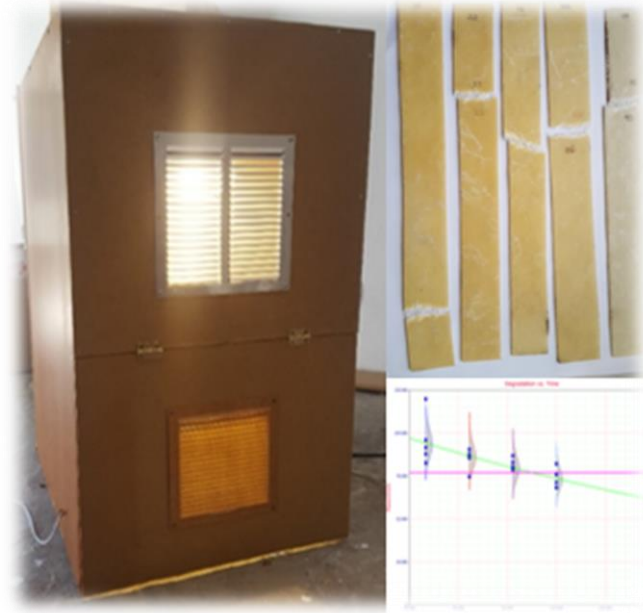




ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Mecânica



Modelos de Fiabilidade baseados em Ensaios Acelerados de Vida

Sara Borges Rodrigues
(Licenciada em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientador:

Doutor José Augusto da Silva Sobral

Júri:

Presidente: Doutor João Manuel Ferreira Calado

Vogais:

Doutora Paula Alexandra da Veiga Gonçalves

Doutor José Augusto da Silva Sobral

Março de 2018



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Mecânica

Modelos de Fiabilidade baseados em Ensaios Acelerados de Vida

Sara Borges Rodrigues
(Licenciada em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientador (es):

Doutor José Augusto da Silva Sobral

Júri:

Presidente: Doutor João Manuel Ferreira Calado

Vogais:

Doutora Paula Alexandra da Veiga Gonçalves

Doutor José Augusto da Silva Sobral

Março de 2018

Resumo

Com a crescente competitividade empresarial as organizações que pretendem desenvolver novos produtos desejam colocar os mesmos o mais cedo possível no mercado, não perdendo a oportunidade temporal ou antecipando-se a idênticas iniciativas de outras organizações concorrentes. Sendo cada vez mais frequente a exigência de informação fiabilística relativa aos produtos por parte do potencial público-alvo, e sendo muitas vezes obrigatório apresentar esses indicadores, são utilizados os testes acelerados de vida para obter dados de tempos até à falha num espaço de tempo mais reduzido.

Com o presente trabalho pretende-se descrever os principais métodos normalmente aplicáveis aos testes acelerados de vida (*ALT-Accelerated Life Test*), desenvolvendo os modelos matemáticos mais comuns como o modelo de *Arrhenius*, modelo de *Eyring*, o modelo da Lei da Potência Inversa e o modelo Térmico Não-Térmico.

Para implementar os conceitos estudados, foram submetidas amostras de resina *epoxy* reforçadas com fibra de vidro à radiação UV de forma acelerada. Foi registada a degradação das suas propriedades mecânicas ao longo do tempo de exposição através de ensaios de tração uniaxial. Com esses resultados implementou-se a metodologia relacionada com a degradação acelerada destrutiva, através do *software* ALTA 11 e foram determinados os parâmetros fiabilísticos relativos às condições normais de operação.

Palavras-chave: Fiabilidade; Ensaios acelerados de vida; Radiação UV; Fibra de vidro-*Epoxy*; Compósitos; Degradação acelerada

Abstract

With increasing business competitiveness, organizations wishing to develop new products wish to place them as soon as possible in the market, not losing the time opportunity or anticipating the same initiatives of other competing organizations. As the demand for reliable product information by the potential target audience is increasingly frequent, and it is often mandatory to present these indicators, accelerated life tests are used to obtain data from time to failure over a longer period of reduced time.

The present work intends to describe the main methods normally applied to accelerated life tests, developing the most common mathematical models such as the Arrhenius model, Eyring model, the Inverse Power Law model and the Temperature-Nonthermal model.

In order to implement the concepts studied, glass fiber reinforced epoxy resin samples were subjected to accelerated UV radiation. A degradation of its mechanical properties was recorded over the exposure time through uniaxial tensile tests. With these results the methodology related to the destructive accelerated degradation was implemented through the software ALTA 11 and the safety vouchers under normal operating conditions.

Keywords: Reliability; Accelerated Life Test; UV Radiation; Fiberglass-Epoxy; Accelerated degradation

Agradecimentos

Tendo em conta a dimensão, complexidade e todo o investimento pessoal para a elaboração do presente Trabalho Final de Mestrado (TFM), o mesmo não teria sido possível sem a ajuda de todos, que de uma forma ou de outra, me incentivaram, motivaram e acompanharam durante toda a sua elaboração.

Ao Professor José Sobral, orientador científico desta dissertação, o meu sincero agradecimento por toda a ajuda, incentivo, apoio e disponibilidade demonstrada ao longo de todo o trabalho.

Ao Professor Afonso Leite, não sendo meu orientador, por toda a ajuda e disponibilidade demonstrada para a realização dos ensaios experimentais.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica em geral pela disponibilidade para a utilização dos materiais e equipamentos necessários para a realização do TFM.

Aos meus Colegas e Amigos pela ajuda, amizade e companheirismo ao longo de toda a licenciatura e mestrado.

Ao meu Patrão, Chefe e Colegas pela motivação, compreensão, disponibilidade e incentivo para o término deste projeto.

Aos meus Pais por todo o amor, amizade, apoio, incentivo e motivação ao longo de toda a minha vida.

Obrigada.

