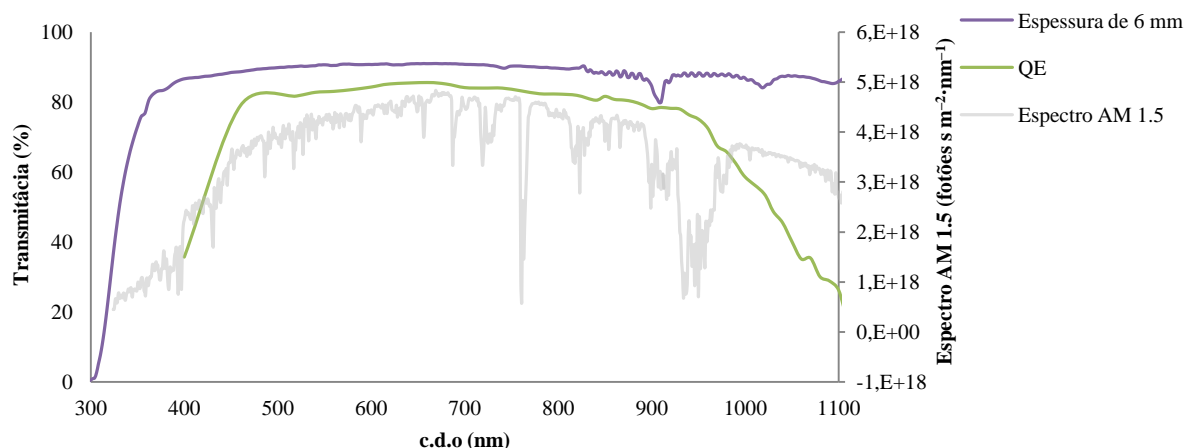


Figura 5.8 – Relação entre a transmitância da espessura de 6 mm do silicone Qsil 216, o espectro AM 1.5, a eficiência quântica da célula de silício, nas radiações do UV, visível e IV.

PV-6010

Para estudar as características ópticas deste silicone realizou-se o mesmo procedimento realizado para o Sylgard® 184. No entanto, para este silicone não foi estudado a espessura de 4 mm, devido a danificações na amostra, o que não permitiu a medição das suas características ópticas. Na Tabela 5.5 pode encontrar-se um quadro síntese de todas as medidas de transmitância, absorvância e reflectância do PV-6010. Verifica-se que a espessura que permite maior passagem de intensidade de radiação é a de 2 mm. Na região dos UV apresenta valores de 30,99%, 63,94% e 5,20% para a transmitância, absorvância e reflectância, respectivamente. Do mesmo modo, para a região do visível temos 90,96%, 1,74% e 7,29% para os mesmos parâmetros acima citados.

Tabela 5.5 – Síntese dos parâmetros ópticos, para o PV-6010.

Espessura	PV-6010					
	Região do UV (290≤λ≤399)			Região do Visível (400≤λ≤820)		
	Transmitância (%)	Absorvância (%)	Reflectância (%)	Transmitância (%)	Absorvância (%)	Reflectância (%)
0,5	31,39	63,41	5,34	89,66	2,96	7,38
1	30,39	64,09	5,67	86,23	6,66	7,12
2	30,99	63,94	5,2	90,96	1,74	7,29
6	27,82	67,08	5,23	83,78	9,91	6,31

Na Figura 5.9 pode visualizar-se uma comparação entre a eficiência quântica de uma célula de silício e a transmitância do PV-6010, para a espessura de 2 mm. Observa-se que a transmitância desta espessura é sempre superior à eficiência quântica da célula. Assim, esta espessura permite um menor número de perdas na eficiência de conversão da célula.

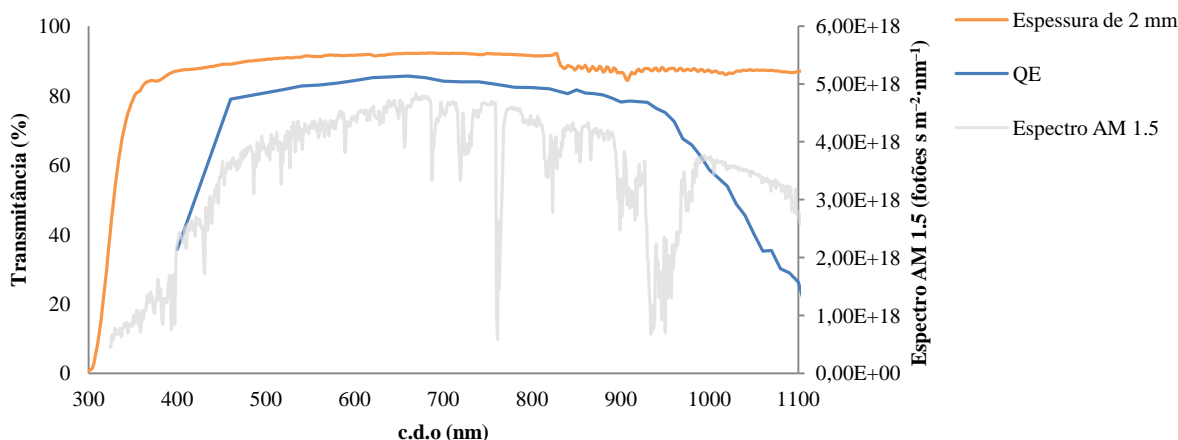


Figura 5.9 – Relação entre a transmitância da espessura de 2 mm do silicone PV-6010, o espectro AM 1.5, a eficiência quântica da célula de silício, nas radiações do UV, visível e IV.

1-2577 Low-VOC

Na Tabela 5.6 pode visualizar-se um quadro síntese de todas as medidas de transmitância, absorvância e reflectância do 1-2577 Low-VOC. Verifica-se que este silicone apresenta uma transmitância de 87,42%, apresentando valores mais elevados para a absorvância e reflectância do que os anteriores silicões.

Relativamente à região do UV possui uma absorvância de 74,49% e apenas transmite 15,99% da radiação incidente o que influencia negativamente a performance do silicone a longo prazo.

Tabela 5.6 – Síntese dos parâmetros ópticos, para o 1-2577 Low-VOC.

1-2577 Low-VOC						
Espessura	Região do U.V. ($290 \leq \lambda \leq 399$)			Região do Visível ($400 \leq \lambda \leq 820$)		
	Transmitância (%)	Absorvância (%)	Reflectância (%)	Transmitância (%)	Absorvância (%)	Reflectância (%)
0,5	15,99	74,49	9,77	87,42	7,29	8,06

Na Figura 5.10 pode visualizar-se uma comparação entre a eficiência quântica de uma célula de silício e a transmitância do 1-2577 Low-VOC, para a espessura de 0,5 mm. Neste silicone apenas foi testado com uma espessura de 0,5 mm, uma vez que é utilizado apenas em baixas espessuras. Observa-se que a sua transmitância é sempre superior à eficiência quântica da célula. Assim, esta espessura permite um menor número de perdas na eficiência de conversão da célula.

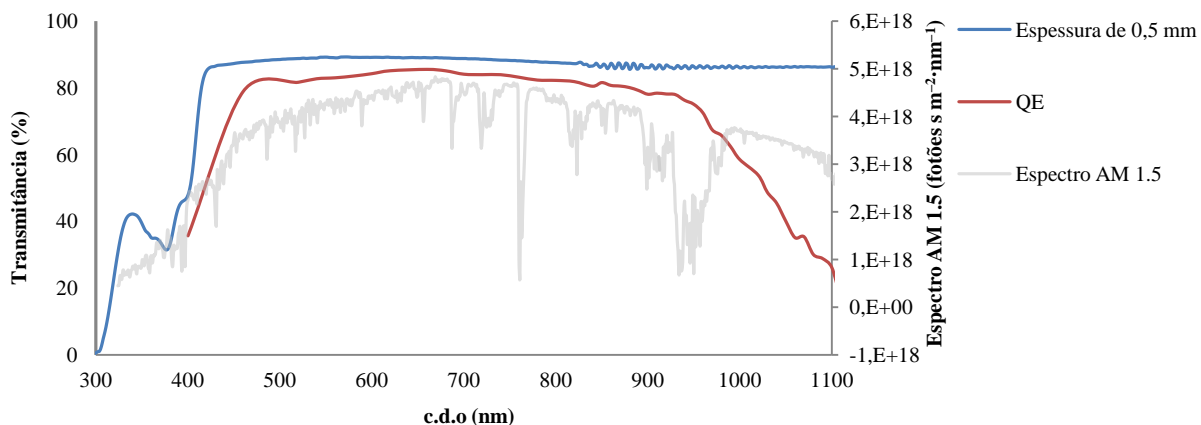


Figura 5.10 – Relação entre a transmitância da espessura de 0,5 mm do silicone 1- 2577 Low-VOC, o espectro AM 1.5, a eficiência quântica da célula de silício, nas radiações do UV, visível e IV.