Índice

Resumo	i
Abstract.....	iii
Agradecimentos	v
Índice	vii
Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tabelas	xvii
Lista de Siglas, Acrónimos e Símbolos	xix
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento Teórico	1
1.2. Objetivo	2
1.3. Estrutura da Dissertação	2
2. Fiabilidade	5
2.1. Conceito de Fiabilidade	5
2.2. Conceito de Falha	6
2.3. Conceito de Avaria	7
2.4. Medição da Fiabilidade	7
2.4.1. Função Densidade de Probabilidade de Falha	8
2.4.2. Taxa de Avarias	9
2.4.3. Função Fiabilidade Geral	10
2.4.4. Tempo Médio de Falha	11
2.5. Curva da Banheira	11
2.6. Distribuições de Probabilidades	13
2.6.1. Distribuição de <i>Weibull</i>	13

2.6.2.	Distribuição Normal.....	15
2.6.3.	Distribuição Exponencial.....	16
2.6.4.	Distribuição Lognormal	17
3.	Ensaio Acelerados de Vida	21
3.1.	Ensaio Acelerados de Vida Qualitativos	22
3.2.	Ensaio Acelerados de Vida Quantitativos	23
3.3.	Métodos de Aceleração	24
3.3.1.	Aumento da Taxa de Operação.....	24
3.3.2.	Aumento da Taxa de Desgaste.....	25
3.4.	Modelos Matemáticos	27
3.4.1.	Modelo de <i>Arrhenius</i>	30
3.4.2.	Modelo de <i>Eyring</i>	35
3.4.3.	Modelo da Lei da Potência Inversa.....	40
3.4.4.	Modelo Térmico Não-Térmico (TNT).....	43
3.5.	Metodologia dos Ensaio Acelerados de Vida.....	47
3.6.	Dados e Tipos de Dados	50
3.6.1.	Dados Completos	50
3.6.2.	Dados Censurados.....	50
4.	Materiais Compósitos e a Radiação Ultravioleta.....	53
4.1.	Materiais Compósitos.....	53
4.1.1.	Reforço (Fibras)	56
4.1.2.	Matriz.....	57
4.1.3.	Processo de Fabrico	57
4.1.4.	Laminado	60
4.2.	Radiação ultravioleta	63
4.2.1.	Índice UV.....	65

4.3.	Efeitos da Radiação UV sobre os Polímeros	67
5.	Caso de Estudo.....	73
5.1.	Objetivo	73
5.2.	Câmara.....	74
5.2.1.	Lâmpadas	75
5.2.2.	Sensores	78
5.2.3.	Modelo da Câmara Final.....	82
5.3.	Amostras.....	85
5.3.1.	Materiais	87
5.3.2.	Produção das Amostras	90
5.4.	Ensaio de radiação UV	93
5.4.1.	Parâmetros de Funcionamento e Especificações	93
5.4.2.	Procedimento do Ensaio de Radiação Ultravioleta.....	95
6.	Tratamento de Resultados e Análise.....	99
6.1.	Ensaio de Tração.....	99
6.1.1.	Equipamento de Tração	102
6.2.	Tratamento dos resultados dos ensaios de tração	104
6.2.1.	Teoria inerente aos ensaios de tração.....	104
6.2.2.	Ensaio 1 - 0h de Exposição	105
6.2.3.	Ensaio 2 - 32h de Exposição	109
6.2.4.	Ensaio 3 - 64h de Exposição	110
6.2.5.	Ensaio 4 - 96h de Exposição	111
6.2.6.	Ensaio 5 - 128h de Exposição	112
6.2.7.	Resultados Finais	114
6.3.	Índice UV Real	118
6.4.	Ensaio Acelerados de Vida no ALTA	121

6.4.1. Metodologia	121
6.4.2. Primeira Abordagem (Modelo da Lei da Potência Inversa)	122
6.4.3. Segunda Abordagem (Modelo Térmico Não-Térmico).....	135
6.4.4. Comparação de Resultados	141
7. Conclusões e Trabalhos Futuros	143
Referências	147
Anexos	151
Anexo A.....	153
Anexo B.....	159
Anexo C.....	163

Índice de Figuras

Figura 1 - Representação da função Fiabilidade e probabilidade de falha (adaptado de (Assis, 1997)).	8
Figura 2 - Função densidade de probabilidade de falha e função probabilidade acumulada de falhas.(Assis, 1997)	9
Figura 3 - Curvas típicas representativas da vida de um componente sendo T_n a vida nominal e T_m a vida média. (Assis, 1997)	11
Figura 4 - Representação da Curva da Banheira. Adaptado (Dhillon, 2006)	12
Figura 5 - Diferentes métodos de aceleração de ensaios acelerados de vida.	24
Figura 6 - Solicitação independente do tempo (adaptado de (Reliasoft Corporation, 2015)).	26
Figura 7 - Exemplos de solicitações em função do tempo (adaptado de (Reliasoft Corporation, 2015)).	27
Figura 8 - Percurso entre a $f(x)$ acelerada para a $f(x)$ em uso normal (adaptado de (Reliasoft Corporation, 2015))	48
Figura 9 - Percurso entre a $f(x)$ acelerada para a $f(x)$ em uso normal, com dois pontos (adaptado de (Reliasoft Corporation, 2015))	49
Figura 10 - Classificação do material compósito quanto ao tipo de matriz (adaptado (Adams and Advani, 2001)).	55
Figura 11 - Classificação do material compósito quanto ao tipo de reforço (adaptado de (Adams and Advani, 2001)).	55
Figura 12 - Curva tensão-extensão materiais compósitos, matriz e fibra.	56
Figura 13 - Fluxograma do procedimento de modelação manual (adaptado de (Gay and Hoa, 2003)).	58
Figura 14 - Modelação manual ou por contacto (Wet Hand Lay-up) (adaptado de (Gay and Hoa, 2003)).	59

Figura 15 - Modelação por compressão. (adaptado de (Gay and Hoa, 2003)). ...	60
Figura 16 - Empilhamento de camadas de um laminado (J.N.Reddy, 2004).....	60
Figura 17 - Classificação do IUV.	66
Figura 18 - Exemplos de câmaras de simulação de UV.....	71
Figura 19 - Lâmpada Ultra-Vitalux.....	76
Figura 20 - Dimensões nominais da Lâmpada Ultra-Vitalux.	76
Figura 21 - Fluxo de radiação espectral em função do comprimento de onda. ...	77
Figura 22 - Indicações do fornecedor para a posição das lâmpadas relativamente ao material em exposição.	77
Figura 23 - Sensor ML8511.	78
Figura 24 - Diagrama de Blocos ML8511.	79
Figura 25 - Gráfico da tensão de saída em função da Intensidade UV.....	80
Figura 26 - Resposta do sensor em função do comprimento de onda.....	80
Figura 27 - Sensor Si7021.....	81
Figura 28 - Precisão da humidade relativa.....	81
Figura 29 - Precisão da temperatura do sensor Si7021.....	82
Figura 30 - Esboço da câmara de ensaio.....	82
Figura 31 - Câmara de ensaio de radiação UV. (a) Câmara de ensaio em repouso;(b) Câmara de ensaio em funcionamento.	83
Figura 32 - Extrator.....	84
Figura 33 - Montagem dos casquilhos e sistema elétrico na câmara de ensaio. ..	84
Figura 34 - Montagem das lâmpadas nos respetivos casquilhos.....	84
Figura 35 - Câmara de ensaios de radiação ultravioleta.	85
Figura 36 - Amostra de ensaio com a indicação do tab's (adaptado de (ASTM D 3039)).	87
Figura 37 - Manta de fibra de vidro.	88
Figura 38 - Resina e catalisado.	89

Figura 39 - Feltro absorvente.	90
Figura 40 - Peel-Ply.	90
Figura 41 - Desmoldante.	90
Figura 42 - Camada de desmoldante e feltro absorvente.	91
Figura 43 - Camada de peel-ply.	91
Figura 44 - Camada de manta de fibra de vidro.	91
Figura 45 - Processo de fabrico finalizado.	91
Figura 46 - Dimensões das amostras para orientação das fibras aleatórias (Adaptado ASTM D3039).	92
Figura 47 - Amostra de ensaio.	92
Figura 48 - Câmara em funcionamento.	95
Figura 49 - Esquema de colocação das amostras para ensaio.	95
Figura 50 - Sistema Arduino e Sensores.	97
Figura 51 - Output das leituras do sensor UV.	97
Figura 52 - Aquisição de informação através do sensor UV.	98
Figura 53 - Representação dos possíveis modos de falha (ASTM D3039).	101
Figura 54 - Equipamento de ensaio de tração Shimadzu.	102
Figura 55 - Interface do software Trapezium 2.	103
Figura 56 - Ensaio de tração.	103
Figura 57 - Gráfico tensão-extensão da amostra P09.	106
Figura 58 - Gráfico tensão-extensão P10.	107
Figura 59 - Gráfico tensão-extensão P11.	107
Figura 60 - Gráfico tensão-extensão P12.	107
Figura 61 - Gráfico tensão-extensão P13.	108
Figura 62 - Amostras após ensaio tração não expostas à radiação UV.	108
Figura 63 - Amostras após ensaio de tração (32h de exposição).	109
Figura 64 - Amostras após ensaio de tração (64h de exposição).	111

Figura 65 - Amostras após ensaio de tração (96h de exposição).	112
Figura 66 - Amostras após ensaio de tração (128h de exposição).	113
Figura 67 - Alteração da tensão última das amostras em função do tempo de exposição.	115
Figura 68 - Resistência do material a cargas de tração.	116
Figura 69 - Alteração do Módulo de Elasticidade das amostras em função do tempo de exposição.	117
Figura 70 - Variação do Módulo de Elasticidade ao longo do tempo de exposição.	117
Figura 71 - Comparação entre amostras.	118
Figura 72 - Interface do simulador online do IUUV.	119
Figura 73 - Variação do índice UV na cidade de Lisboa durante o ano de 2016.	120
Figura 74 - Seleção do tipo de ensaio de degradação.	123
Figura 75 - Definição das variáveis de solicitação.	124
Figura 76 - Inserção dos dados no software.	125
Figura 77 - Assistente de distribuição estatística. (a) Painel principal; (b) Análise detalhada.	127
Figura 78 - Assistente do modelo de degradação. (a) Painel principal; (b) Análise detalhada.	128
Figura 79 - Seleção do modelo de extrapolação.	129
Figura 80 - Parâmetros obtidos no ALTA.	129
Figura 81 - Tempo no qual o valor de Fiabilidade é igual a 90%.	130
Figura 82 - B10%.	130
Figura 83 - Fiabilidade condicionada para um tempo inicial de 60h e um tempo de missão de 120h.	131
Figura 84 - Fiabilidade para um valor de degradação crítica de 5 MPa.	132
Figura 85 - Fiabilidade para um valor de degradação crítica de 20 MPa.	132