Na Tabela 5.7 encontra-se um quadro síntese da transmitância de cada silicone, para as diferentes espessuras na região do visível. Os maiores valores de transmitância de cada silicone estão assinalados a sombreado.

Tabela 5.7 – Síntese dos valores de transmitância, de cada silicone e das suas diferentes espessuras, para o intervalo de c.d.o de 400 a 820 nm.

Região do Visível ($400 \leq \lambda \leq 820$)					
Transmitância (%)					
Espessuras	Elastosil RT [®] 601	Sylgard [®] 184	Qsil 216	PV-6010	1-2577 Low-VOC
0,5	84,39	90,19	86,96	89,66	87,42
1	91,24	88,43	82,51	86,23	-
2	90,1	87,14	85,22	90,96	-
4	88,85	83,75	87,55	-	-
6	86,77	87,99	89,93	83,78	-
10	89,81	-	-	-	-

Na Tabela 5.8 é apresentado a síntese dos valores transmitância de cada silicone, para as diferentes espessuras na região do UV. Os maiores valores de transmitância de cada silicone estão assinalados a sombreado.

Tabela 5.8 – Síntese dos valores de transmitância, de cada silicone e das suas diferentes espessuras, para o intervalo de c.d.o de 290 a 399 nm.

Espessuras	Região do UV ($290 \leq \lambda \leq 399$)				
	Transmitância (%)				
	Elastosil RT [®] 601	Sylgard [®] 184	Qsil 216	PV-6010	1- 2577 Low VOC
0,5	31,63	33,02	30,99	31,39	15,99
1	31,83	31,18	27,71	30,39	-
2	32,92	31,62	27,62	30,99	-
4	31,74	27,06	28,09	-	-
6	29,89	29,37	29,67	27,82	-
10	30	-	-	-	-

No gráfico da Figura 5.11 visualiza-se a comparação entre a transmitância das melhores espessuras de cada silicone, o espectro AM 1.5 e a eficiência quântica da célula. Verifica-se que as espessuras que possuem maior transmitância na região do visível são as de 1 mm do Elastosil RT[®] 601 e de 2 mm do PV-6010 (91,24% e 90,96%, respectivamente). Contudo, na região do UV (Tabela 5.8) as espessuras que possuem maior transmitância são as de 2 mm do Elastosil RT[®] 601 e de 0,5 mm para o Sylgard[®] 184, Qsil 216 e PV-6010. Não obstante, na escolha da melhor espessura para o silicone deve ter-se em conta qual a região do espectro em que a célula solar apresenta uma maior eficiência de conversão (região dos visíveis).

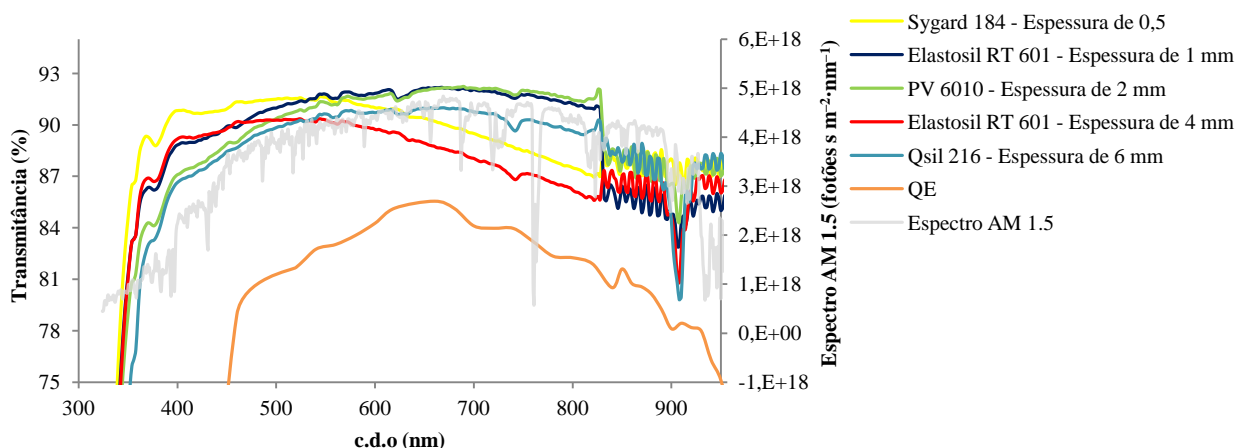


Figura 5.11 – Relação entre as melhores espessuras de cada silicone, o espectro AM 1.5 e a eficiência quântica da célula solar.

De acordo com o estudo efectuado, verifica-se que os melhores silicones para o encapsulamento de células solares são o PV-6010 com espessura de 2 mm e o Elastosil RT[®] 601 com espessura de 1 mm.

Neste teste não foram analisados o Elastosil[®] Solar 3210, uma vez que possui características semelhantes ao Elastosil[®] RT 601 e o EGel devido a este silicone ter demonstrado uma baixa dureza nos testes preliminares.

No anexo VII, encontram-se quatro figuras para cada silicone estudado, a primeira apresenta a relação entre a transmitância dos vários silicões, para as várias espessuras, com o espectro AM 1.5, no intervalo de c.d.o de 300 a 2500 nm. Na segunda figura consta uma comparação entre as várias espessuras dos vários silicões e a eficiência quântica de uma célula de silício. A terceira e quarta representam a reflectância e absorvância dos vários silicões, nas radiações do UV e visível, para várias espessuras.

5.3 Características Mecânicas do Silicone

5.3.1 Ensaios de resistência mecânica em tracção

Como resultado dos ensaios de tracção obtêm-se uma curva tensão-deformação. Através desta é possível obter o módulo de young.

De seguida é apresentado (Figura 5.12) um exemplo de como foi determinado o E, para o primeiro ensaio realizado ao Elastosil RT[®] 601:

- Determinação do módulo de Young:

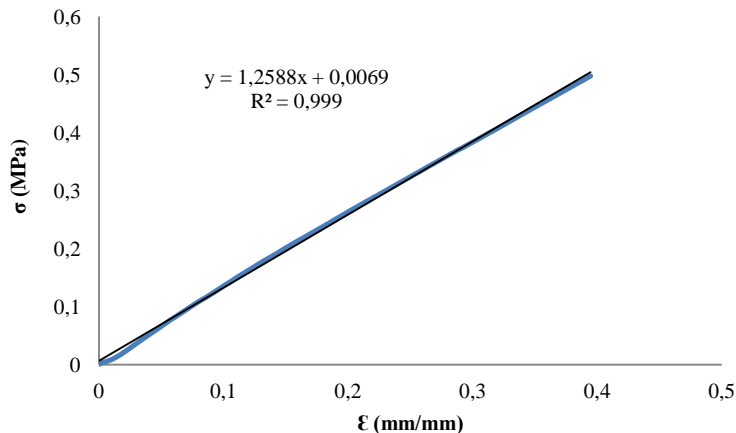


Figura 5.12 – Determinação do módulo de Young no ensaio de tracção.

Após o tratamento dos dados, os resultados obtidos para cada silicone encontram-se na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Comparação do módulo de Young para os diferentes silicones.

Ensaio	E (MPa)			
	Elastosil® RT 601	Sylgard® 184	Qsil 216	PV-6010
1	1,2588	1,6716	0,9356	0,0313
2	1,2015	1,7065	0,9911	0,0270
3	1,1380	1,7470	0,9685	0,0280
Média	1,1994	1,7084	0,9651	0,0288
Desvio padrão	0,0604	0,0377	0,0279	0,0022

Com os resultados obtidos pode-se concluir que o PV-6010 possui uma elevada capacidade de deformação, sendo o silicone mais flexível, ou seja, é o que possui ligações mais fracas entre os seus constituintes moleculares, uma vez que apresenta um menor valor de E. Ao contrário o Sylgard® 184 é o que possui maior valor de E. Assim dos quatro silicones estudados o Sylgard® 184 é o que representa maior rigidez e menor deformação quando sujeito a uma tensão. Neste teste não foram analisados o Elastosil® Solar 3210, uma vez que possui características semelhantes ao Elastosil® RT 601, o 1- 2577 Low VOC uma vez que aquando da realização desta experiência, o silicone ainda não se encontrava na empresa, e o EGel, devido a este silicone ter demonstrado uma baixa dureza nos testes preliminares.

Adesão

Relativamente aos testes de adesão realizados, os resultados obtidos mostraram-se inconclusivos, devido a principalmente dois pontos: O primeiro ponto prende-se com o facto de não ter existido acesso a uma máquina de tracção própria para a realização dos testes de adesão. No entanto, de modo a contornar esta situação, foi então adaptada uma peça especialmente desenvolvida para este fim, à máquina de tracção onde os testes de caracterização mecânica foram realizados. No entanto esta nova montagem também não se mostrou eficaz, levando ao segundo ponto que não permitia a realização deste teste. Após a aplicação do silicone na peça construída, quando colocado na máquina de tracção, o silicone partiu, invalidando qualquer conclusão que poderia ser retirada do ensaio. (Figura 5.13).