Figura 86 - Fiabilidade para um valor de degradação crítica de 40 MPa.	133
Figura 87 - Fiabilidade para um valor de degradação crítica de 65 MPa.	133
Figura 88 - Fiabilidade para um valor de degradação crítica de 80 MPa.	133
Figura 89 - Degradação vs. tempo para um valor crítico de degradação igual a 80 MPa.	134
Figura 90 - Função densidade de probabilidade de falha para 80MPa.	134
Figura 91 - Seleção das variáveis de solicitação.	135
Figura 92 - Seleção da variável de solicitação térmica e não térmica.	136
Figura 93 - Parâmetros obtidos no ALTA.	136
Figura 94 - Tempo no qual o valor de Fiabilidade é igual a 90%.	137
Figura 95 - B10%.	137
Figura 96 - Fiabilidade condicionada para um tempo inicial de 60h e um tempo de missão de 120h.	138
Figura 97 - Fiabilidade para um valor de degradação crítica de 5 MPa.	139
Figura 98 - Fiabilidade para um valor de degradação crítica de 20 MPa.	139
Figura 99 - Fiabilidade para um valor de degradação crítica de 40 MPa.	140
Figura 100 - Fiabilidade para um valor de degradação crítica de 65 MPa.	140
Figura 101 - Fiabilidade para um valor de degradação crítica de 80 MPa.	140
Figura 102 - Degradação vs. tempo para um valor crítico de degradação igual a 80 MPa.	141
Figura 103 - Função densidade de probabilidade de falha para 80MPa.	141

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Principais diferenças entre os testes acelerados de vida qualitativos e quantitativos (adaptado de (Müller and Hinz, 2017)).	23
Tabela 2 - Características gerais da Lâmpada Ultra Vitalux 300W 230V E27. ..	76
Tabela 3 - Condições de operação recomendadas.	79
Tabela 4 - Dimensões das amostras recomendadas para o ensaio de tração (adaptado de (ASTM D 3039)).	86
Tabela 5 - Dimensões dos tab's recomendadas para o ensaio de tração (adaptado de (ASTM D 3039)).	86
Tabela 6 - Propriedades da manta de fibra de vidro.	87
Tabela 7 - Propriedade da resina e do endurecedor	89
Tabela 8 - Propriedades mecânicas da resina pura.	89
Tabela 9 - Condições dos ensaios de tração.	94
Tabela 10 - Tempo de exposição para casa amostra.	96
Tabela 11 - Nomenclatura dos diferentes modos de falha (adaptado (ASTM D3039)).	102
Tabela 12 - Propriedades mecânicas das amostras não expostas à radiação solar.	106
Tabela 13 - Propriedades mecânicas das amostras expostas à radiação solar durante 32h.	109
Tabela 14 - Propriedades mecânicas das amostras expostas à radiação solar durante 64h.	110
Tabela 15 - Propriedades mecânicas das amostras expostas à radiação solar durante 96h.	111
Tabela 16 - Propriedades mecânicas das amostras expostas à radiação solar durante 128h.	113

Tabela 17 - Resultados da tensão última para os diferentes tempos de exposição.	114
Tabela 18 - Resultados do módulo de elasticidade para os diferentes tempos de exposição.....	116
Tabela 19 - Condições de simulação.....	119
Tabela 20 - Tabela Resumo dos valores médios do IUUV.....	120
Tabela 21 - Dados a inserir no software ALTA.....	125
Tabela 22 - Tempos correspondentes para cada valor de probabilidade de fiabilidade analisado em horas para a primeira abordagem.	131
Tabela 23 - Tempos correspondentes para cada valor de probabilidade de fiabilidade analisado em horas para a segunda abordagem.	138
Tabela 24 - Comparação entre as duas abordagens para uma degradação crítica de 80 MPa.	142

Lista de Siglas, Acrónimos e Símbolos

Lista de Siglas e Acrónimos

ALT	<i>Accelerated Life Test</i>
AGREE	<i>Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment</i>
CMC	Compósito de Matriz Cerâmica
CMM	Compósito de Matriz Metálica
CMO	Compósito de Matriz Orgânica
CMP	Compósito de Matriz Polimérica
CSM	<i>Chopped Strad Mat</i>
DOD	<i>U.S. Department of Defence</i>
EAS	<i>Erythemat Action Spectrum</i>
EST	<i>Environmental Stress Testing</i>
EUV	<i>Extreme Ultraviolet</i>
FUV	<i>Far Ultraviolet</i>
GOF	<i>Kolmogorov-Smirnov</i>
HALT	<i>Highly Accelerated Life Test</i>
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
IUV	Índice Ultravioleta
LKV	<i>Likelihood Value</i>
MLE	<i>Maximum Likelihood Estimation</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failure</i>
MTTF	<i>Mean Time to Failure</i>
MUV	<i>Middle Ultraviolet</i>
NUV	<i>Near Ultraviolet</i>
PLOT	<i>Correlation Coefficient</i>
QALT	<i>Quantitative Accelerated Life Tests</i>

QCP	<i>Quick Calculation Pad</i>
RTM	<i>Reaction Transfer Molding</i>
STRIFE	<i>Stress-Life</i>
TFM	Trabalho Final de Mestrado
TNT	Térmico Não-Térmico
UV	<i>Ultraviolet</i>
USAF	<i>United States Air Force</i>
UVA	<i>Ultraviolet A</i>
UVB	<i>Ultraviolet B</i>
UVC	<i>Ultraviolet C</i>
VUV	<i>Vacuum Ultraviolet</i>

Lista de Símbolos

a	Parâmetro do modelo da distribuição de degradação
b	Parâmetro do modelo da distribuição de degradação
A_i	Área da secção transversal média inicial
$A_{Arrhenius}$	Constante não térmica de <i>Arrhenius</i>
A_{Eyring}	Parâmetro do modelo de <i>Eyring</i>
A_F	Fator de aceleração
$B_{Arrhenius}$	Parâmetro do modelo de <i>Arrhenius</i>
B_{Eyring}	Parâmetro do modelo de <i>Eyring</i>
B_{TNT}	Parâmetro do modelo da Térmico Não-Térmico
$C_{Arrhenius}$	Parâmetro do modelo de <i>Arrhenius</i>
C_{TNT}	Parâmetro do modelo da Térmico Não-Térmico
d	Diâmetro
E_A	Energia de ativação
E_f	Módulo de elasticidade da fibra
E_m	Módulo de elasticidade da matriz
E_l	Módulo de elasticidade longitudinal
E_t	Módulo de elasticidade transversal

E_λ	Espectro de ação eritemática
$f(t)$	Função densidade de probabilidade de falha
F_i	Força de tração em cada ponto
$F(t)$	Função probabilidade acumulada de falha
F^{tu}	Força de tração última
G_{lt}	Módulo de corte
G_m	Módulo de corte da matriz
G_f	Módulo de corte da fibra
K_{LPT}	Parâmetro do modelo da Lei da Potência Inversa
k_B	Constante de <i>Boltzman's</i>
l	Comprimento
L	Medida de vida quantificável (vida média, vida característica, <i>B(x) life</i> ou outra)
L_A	Vida do componente em condições de normal operação
L_U	Vida do componente em condições de ensaio acelerado
L_i	Distância inicial entre as garras do dispositivo de fixação do ensaio de tração
M_f	Fração de massa de fibra presente no laminado
M_m	Fração de massa da matriz presente no laminado
n_{LPT}	Parâmetro do modelo da Lei da Potência Inversa
n_{TNT}	Parâmetro do modelo Térmico Não-Térmico
N_0	Número de componentes iguais
N_f	Número de componentes que falharam
N_s	Número de componentes sobreviventes
P^{max}	Carga máxima imediatamente antes da falha
$R(t)$	Função probabilidade de sobrevivência ou função Fiabilidade
S_λ	Irradiação solar espectral incidente numa superfície

t	Tempo
t'	Logaritmo natural do tempo
T	Temperatura absoluta em <i>Kelvin</i>
T_m	Tempo e vida médio
T_n	Tempo de vida nominal
T^*	Temperatura absoluta em graus <i>Kelvin</i>
U	Nível de solicitação da variável de aceleração não térmica
V	Nível de solicitação da variável de aceleração
V_A	Nível de solicitação da variável de aceleração para as condições do teste acelerado
V_f	Fração de volume de fibra presente no laminado
V_m	Fração de volume da matriz presente no laminado
V_U	Nível de solicitação da variável de aceleração para as condições de normal operação
$V_{Arrhenius}$	Taxa de processo até à falha ou velocidade de reação do modelo de <i>Arrhenius</i>
β	Parâmetro de forma
ΔL	Aumento da distância entre as garras do dispositivo de fixação do equipamento de tração
ε_i	Extensão em cada ponto
η	Parâmetro de escala ou vida característica
γ	Parâmetro de localização
λ	Taxa de avarias
λ_A	Taxa de avarias para as condições do ensaio acelerado
λ_U	Taxa de avarias para as condições de normal operação
$\lambda(t)$	Taxa de avarias ou taxa instantânea de falhas
μ	Valor médio dos tempos até à falha
μ'	Média dos logaritmos naturais dos tempos até à falha

ν_{lt}	Coeficiente de <i>Poisson</i>
ν_f	Coeficiente de <i>Poisson</i> da fibra
ν_m	Coeficiente de <i>Poisson</i> da matriz
ρ	Densidade do laminado
ρ_m	Densidade da matriz
ρ_f	Densidade da fibra
σ	Desvio padrão
σ'	Desvio padrão dos logaritmos naturais dos tempos até à falha
σ_i	Tensão de tração em cada ponto
σ_1	Tensão medida para a deformação $\varepsilon_1 = 0,0005$
σ_2	Tensão medida para a deformação $\varepsilon_2 = 0,0025$

Capítulo 1

Introdução

1.1. Enquadramento Teórico

O conhecimento da Fiabilidade de um produto durante as fases de desenvolvimento, fabrico, instalação e uso pode ser obtido através de ensaios em condições normais ou ensaios em condições aceleradas.

Os ensaios em condições normais de utilização realizam-se em condições próximas das de utilização do bem. Com estes ensaios é possível garantir que os modos de falha que ocorrem são próximos daqueles que ocorreriam em condições normais de operação. Em contrapartida, estes ensaios são morosos uma vez que exigem longos períodos de teste para que seja possível observar a degradação do bem.

Por outro lado, os ensaios acelerados de vida permitem o rápido desenvolvimento de novos produtos e tecnologias devido ao seu reduzido tempo de teste. São utilizados com frequência para testar e adotar/rejeitar rapidamente novas tecnologias e produtos disponíveis no mercado. Com estes ensaios é possível testar produtos mais complexos, com mais componentes e, portanto, com maiores probabilidades de falha. Permitem também a determinação das características de vida de um bem em escassas horas, dias ou semanas o que em condições normais de utilização demorariam meses ou anos a serem determinadas. Portanto, os ensaios acelerados de vida são uma mais valia para satisfazer as expectativas dos consumidores que são cada vez mais exigentes pois ambicionam uma maior Fiabilidade, manutibilidade e disponibilidade dos produtos.

1.2. Objetivo

O presente Trabalho Final de Mestrado (TFM) apresenta como principal objetivo a descrição dos principais métodos normalmente aplicáveis aos ensaios acelerados de vida (*ALT-Accelerated Life Test*), apresentando os modelos matemáticos mais comuns, como o modelo de *Arrhenius*, modelo de *Eyring*, modelo da Lei da Potência Inversa e o modelo Térmica Não-Térmico.

Para consolidar a teoria inerente aos ensaios acelerados de vida, foram obtidos dados de degradação das propriedades mecânicas de amostras de materiais compósitos. As amostras foram produzidas com manta de fibra de vidro e resina *epoxy* e estiveram sujeitas a um período de exposição à radiação UV de forma acelerada, simulando o efeito do sol, conseguido através de lâmpadas de emissão de radiação UV. A degradação do material foi mensurada através de ensaios de tração com o objetivo de analisar a variação das propriedades mecânicas do mesmo.