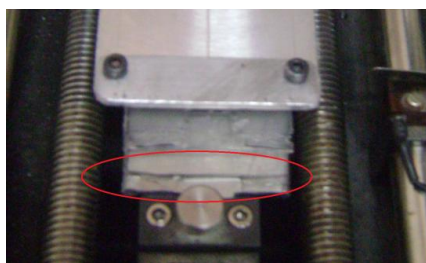


Figura 5.13 – Elastosil® RT 601, logo no do teste de adesão.

5.4 Exposição ao UV

Após teste da exposição ao UV, os resultados obtidos encontram-se nas tabelas 5.10, 5.11 e 5.12. Estas apresentam um resumo do comportamento óptico do silicone, nomeadamente a transmitância de cada silicone estudado, na região UV, visível e IV.

Tabela 5.10 – Resumo da transmitância de cada silicone no intervalo de c.d.o de 300 a 399 nm, ao longo do tempo de exposição à radiação UV.

Tempo (h)	Região UV				
	Transmitância (%)				
	Elastosil [®] RT 601	Sylgard [®] 184	Qsil 216	PV-6010	1-2577 Low VOC
0	63,781	62,132	52,155	60,144	5,096
3	62,135	60,492	51,143	58,843	4,935
26	61,285	56,912	48,166	56,266	4,070
49	61,063	54,697	46,170	54,762	3,671
72	60,867	53,153	44,895	54,265	3,352
95	60,696	53,083	44,051	54,326	2,982
575	60,216	54,905	46,534	57,288	2,255
Diferenças entre t=0h e t=575h	3,564	7,228	5,621	2,856	2,841

De seguida segue-se a Tabela 5.11, que mostra um resumo do comportamento da transmitância na região do visível, ao longo do tempo de exposição à radiação UV.

Tabela 5.11 – Resumo da transmitância de cada silicone no intervalo de c.d.o 400 a 899 nm, ao longo do tempo de exposição à radiação UV.

Tempo (h)	Região Visível				
	Transmitância (%)				
	Elastosil [®] RT 601	Sylgard [®] 184	Qsil 216	PV-6010	1-2577 Low VOC
0	88,852	86,682	82,324	88,730	85,072
3	87,721	85,623	82,553	88,714	85,253
26	88,103	85,788	81,730	88,571	84,276
49	87,555	84,972	82,825	88,348	84,736
72	87,689	84,320	81,750	88,097	83,698
95	87,700	84,854	81,524	88,038	83,241
575	86,639	83,693	84,187	88,432	82,484
Diferenças entre t=0h e t=575h	2,213	2,989	-1,863	0,298	2,588

Na Tabela 5.12 mostra-se um resumo do comportamento da transmitância na região do IV, ao longo do tempo de exposição à radiação UV.

Tabela 5.12 – Resumo da transmitância de cada silicone no intervalo de c.d.o 900 a 1500 nm, ao longo do tempo de exposição à radiação UV.

Tempo (h)	Região IV				
	Transmitância (%)				
	Elastosil® RT 601	Sylgard® 184	Qsil 216	PV-6010	1-2577 Low VOC
0	82,495	82,873	81,833	83,576	85,540
3	82,291	82,776	82,468	83,633	85,684
26	82,275	82,542	81,681	83,490	85,386
49	82,185	82,078	82,181	83,275	85,655
72	82,386	81,086	81,852	83,272	85,376
95	82,326	82,170	81,865	83,293	85,510
575	81,612	82,460	83,063	83,034	86,154
Diferenças entre t=0h e t=575h	0,883	0,412	-1,231	0,542	-0,614

Pela análise das tabelas verifica-se que todos os silicones sofreram alterações no modo de como transmitem a radiação incidente, ou seja, a transmitância diminuiu ao longo do tempo de exposição da radiação UV, visível e IV. Isto significa que o silicone em vez de transmitir, absorve ou reflecte a radiação incidente. Se o silicone absorve este tipo de radiação, irá provocar fracturas das ligações químicas e envelhecimento do silicone, o que implica quebras/minimização da optimização das suas propriedades, tanto mecânicas, ópticas ou químicas. Ou seja, silicones degradados vão perdendo as suas qualidades, o que implica uma diminuição do rendimento do sistema.

Das três regiões do espectro electromagnético estudadas, verifica-se uma diminuição mais acentuada da transmitância na região do UV, isto significa que nesta região se absorve ou reflecte a radiação. Sendo a radiação IV a que sofre menos alterações na transmitância dos silicones.

O silicone que apresenta uma diminuição mais significativa em todas as regiões estudadas é o Sylgard® 184. No caso do Qsil 216, este apresenta para a região do visível e IV um valor negativo entre a transmitância medida no início do teste e a transmitância medida no fim do teste. Isto deve-se eventualmente a uma incorrecta mistura dos componentes do silicone parte A e B, o que pode provocar uma cura mal efectuada. Assim as medidas da transmitância na região dos UV, podem não ter sido bem efectuadas.

No anexo VIII encontram-se os gráficos da transmitância em função do c.d.o (200-1500 nm), correspondentes a cada um dos silicones estudados.

Neste teste também não foram analisados o Elastosil[®] Solar 3210 e o EGel, devido às razões anteriormente descritas.

Na Tabela 5.13 encontra-se discriminado um resumo de todos os testes efectuados durante o decorrer desta dissertação.

Análise e Discussão dos Resultados

Tabela 5.13 – Resumo dos resultados dos testes, realizados aos silicões ao longo desta tese.

	Testes Experimentais	Silicões							
		Elastosil® Solar 3210	Elastosil RT® 601	Sylgard® 184	Qsil 216	PV-6010	EGel 3000	1-2577 Low- VOC	
Preparação do silicone	Tempo de mistura (min)	20	20	30	20	30	20	-	
	Temperatura/Tempo de cura (°C/min)	100/10	100/10	150/10	100/60	80/30	100/80	80/30	
Comportamento do silicone	Vazamento da Estrutura								
	Rigidez								
	Mudanças de cor (após cura)								
Eficiência	0,5 mm		84,39	90,19	86,96	89,66		87,42	
	1 mm		91,24	88,43	82,51	86,23		T.N.R	
	2 mm	T.N.R	90,10	87,14	85,22	90,96	T.N.R	T.N.R	
	4 mm		88,85	83,75	87,55	-		T.N.R	
	6 mm		86,77	87,99	89,93	83,78		T.N.R	
	Resistência à deformação (MPa)	T.N.R	1,1994	1,7084	0,9651	0,0288	T.N.R	T.N.R	
Durabilidade	Diferenças da Transmitância (t=0h e t=575h)	UV	T.N.R	3,564	7,228	5,621	2,856	T.N.R	2,841
	Visível		T.N.R	2,213	2,989	-1,863	0,298	T.N.R	2,588
	IV		T.N.R	0,883	0,412	-1,231	0,542	T.N.R	-0,614
Primer		Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Sim	
Preço	€/ 1 kg	N.D	49	148	122	N.D	77	54,54	
	€/30 kg	N.D	39	115	N.D	50,19	N.D	N.D	
	€/900kg	22	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	

Critérios de Avaliação:



Desfavorável



Médio



Favorável

Legenda

6 Avaliação dos Silicones de acordo com a Norma IEC 62108

Neste capítulo realizaram-se testes com o objectivo de submeter os receptores FV a testes acelerados e agressivos de modo a que haja um impacto na performance dos receptores e/ou uma diminuição considerável na qualidade do encapsulante. E assim detectar possíveis defeitos no design dos receptores. Estes testes foram baseados na norma IEC 62108, sendo os testes realizados o *damp heat*, o *thermal cycling* e o *ultraviolet conditioning*.

Devido a estes testes terem sido realizados numa parceria com a empresa Lógica E.M., apenas houve a possibilidade de efectuar os testes a receptores com um silicone, o Elastosil[®] RT 601, sendo este um dos mais promissores já que possui uma das melhores relações preço/qualidade.

Assim, foi desenvolvida uma metodologia que torna o processo de desenvolvimento do HSUN[®] num “case-study”. Esta metodologia pode ser aplicada a vários concentradores fotovoltaicos.

A metodologia proposta é composta por duas fases: *Crash Tests* e a fase de pré-certificação. Este procedimento apresenta como vantagem uma redução efectiva do tempo de detecção de defeitos e problemas relacionados com o HSUN[®] preparando-o para a etapa de certificação. Na Figura 6.1 está representado um esquema da metodologia proposta:

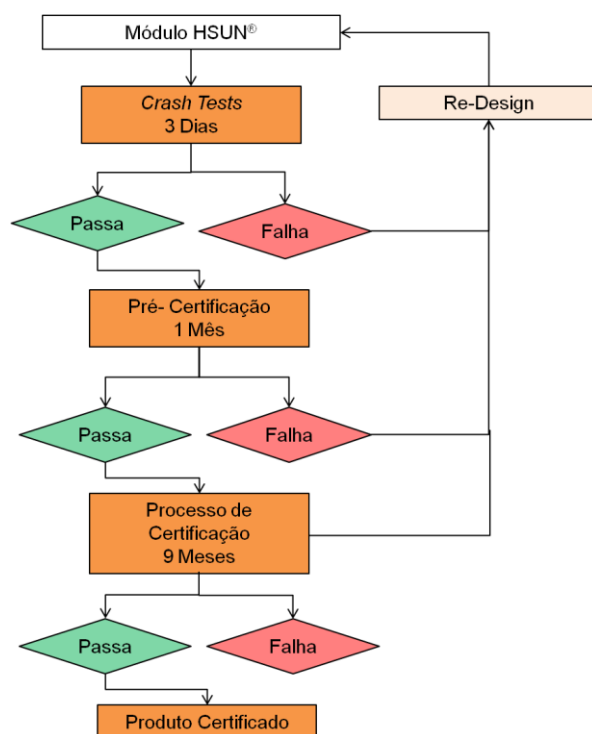


Figura 6.1 – Metodologia utilizada para certificar o módulo HSUN[®][1].

6.1 *Crash Tests*

A Figura 6.2 mostra a sequência dos *Crash Tests*, estes têm como objectivo submeter os receptores a testes ambientais agressivos e acelerados adaptados da IEC 62108 [34], durante três dias. Estes primeiros testes tiveram como incidência testes climáticos e mecânicos mas neste relatório apenas se apresentam os resultados com influência directa nos encapsulantes.

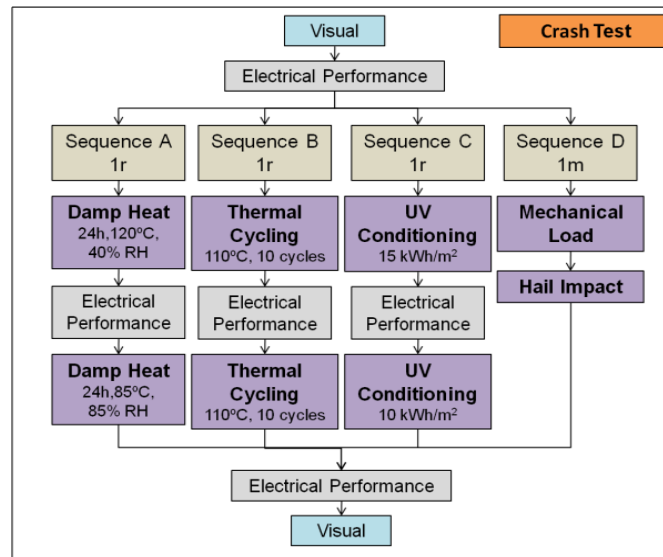


Figura 6.2 – Sequência dos *Crash Tests*, durante 3 dias [1].

Em seguida são descritos os testes experimentais realizados no *Crash Tests*. A fim de avaliar o desempenho sub-receptores do módulo HSUN[®], foram medidos curvas I-V antes, durante e no final dos testes experimentais.

6.1.1 *Damp Heat*

O teste do *damp heat* têm como objectivo averiguar a perda de performance, após exposição do sub-receptor à humidade, de modo a avaliar a adesão, corrosão, aparecimento de delaminações ou bolhas. Para a realização do teste *damp heat* foi colocado 1 sub-receptor, numa câmara ambiental. Numa primeira fase do teste submeteu-se o sub-receptor à temperatura de 120 °C e 40% de humidade relativa, durante 24 horas. Na segunda fase do teste submeteu-se o mesmo sub-receptor à temperatura de 85°C e 85% de humidade relativa, durante 24 horas. Os principais parâmetros, tais como: temperatura no interior da câmara, temperatura no sub-receptor e humidade relativa (RH) a que o sub-receptor foi sujeito ao longo do teste encontram-se na Figura 6.3 e Figura 6.4, na primeira e segunda fase do teste, respectivamente.

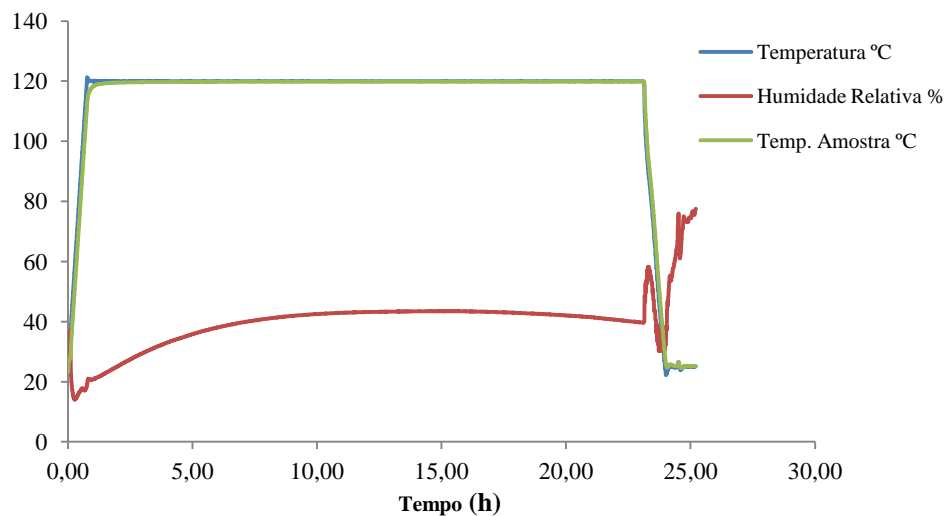


Figura 6.3 – Representação dos principais parâmetros durante o teste do *damp heat*, na primeira fase do teste.

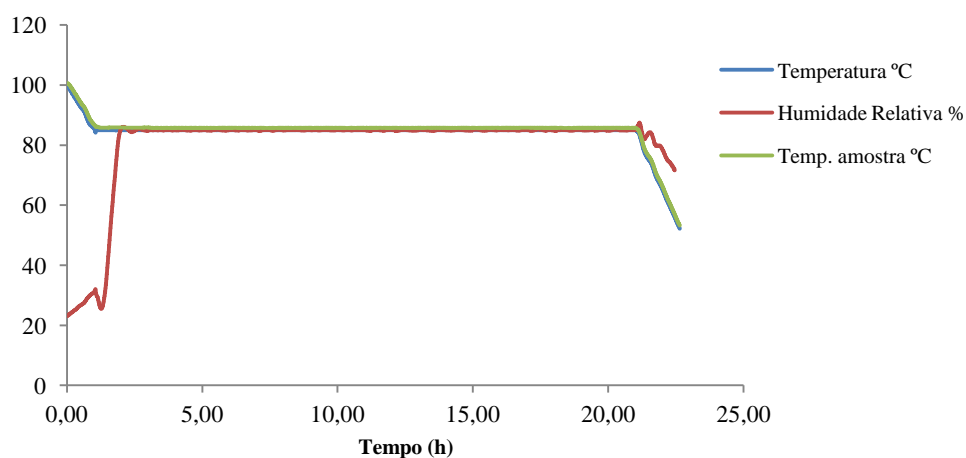


Figura 6.4 – Representação dos principais parâmetros durante o teste do *damp heat*, na segunda fase do teste.

Como resultados obtido, através das curvas I-V (Figura 6.5), retiradas ao longo do teste *damp heat* é possível verificar a perda de performance do sub-receptor.

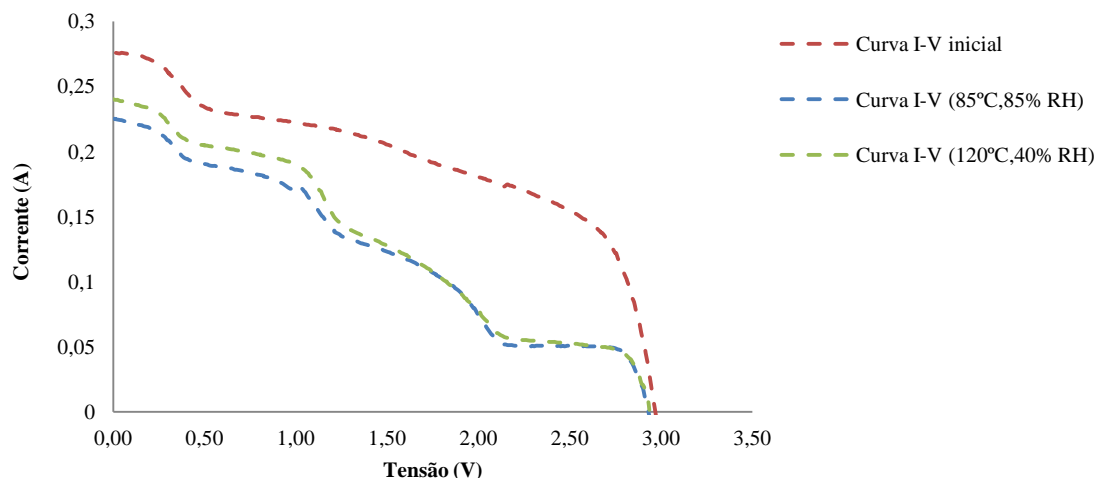


Figura 6.5 – Curvas I-V do sub-receptor ao longo do teste do *damp heat*.