Com estes resultados foi possível definir, em níveis teóricos, dados fiabilísticos relativos às diferentes condições de utilização do material, tal como em condições normais de utilização. Esta análise foi conseguida com a implementação da metodologia relacionada com a degradação acelerada destrutiva através do *software* ALTA, introduzindo a distribuição de probabilidade, o modelo de degradação e o modelo matemático que melhor se ajusta aos dados foi possível obter parâmetros fiabilísticos em diferentes condições de operação.

1.3. Estrutura da Dissertação

O presente trabalho foi dividido em sete capítulos.

No primeiro Capítulo aborda-se o que concerne à relevância do tema, o seu objetivo e a sua estrutura.

No segundo Capítulo é descrita a ciência da Fiabilidade, nomeadamente o conceito de Fiabilidade, falha, avaria, diferentes formas de realizar a medição de Fiabilidade, as diferentes fases da vida de um componente (curva da banheira) e por fim as principais distribuições de probabilidades.

No terceiro Capítulo é exposto o conceito de ensaios acelerados de vida, os diferentes métodos e os principais modelos matemáticos utilizados, como o modelo de *Arrhenius*, modelo de *Eyring*, o modelo da Lei da Potência Inversa e o modelo Térmico Não-Térmico.

No quarto Capítulo são abordados temas que servirão como suporte para a compreensão do capítulo que procede o mesmo, tal como, a base teórica sobre os materiais compósitos, os conceitos básicos da radiação UV e a sua interação.

No Capítulo cinco definem-se os passos e fases a seguir no projeto da câmara de ensaios de UV, desde a ideia inicial até à solução final. São também apresentadas as especificações do equipamento de teste com vista a definir todos os parâmetros e procedimentos de funcionamento.

No sexto Capítulo é apresentada toda a análise e tratamento de resultados. Iniciando-se com o estudo das propriedades mecânicas das amostras após o ensaio de radiação UV até à utilização do *software* ALTA onde se realiza uma análise quantitativa dos dados obtidos nos ensaios acelerados de vida. Em seguida, é feita uma demonstração da utilização do ALTA até obter as características de vida do bem em condições normais de utilização.

No sétimo e último Capítulo exibem-se as conclusões obtidas neste projeto através de uma breve discussão de resultados onde se apresentam as considerações finais, bem como, são expostos alguns tópicos que poderão eventualmente ser abordados em trabalhos futuros. São também referidas algumas dificuldades que fizeram parte do desenvolvimento deste projeto.

Capítulo 2

Fiabilidade

O conceito de Fiabilidade teve início na década de 1930, quando a noção de probabilidade foi aplicada a problemas relacionados com a produção de energia elétrica. Na segunda guerra mundial os alemães introduziram pela primeira vez este conceito para melhorar o desempenho dos seus mísseis V1 e V2. Em 1950 o Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DOD) criou um comité sobre Fiabilidade, que em 1952 se transformou num grupo permanente, designado por *Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment* (AGREE) (Dhillon, 2006).

Em 1954 realizou-se pela primeira vez nos Estados Unidos um colóquio nacional sobre a Fiabilidade e em 1956 foi publicado o primeiro livro comercialmente disponível, intitulado por “*Reliability Factors for Ground Electronic Equipment*”. No ano seguinte, a Força Aérea dos EUA (USAF) lançou a primeira especificação militar (MIL-R-25717) com o título “*Reliability Assurance Program for Electronic Equipment*”. Alguns anos depois, em 1962, surgiu o primeiro mestrado em Engenharia da Fiabilidade no Instituto de Tecnologia da Força Aérea em Dayton, Ohio.

A manutenção e a Fiabilidade dos sistemas e produtos tornaram-se mais importantes do que nunca. A concorrência global e outros fatores associados fizeram com que os fabricantes produzissem bens de engenharia altamente fiáveis e de fácil manutenção. Nos dias de hoje, a Fiabilidade dos sistemas de engenharia tornou-se uma questão importante por causa da crescente dependência do funcionamento satisfatório desses sistemas (Dhillon, 2006) (B.S. and Ph., 2002).

2.1. Conceito de Fiabilidade

O conceito de Fiabilidade de um componente refere-se a uma “operação bem-sucedida” ou à “ausência de avarias”, ou ainda à “disponibilidade” de um

componente para cumprir o seu propósito. Em engenharia, a Fiabilidade é a medida da capacidade de um órgão operar sem falhas, isto é, como uma “probabilidade” de operação sem falha (Assis, 1997).

Segundo a norma NP EN 13306 (2007), o conceito de Fiabilidade é descrito como a “*aptidão de um bem para cumprir uma função requerida sob determinadas condições, durante um dado intervalo de tempo*”.

A Fiabilidade significa então, a probabilidade de sucesso (ou de não ocorrência de falha) do componente dentro de um certo horizonte temporal, ou seja, traduz a frequência com que o sistema irá avariar e resulta, por um lado, da conceção e da qualidade de fabrico do sistema (características intrínsecas) e, por outro, das condições de carga e ambientais em que decorrerá a sua operação (características extrínsecas) (Assis, 1997).

A Fiabilidade é então a probabilidade de um componente, produto ou sistema executar as suas funções projetadas sem falhas, em ambientes especificados, para períodos desejados num determinado intervalo de confiança (Kececioglu, 2002c).

2.2. Conceito de Falha

Em Fiabilidade, considera-se que “falha da função requerida” significa a cessação de funcionamento ou a degradação de um parâmetro de funcionamento até um nível considerado insatisfatório (Assis, 1997).