Pela análise do gráfico, verifica-se claramente uma perda de performance significativa, do sub-receptor. Principalmente, após ter sido submetido a 120°C e 40% RH, nesta fase do teste a perda de performance foi de 51%, na segunda fase do teste não se evidenciou perdas. Esta perda significativa deve-se aos defeitos visuais verificados após teste, penetração de humidade e perdas de adesão. Como defeitos visuais, apresenta-se a presença de bolhas entre o encapsulante e a óptica secundária (Figura 6.6a). A fita condutora térmica adesiva colocada entre a placa de circuito impresso e a óptica secundária Figura 6.6b) apresentou uma descoloração amarela.

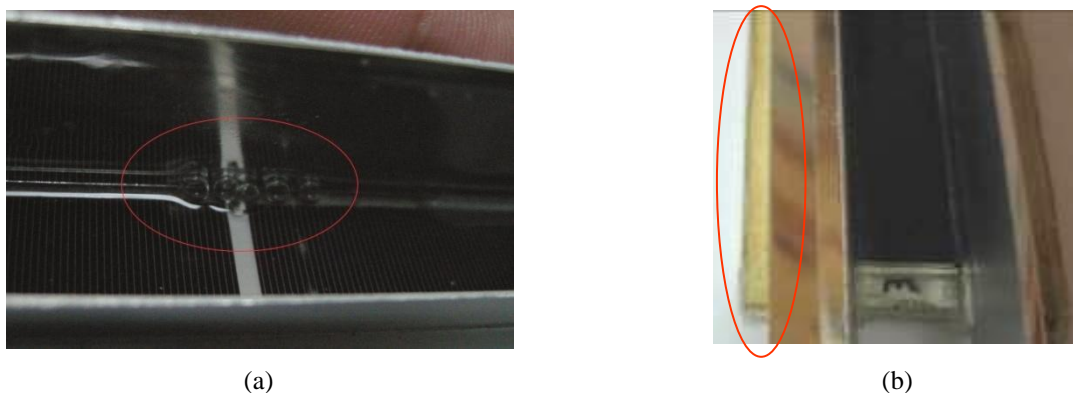


Figura 6.6 – Defeitos visuais (evidenciado a vermelho) após testes de *damp heat*: a) Aparecimento de bolhas; b) Efeitos da penetração da humidade na fita condutora térmica.

6.1.2 *Thermal Cycling*

O teste do *thermal cycling* têm como objectivo avaliar a resistência dos receptores a variações e repetidas de temperatura. De modo a verificar se o encapsulante suporta as expansões térmicas dos vários materiais do receptor assim como, fitas térmicas, células solares, ópticas secundárias e placa de circuito impresso.

De modo a se realizar o teste térmico, um receptor foi submetido a mudanças bruscas de temperatura entre os -40°C e 110°C , durante 23 horas. Foram realizados 10 ciclos onde a maior dificuldade foi otimizar o “dwell time” (tempo necessário para que toda a estrutura seja colocada à mesma temperatura). A Figura 6.7 representa as condições de temperatura e humidade a que o receptor esteve sujeito no teste do *thermal cycle*.

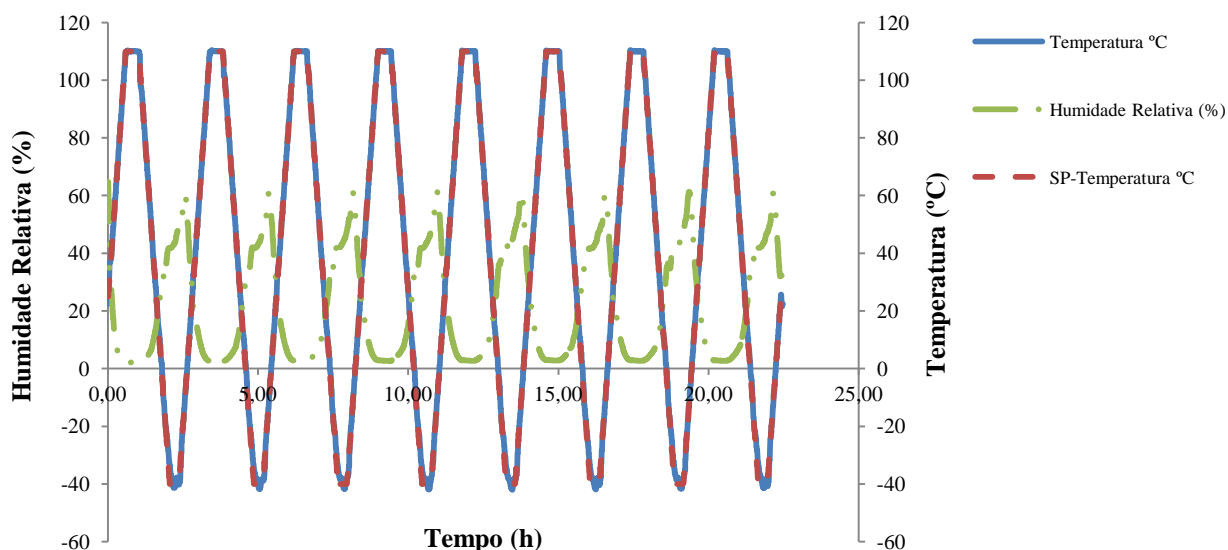


Figura 6.7 – Condições de temperatura e humidade relativa a que os sub-receptores foram sujeitados no teste do *thermal cycle* (frequência 10 ciclos).

Como resultado na Figura 6.8, estão representadas as curvas I-V. Pela análise das curvas verifica-se uma perda de performance dos sub-receptores ao longo do ciclo térmico. Na primeira fase do teste verifica-se uma perda de performance de 38% e de 0,13% na segunda fase do teste.

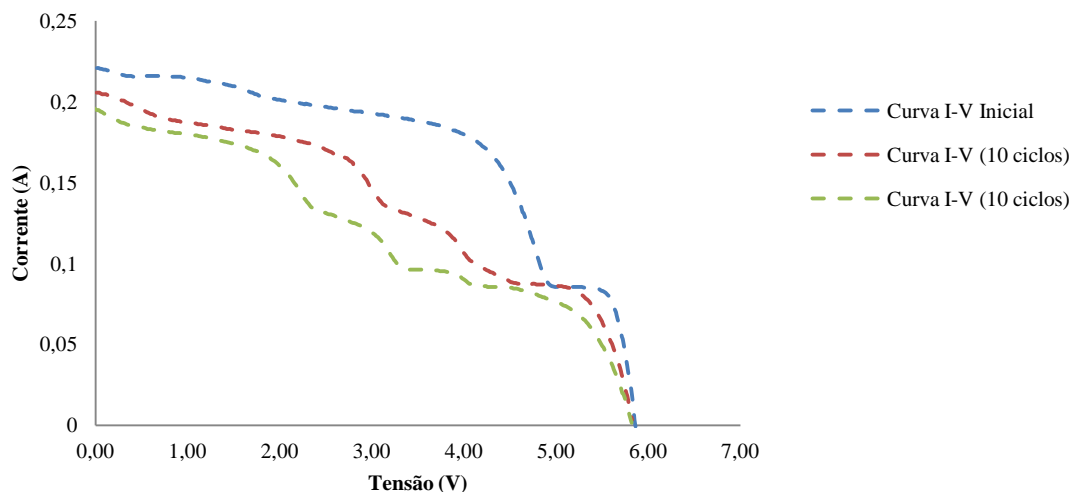


Figura 6.8 – Curvas I-V, medidas durante o teste do *thermal cycling*.

Esta perda de performance deve-se ao impacto deste teste nas células solares. Assim, para justificar esta perda de desempenho, foram capturadas fotografias de electroluminescência, a fim de verificar as células partidas, devido à expansão térmica do material (Figura 6.9).

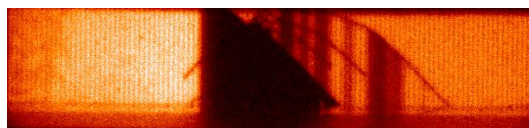


Figura 6.9 – Fotografias da célula solar capturadas pela técnica da electroluminescência. (Camera with 1024x1024 pixels, 13 um x 13 um pixel size, high sensitivity in the NIR 80% @ 750 nm, 40% @ 900 nm, 15% @1000 nm).

Relativamente a defeitos visuais surge a presença de delaminações (Figura 6.10a), entre as células solares e o encapsulante, logo após 10 ciclos térmicos. O aparecimento de amarelamento é também visível, mas somente na placa de circuito impresso, o silicone mantém-se inalterável.