Segundo a norma NP EN 13306 (2007), um equipamento está em estado de falha quando este se encontra inapto para cumprir uma função requerida, excluindo a inaptidão devido à manutenção preventiva ou outras ações programadas ou devido à falta de recursos externos. A NP EN 13306 (2007) refere que a falha pode ser caracterizada através de três tipos, a falha oculta, latente e parcial. A falha oculta ocorre quando existe um estado de falha numa parte de um bem, mas que não pode ser detetada devido à existência de outro estado de falha no mesmo bem nessa ou noutra parte. Quando um componente está em estado de falha latente, significa que o bem está em estado de falha, mas ainda não foi detetado. E por fim, quando um componente está em falha parcial revela que o estado de falha pode permitir ao bem cumprir algumas, mas não todas as funções requeridas.

2.3. Conceito de Avaria

A norma NP EN 13306 (2007) diferencia o conceito de avaria e de falha. A noção de “avaría” refere-se a um acontecimento, enquanto que o termo “em falha” ou “avariado” é descrito como um estado.

A norma define então que, o conceito de avaria é a cessação da aptidão de um bem para cumprir uma função requerida. Depois de ocorrer avaria num certo componente, pode-se dizer que o bem poderá estar em falha, quer total quer parcial.

A avaria num componente pode ocorrer devido à conceção, ao fabrico, à instalação e pode ainda ocorrer devido à má utilização e/ou por manutenção desadequada.

2.4. Medição da Fiabilidade

Para a descrição das medidas de Fiabilidade, é considerado o exemplo descrito por Assis (1997), onde se considera um número de componentes iguais (N_0), sujeitos às mesmas condições, durante um intervalo de tempo (t). Nestas condições, todos os componentes apresentam igual probabilidade de falha. Ao longo do ensaio, cada componente apresenta uma probabilidade de falha ($F(t)$) e uma probabilidade de sobreviver ($R(t)$). No momento t , se existirem N_s componentes sobreviventes e N_f componentes que falharam, as seguintes expressões permitem calcular as probabilidades de sobrevivência (Equação (2.1)) e de falha (Equação (2.2)), respetivamente.

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N_0} \quad (2.1)$$

$$F(t) = \frac{N_f(t)}{N_0} \quad (2.2)$$

As duas probabilidades são complementares, ou seja, são mutuamente exclusivas, definindo-se matematicamente conforme a Equação (2.3).

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (2.3)$$

A Figura 1 representa a complementaridade entre a função Fiabilidade e a função probabilidade de falha ao longo do tempo.

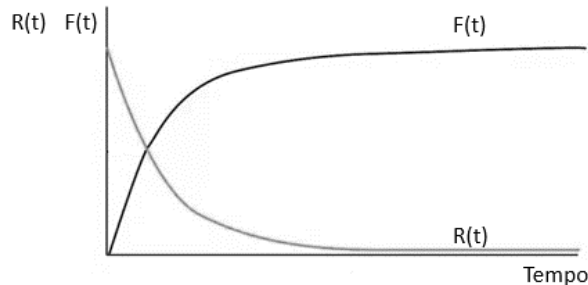


Figura 1 - Representação da função Fiabilidade e probabilidade de falha (adaptado de (Assis, 1997)).

Verifica-se que no decorrer do tempo, a função Fiabilidade ($R(t)$) diminui até igualar a zero e a função probabilidade de falha ($F(t)$) vai crescendo até atingir a unidade, mantendo-se sempre a relação de exclusividade como representado na Equação (2.3) (Assis, 1997).

2.4.1. Função Densidade de Probabilidade de Falha

Derivando a Equação (2.2) em ordem a t , obtém-se a função densidade de probabilidade de falha ($f(t)$) que se apresenta na Equação (2.4).

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \Leftrightarrow f(t) = \frac{1}{N_0} \cdot \frac{dN_f(t)}{dt} \quad (2.4)$$

A função $f(t)$ representa uma probabilidade instantânea, vulgarmente designada em estatística por função densidade de probabilidade. Esta função traduz a percentagem de componentes que estão a falhar por unidade de tempo, relativamente à população N_0 , no momento t (ou intervalo de tempo dt). A função densidade de probabilidade de falha é uma probabilidade incondicional, isto é, não se encontra condicionada ao número de componentes sobreviventes (N_s).

Integrando a função $f(t)$ entre zero e o momento t , obtém-se a função de probabilidade acumulada de falha ($F(t)$) como esquematizado na Equação (2.5).

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (2.5)$$

A função Fiabilidade ($R(t)$) é determinada a partir da probabilidade de um componente sobreviver sem falhas durante um tempo pré-determinado t . A partir da Equação (2.3) e da Equação (2.5) obtém-se a seguinte equação:

$$R(t) = 1 - F(t) \Leftrightarrow R(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt \quad (2.6)$$

Em que $F(t)$ representa a probabilidade do componente falhar até ao momento t e $R(t)$ representa a probabilidade do componente sobreviver sem falhas até ao mesmo momento t .

Na Figura 2 encontra-se a representação da função densidade de probabilidade de falha e a função probabilidade acumulada de falha ao longo do tempo.

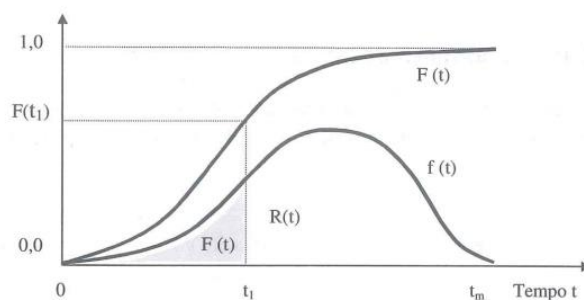


Figura 2 - Função densidade de probabilidade de falha e função probabilidade acumulada de falhas. (Assis, 1997)

Analisando a Figura 2, verifica-se que o valor da função $F(t)$ no momento t_1 pode ser conhecida através da leitura no eixo das ordenadas ou pela área sombreada sob a curva da função $f(t)$ entre o momento 0 e t_1 (Assis, 1997).