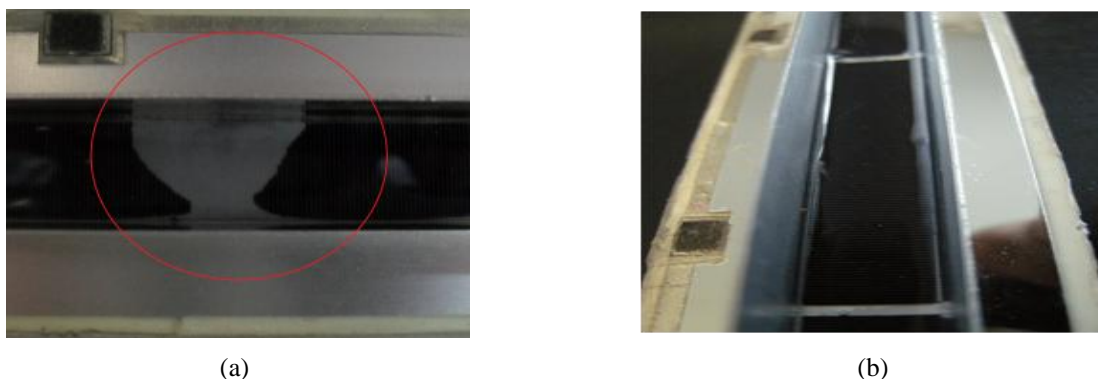


Figura 6.10 – Resultados após teste *thermal cycling*: a) Aparecimento de delaminações, evidenciado a vermelho; b) Amarelamento da placa de circuito impresso.

6.1.3 *Ultraviolet conditioning*

O teste do *ultraviolet conditioning* têm como objectivo avaliar as possíveis falhas físicas, como perdas de transmitância e falhas dieléctricas ao longo do tempo de exposição aos UV.

Para a realização desta experiência foi necessário o uso de um tripé, no qual na parte superior foi colocado o sub-receptor sujeito ao teste de exposição à radiação UV. Paralelamente a este encontram-se os sensores de UV, este é constituído por três sensores, cada um possui a finalidade de quantificar a intensidade de radiação UV-A (400–320 nm), UV-B (320–280 nm) e UV-C (280–100 nm) que chega ao sub-receptor. A lâmpada UV, com capacidade de 2000W, encontra-se na parte superior da câmara, apontada verticalmente para o sub-receptor (e sensor) a ser testado. Na Figura 6.11, pode observar-se o sistema utilizado neste teste. Este teste tornou-se mais acelerado, devido aos filtros de vidro de borossilicato existentes na câmara serem removidos, possibilitando uma o acumular da radiação UV total.

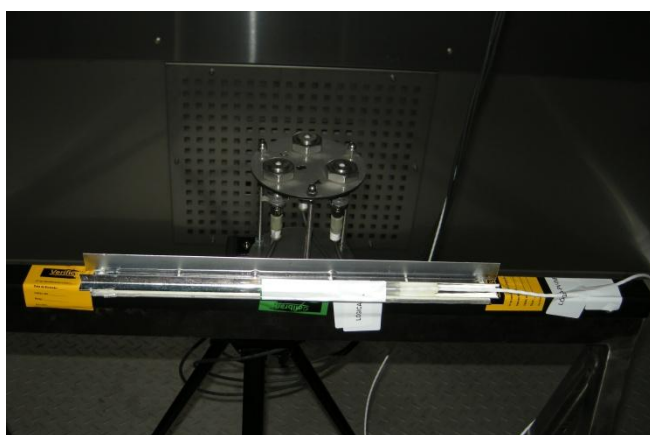


Figura 6.11 – Disposição dos componentes utilizados na realização do teste *ultraviolet conditioning*.

Em primeiro lugar submeteu-se o receptor a uma dosagem acumulada de UV de $15,1 \text{ kWh/m}^2$, durante 20 horas. Em que $14,4 \text{ kWh/m}^2$ foi de radiação UV-A e $0,7 \text{ kWh/m}^2$ de radiação UV-B. Voltou-se a submeter o sub-receptor a uma dosagem de $10,1 \text{ kWh/m}^2$, durante 13,5 horas. Esta radiação continha $9,6 \text{ kWh/m}^2$ foi de radiação UV-A e $0,5 \text{ kWh/m}^2$ de UV-B. Em ambas as etapas deste teste não incidiu radiação UV-C no sub-receptor. No final do teste experimental, o sub-receptor foi então submetido ao somatório das três radiações UV, originando uma dosagem total de $25,2 \text{ kWh/m}^2$, durante 33,5 horas. A Figura 6.12 mostra um gráfico onde se pode observar o comportamento da radiação acumulada UV-A+B+C.

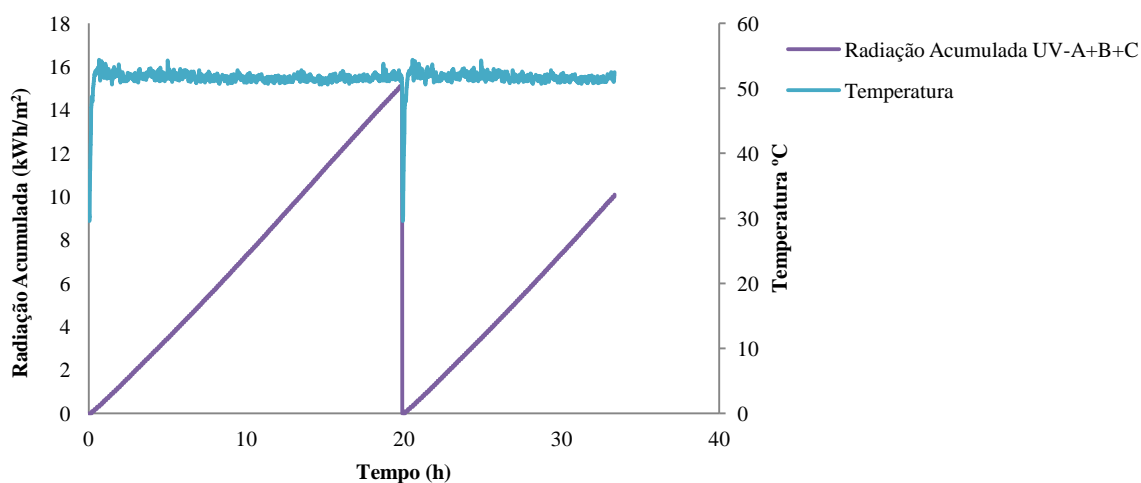
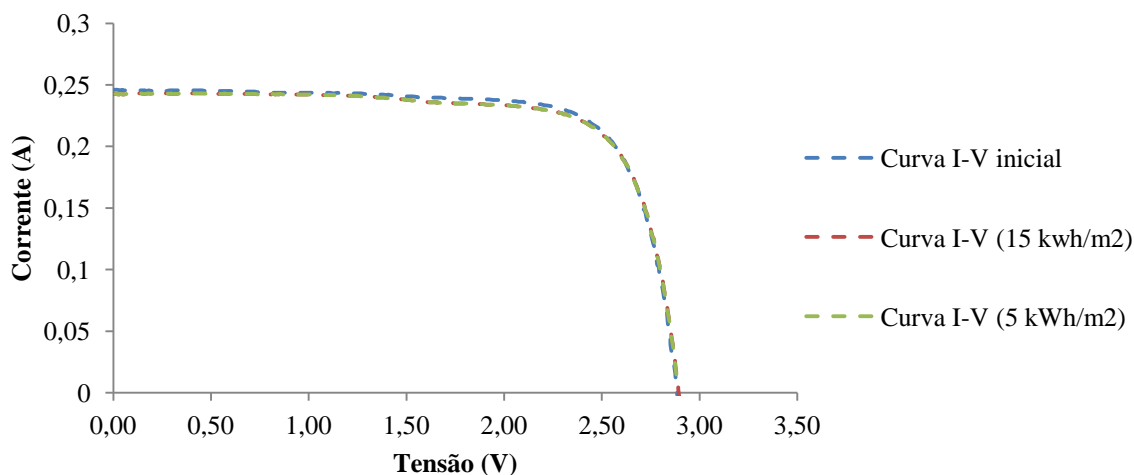


Figura 6.12 – Representação dos principais parâmetros do teste *ultraviolet conditioning*, nomeadamente a radiação acumulada que é acumulada em UV-A, UV-B e UV-C.

O sub-receptor foi retirado da câmara UV para se proceder à realização da medição da curva I-V, motivo pelo qual se verifica o decréscimo da radiação acumulada UV-A+B+C e UV-A às 20 horas.

Como resultados na Figura 6.13 encontram-se as curvas I-V, medidas no decorrer da experiência. Pela análise das curvas I-V, verifica-se uma ligeira perda de performance, de 1%, das células solares ao longo do teste de exposição à radiação UV.

Figura 6.13 – Curvas I-V ao longo do teste *ultraviolet conditioning*.

Relativamente a defeitos visuais no silicone após este teste, não se encontraram mudanças relativamente importantes. A Figura 6.14 mostra o aparecimento de amarelamento na placa de circuito impresso, enquanto que no silicone não se visualiza qualquer amarelamento.

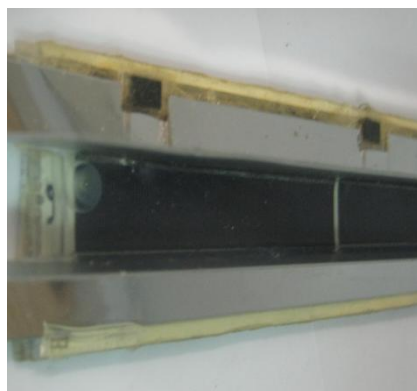


Figura 6.14 – Curvas I-V antes e após teste UV.

6.2 Pré-Certificação

A pré-certificação tem como objectivo continuar os testes do *Crash Tests*, com o fim de descobrir possíveis falhas de performance em condições mais agressivas, sempre em linha com o disposto na norma IEC 62 108. A metodologia proposta para pré certificação encontra-se na Figura 6.15.

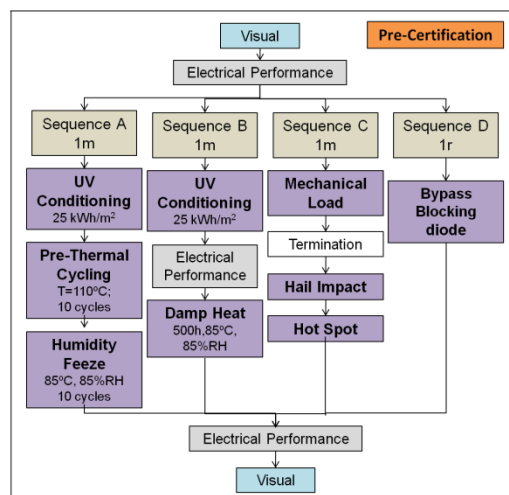


Figura 6.15 – Sequência de testes para pré-certificação, durante 1 mês [1].

Nos testes de pré-certificação estão incluídos os seguintes testes [34]:

Humidity Freeze, tem como objectivo a verificação do efeito da solidificação da água que tenta penetrar o encapsulante nas condições adversas do meio exterior e é realizado através da colocação do sistema em estudo sujeito a altas temperaturas e humidade, seguidas de temperaturas de 0°C.

Hail Impact, tem como objectivo avaliar o comportamento do módulo, nomeadamente os espelhos, quando sujeitos a condições de chuvas de granizo. De modo a criar um ambiente com as mesmas condições que uma chuva de granizo, neste teste bolas de gelo são lançadas de uma dada altura e velocidade sobre o módulo, sendo posteriormente avaliado os efeitos que o gelo provoca nos espelhos.

Hot Spot, avalia o efeito de pontos quentes devido a células partidas ou isoladas electricamente do restante módulo, além de avaliar ainda o efeito de sombra nas células.

Bypass Blocking diode avalia o desempenho do doído *bypass*.

Mechanical Load tem como objectivo determinar se o módulo, nomeadamente os espelhos, suportam chuvas de granizo, vento. Neste teste, as condições exteriores adversas a que o módulo possa ser sujeito são recriadas com cargas mecânicas colocadas sobre o módulo e, posteriormente, o efeito de degradação do módulo provocado por estas cargas é avaliado.

7 Conclusões

Esta dissertação apresenta um estudo da caracterização e otimização do processo de produção de silicões, para o encapsulamento do módulo HSUN[®], sistema CFV em desenvolvimento pela WS Energia. Este sistema é constituído por células solares de silício cristalino optimizadas para um sistema de concentração de 15X. A escolha do silicone mais apropriado para o HSUN[®], foi fortemente condicionada pelo modo de preparação do silicone, pela eficiência, durabilidade e preço dos silicões. Além disto, foi realizado um conjunto de testes acelerados e agressivos que avaliam a durabilidade dos receptores do módulo HSUN[®], nomeadamente o encapsulante, prevendo as suas eventuais falhas.

Nesta dissertação é descrito o processo de encapsulamento com silicões, são apresentados testes ópticos e mecânicos, com o fim de caracterizar silicões. São ainda descritos alguns dos testes da norma IEC 62108 e é definida uma gama de testes agressivos e acelerados, os *Crash Tests*, que são adoptados aos testes da norma.

Relativamente aos resultados experimentais obtidos conclui-se que silicone Elastosil RT[®] 601 é o mais apropriado para o encapsulamento das células solares do módulo HSUN[®], isto porque este silicone apresenta um tempo de preparação rápido quando comparado com os outros silicões. Este é o silicone que possui a maior transmitância, de 91,24%, com uma espessura de 1 mm. Esta é uma característica muito importante na caracterização de silicões. Relativamente à resistência a deformações e à sua durabilidade a curto prazo, não apresenta os melhores valores, mas também não apresenta os piores resultados. Por exemplo o Sylgard 184[®], apresenta uma excelente resistência à deformação, no entanto é o que possui maior degradação a curto prazo. O mesmo acontece com o PV 6010, este apresenta uma excelente durabilidade a curto prazo, mas apresenta menor resistência à deformação. O que também favorece o silicone Elastosil RT[®] 601 é o seu baixo valor comercial.

Com os *Crash Tests* realizados aos receptores do módulo HSUN[®], estes falharam a sequência de testes de qualificação, não sendo cumpridos os critérios de avaliação descritos na norma IEC 62108. apresentam grandes defeitos visuais, tais como delaminações, células partidas e amarelecimento das fitas térmicas. Como consequência destes resultados, conclui-se que é necessário realizar um re-design aos receptores do módulo, para que este sofra algumas melhorias, tais como: processo de encapsulamento, mudança das fitas condutoras térmicas, no processo de soldadura, devido à quebra das células.

7.1 Trabalhos Futuros

A fim de indicar qual o silicone mais adequado ao sistema HSUN[®], surge a necessidade de realizar mais de testes de caracterização aos silicões. Nomeadamente testes mecânicos, tais como: adesão, para saber qual dos silicões possui maior aderência às células solares e testes de resistência ao impacto, com o fim de determinar efeitos causados aos silicões. Esta caracterização deve ser realizada em conjunto com os testes de envelhecimento. Deverá também determinar-se a transmitância aos silicões, após exposição à luz UV a longo prazo, para avaliar a sua performance a longo prazo.

Também existe a necessidade de verificar quais os efeitos, nomeadamente na performance, do *primer* nas células solares.

Será sempre necessário realizar todos os testes inscritos na norma IEC 62108 para aprovação do desenho final e do encapsulante a utilizar no módulo HSUN[®].

8 Bibliografia

- [1] S. Coelho, B. Cardoso, L. Pina, N. Pereira, and S. Valtchev, "PRE-CERTIFICATION OF HSUN[®] MODULE ACCORDING TO IEC 62108", 26th *European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Hamburg, Germany, 2011.
- [2] B. Parida, S. Iniyar, and R. Goic, "A review of solar photovoltaic technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 1625-1636, 2011.
- [3] "PV STATUS REPORT," in *JRC Scientific and Technical Reports*, ed. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy, 2011.
- [4] http://evaluate.na-rede.net/publicacoes/D1_Quadro_Internacional_Novas%20Tecnologias_Energeticas_06.2010.pdf (consultado a 10 de Agosto de 2011).
- [5] <http://www.dgge.pt/>, Estatísticas-Energias Renováveis (consultado a 10 de Agosto de 2011).
- [6] <http://www.memoriaportuguesa.com/central-fotovoltaica-da-amareleja> (consultado a 10 de Agosto de 2011).
- [7] http://www.energiasrenovaveis.com/DetailheConceitos.asp?ID_conteudo=38&ID_area=8&ID_sub_area=26 (consultado a 11 de Agosto).
- [8] E. Proença, "A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM PORTUGAL", Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2007.
- [9] <http://www.pv.unsw.edu.au/future-students/pv-devices/buried-contact.asp> (consultado a 7 de Fevereiro de 2011).
- [10] S.Tânia, "Energia fotovoltaica : implementação de sistemas e componentes", Dissertação de para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia dos Materiais, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2008.
- [11] A. M. D.H. Neuhaus, "Review Article: Industrial Silicon Wafer Solar Cells", Hindawi Publishing Corporation *Advances in OptoElectronics*, 2007.
- [12] S. Kurtz, "Opportunities and Challenges for Development of a Mature Concentrating Photovoltaic Power Industry" NREL, Technical Report, NREL/TP-520-43208, <http://www.nrel.gov/docs/fy11osti/43208.pdf> (consultado a 11 de Agosto), 2011.
- [13] T. Mateus, "Optimização do Processo de Fabrico de Painéis Fotovoltaicos de Silício Amorfo", Dissertação de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2010.
- [14] C. Sebastião, "Selection of Paste and Glue Elements for CPV Modules", Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, 2010.
- [15] R. M. Swanson, "The promise of concentrators," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 8, pp. 93-111, 2000.
- [16] L. Mendes, "Methods for analysis, optimization and design of optics for photovoltaic concentration", Dissertação de mestrado em Engenharia Física e Tecnológica, Instituto Superior Técnico, 2010.
- [17] <http://www.soitec.com/en/technologies/concentrix/> (consultado a 13 de Setembro de 2011).
- [18] <http://guntherportfolio.com/2009/07/concentrix-solar-installs-ucsd-test-system/> (consultado a 13 de Setembro).
- [19] <http://www.treehugger.com/files/2010/04/amonix-concentrating-photovoltaic-solar-power-kleiner-perkins-investment.php> (consultado a 13 de Setembro).
- [20] <http://solarsystems.com.au/> (consultado a 13 de Setembro).

- [21] <http://picasaweb.google.com/lh/photo/wy1sLN2UIF9GQnmZ82WayA?feat=embedwebsite> (consultado a 13 de Setembro).
- [22] B. Anstey, J. Callear, H. Scanlon, C. Weatherby, "Concentrating Photovoltaic Systems", Whitfield Solar Ltd, <http://www.cir-strategy.com/uploads/Bentley.pdf> (consultado a 15 de Fevereiro).
- [23] http://www.solarsystems.com.au/the_technology.html (consultado a 21 de Janeiro de 2011).
- [24] J. Lopes, On-field "Demonstration Results of Medium Concentration System HSUN[®]", International Conference on Concentrating Photovoltaic systems, CPV 7, Las Vegas, USA, 2011.
- [25] M. O'Neill, A. J. McDanal, D. Spears, and C. a. G. Stevenson, David, "Low-Cost 20X Silicon-Cell-Based Linear Fresnel Lens Concentrator Panel", CPV 7, Las Vegas, 2011.
- [26] F. Reis, V. Corregidor, M. C. Brito, R. Rodrigues, J. Wemans and G. Sorasio, Power Generation and Energy Yield Using Doublesun[®] Photovoltaic Solar Concentration, 24th *European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2009.
- [27] E. Muñoz, P. G. Vidal, G. Nofuentes, L. Hontoria, P. Pérez-Higueras, J. Terrados, G. Almonacid, and J. Aguilera, "CPV standardization: An overview", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 518-523, 2010.
- [28] <http://www.electroiq.com/articles/pvw/2011/03/the-bottom-line-impact-of-pv-module-reliability.html> (consultado a 21 de Agosto de 2011).
- [29] A. F. Zielenk and D. P. Dumbleton, "Photovoltaic Module Weather Durability & Reliability" ed. ATLAS, Material Testing Solutions.
- [30] G. Tamizhmani, "Testing the reliability and safety of photovoltaic modules: failure rates and temperature effects" TÜV Rheinland PTL & Arizona State University, Tempe, Arizona, USA, http://www.tuv.com/media/usa/aboutus_1/pressreleases/PTL_Magazine_Article.pdf (consultado 18 de Agosto de 2011).
- [31] http://webstore.iec.ch/webstore/webstore.nsf/Artnum_PK/34077 (consultado a 26 de Fevereiro).
- [32] http://webstore.iec.ch/webstore/webstore.nsf/Artnum_PK/38706, (consultado a 26 de Fevereiro de 2011).
- [33] <http://standards.ieee.org/findstds/standard/1513-2001.html> (consultado a 26 de Fevereiro de 2011).
- [34] "Concentrator Photovoltaic (CPV) Modules and Assemblies - Design Qualification and Type Approval" ed: 2^o, 1bDraft, IEC 62108, 2010.
- [35] L. C. Olsen, S. Kundu, M. Englehard, and Ieee, "Effects on moisture on CdTe cell I-V characteristics" *Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Vols 1 and 2*, pp. 2138-2140, 2006.
- [36] "Encapsulation of PV modules using ethylene vinyl acetate copolymer as a pottant: A critical review," *Fuel and Energy Abstracts*, vol. 38, p. 40, 1997.
- [37] K. Agroui, A. Belghachi, G. Collins, and J. Farenc, "Quality control of EVA encapsulant in photovoltaic module process and outdoor exposure" *Desalination*, vol. 209, pp. 1-9, 2007.
- [38] S. A. Sala, M. Campaniello, A. Bailini, and IEEE, "Experimental study of polymers as encapsulating materials for photovoltaic modules", *2009 European Microelectronics and Packaging Conference (Empc 2009), Vols 1 and 2*, pp. 180-186, 2009.
- [39] Wacker Silicones, Elastosil, Bonding, Sealing, potting/Encapsulation and Coating with RTV Silicone Rubber Compounds, http://www.wacker.com/cms/media/publications/downloads/6019_EN.pdf (consultado a 12 de Março de 2011).
- [40] B. Riegler, R. Thomaier, and S. Bruner, "Phosphors and Silicone Dispersions" NuSil Technology, Carpinteria, CA, 2005.
- [41] M. Velderrain, "Choosing a Silicone Encapsulant for Photovoltaic Applications", NuSil Technology, CPV 7, International Conference on Concentrating Photovoltaic systems, Las Vegas, USA., 2011.

- [42] A. João, "Sistemas Elastoméricos de rede aleatória: Caracterização Molecular, Estrutural e Dinâmica," Dissertação de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2010.
- [43] A. Norris, N. Powell, B. Ketola, J. N. Cotsell, and K. R. McIntosh, "Advanced Silicone Photovoltaic Encapsulants", 2010.
- [44] M. Lurdes and S. Simões Gonçalves, "Métodos instrumentais para análise de soluções, Análise Quantitativa" 4º, 2001.
- [45] D. Skoog and J. Leary, "Principles of Instrumental Analysis" ed: 4º, 1992.
- [46] http://www.ehow.com/list_6466475_advantages-disadvantages-uv_vis-spectrometer.html (consultado a 5 de Agosto de 2011)
- [47] N. E. Powell, B. K. Hwang, A. W. Norris, B. M. Ketola, G. Beaucarne, K. R. McIntosh, and Ieee, "IMPROVED SPECTRAL RESPONSE OF SILICONE ENCAPSULATED PHOTOVOLTAIC MODULES", in *35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Honolulu, HI, 2010.
- [48] L. Gomes, "Células Solares Semi-transparentes de Silício Amorfo Micro/Nanocristalino", Dissertação de mestrado em Engenharia dos Materiais, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2009.
- [49] M. D. Kempe and Ieee, "ACCELERATED UV TEST METHODS AND SELECTION CRITERIA FOR ENCAPSULANTS OF PHOTOVOLTAIC MODULES", in *33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, San Diego, CA, 2008, pp. 1701-1706.
- [50] A. Norris, "Silicones: ideal material solutions for the photovoltaic industry" http://legacy.pv-tech.org/images/uploads/articles_online_pdf/DowCorning.pdf (consultado a 20 de Agosto de 2011).
- [51] http://www.teknik.uu.se/ftf/education/ftf2/Optics_FresnelsEqns.pdf (consultado a 24 de Agosto de 2011).
- [52] W. F. Smith, *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*. McGRAW-HILL: 3º, 1998.
- [53] http://www.solarnovus.com/index.php?option=com_content&view=article&id=1461:silicone-encapsulants-advantages-for-cpv-applications&catid=38:application-tech-features&Itemid=246&limitstart=1 (consultado a 24 de Agosto de 2011).
- [54] F. Schneider, T. Fellner, J. Wilde, and U. Wallrabe, "Mechanical properties of silicones for MEMS", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 18, Jun 2008.
- [55] B. Riegler, R. Thomaier, H. Sarria, and K. Rhodes, "Adhering to Difficult Substrates with Silicone Adhesives", Nulil Silicone Technology, 2004.
- [56] <http://www.instron.com/wa/solutions/ASTM-D429-Rubber-Property-Adhesion-Rigid-Substrates.aspx> (consultado a 4 de Março de 2011).
- [57] <http://www.instron.com/wa/solutions/ASTM-D413-Rubber-Property-Adhesion-Flexible-Substrate.aspx> (consultado a 4 de Março de 2011).
- [58] http://www.instron.com/wa/solutions/peel_test_adhesives_tapes_astmd1876.aspx (consultado a 4 de Março de 2011).
- [59] C. Ramos, "Characterization of Kvazar conventional solar cells," Relatório interno da WS Energia, Maio 2011.
- [60] Espectro AM 1.5 – Norma ASTM G 173 <http://redc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/> (consultado a 15 de Junho)

Anexos

Anexo I - Artigo e Poster Apresentados na 26th *European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition* 2011

Anexo II - Datasheets dos Silicones

Anexo III - Relatórios “Testes Preliminares”

Anexo IV - Relatório “Inspeção Visual – Receptores”

Anexo V - Relatório “Encapsulamentos: Vácuo – Adesão”

Anexo VI - Descrição Experimental Detalhada para a Preparação de Silicones

Anexo VII - Resultados Obtidos pela Técnica da Espectroscopia, a várias Espessuras dos Diferentes Silicones Estudados

Anexo VIII - Estudo da Transmitância aos Diversos Silicones Estudados ao Longo do Teste de Exposição UV

Anexo I

Anexo II

Anexo III

Anexo IV

Anexo V

Anexo VI

Anexo VII

Anexo VIII