2.4.2. Taxa de Avarias

Manipulando matematicamente a Equação (2.4) e a Equação (2.5) obtém-se a seguinte Equação (2.7):

$$\frac{dN_f(t)}{dt} = -N_0 \cdot \frac{dR(t)}{dt} \quad (2.7)$$

A taxa de avarias ou taxa instantânea de falhas ($\lambda(t)$) tal como $f(t)$ é também uma densidade de probabilidade, mas refere-se ao número de componentes sobreviventes no instante t e é uma probabilidade condicional, isto é, encontra-se condicionada ao número de componentes sobreviventes (N_s). Esta função representa a taxa de avarias por unidade de tempo, no instante t , em relação aos componentes que sobreviveram até esse instante.

Combinando entre si as expressões anteriores, obtém-se a expressão (2.8) que representa a taxa de avarias (Assis, 1997).

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \Leftrightarrow \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.8)$$

2.4.3. Função Fiabilidade Geral

A função Fiabilidade ($R(t)$) também pode ser obtida pela manipulação da Equação (2.8), obtendo-se a seguinte expressão:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (2.9)$$

Com a Equação (2.9) obtém-se o cálculo da Fiabilidade em função da taxa de avarias, independentemente da distribuição de avarias que esteja em análise, ou seja, é independente da forma específica da função de falha.

Todas as funções descritas anteriormente, como a densidade de probabilidade de falha ($f(t)$), probabilidade acumulada de falha ($F(t)$) ou de sucesso ($R(t)$) e a taxa de avarias ($\lambda(t)$), encontram-se representadas na Figura 3 e podem ser utilizadas para representar a vida de um componente (Assis, 1997).

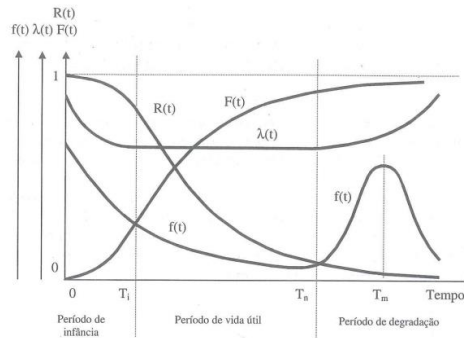


Figura 3 - Curvas típicas representativas da vida de um componente sendo T_n a vida nominal e T_m a vida média. (Assis, 1997)

2.4.4. Tempo Médio de Falha

O tempo médio de falha, vulgarmente conhecido pela sigla anglo-saxónica MTTF (*Mean Time to Failure*), pode ser calculado pela média estatística dos tempos de falha (t genérico) dos vários componentes da amostra ensaiada, definindo-se matematicamente como representado na Equação (2.10).

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2.10)$$

Esta expressão pode ser designada de duas formas, nomeadamente por MTTF ou MTBF (*Mean Time Between Failures*), ou seja, apresentam a mesma definição estatística pois MTBF trata-se de uma forma particular do MTTF.

MTTF aplica-se no caso em que os componentes da amostra inicial, não são reparáveis, sendo substituídos por componentes novos à medida que vão falhando, enquanto que o MTBF representa o tempo médio entre falhas e aplica-se aos casos em que os componentes da amostra inicial, à medida que vão falhando, são desmontados, reparados e voltam a ser utilizados (rotáveis) (Assis, 1997) (Elsayed, 1996).

2.5. Curva da Banheira

A curva da banheira ou curva de mortalidade, representa a curva da taxa de avarias ($\lambda(t)$). É utilizada para representar o comportamento de falha de vários itens em engenharia, pois a sua taxa de avarias depende do tempo. A curva da banheira

pode ser dividida em três períodos característicos: período de infância, período de vida útil e período de degradação, tal como representado na Figura 4 (Dhillon, 2006) (Assis, 1997).

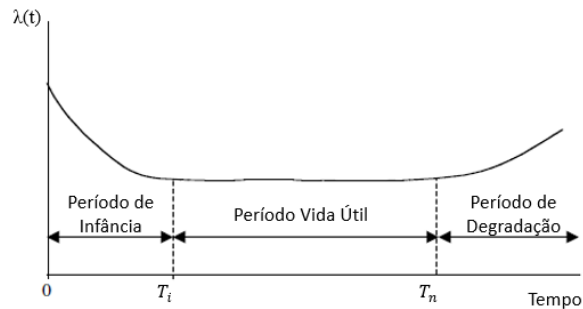


Figura 4 - Representação da Curva da Banheira. Adaptado (Dhillon, 2006)

No início de vida dos equipamentos, estes apresentam uma elevada taxa de avarias, sendo este período designado por infância ou mortalidade infantil. Esta elevada taxa de avarias ocorre devido a deficiências de projeto, defeitos de fabrico, mau controlo da qualidade, incorreta instalação, fraco plano de manutenção ou falhas humanas. Para minimizar este problema, é necessário a realização de ensaios aos componentes em condições de serviço simuladas antes de entrarem em serviço efetivo (Assis, 1997) (Dhillon, 2006).

Após os componentes atingirem a idade T_i , a taxa de avarias assume um valor quase constante, isto é, λ não depende do tempo. Este período ocorre depois de todos os componentes originalmente defeituosos já terem falhado. Esta fase designa-se por período de maturidade ou período de vida útil e estende-se por parte significativa da vida em serviço de um componente. Nesta zona, as falhas ocorrem devido a solicitações superiores às projetadas, baixos coeficientes de segurança, defeitos indetetáveis e/ou erros humanos (Dhillon, 2006). Estas falhas ocorrem de forma aleatória, pois não obedecem a qualquer lógica de ocorrência, podendo dar origem a acidentes graves. Neste período de vida, a função densidade de probabilidade ($f(t)$) e a função Fiabilidade ($R(t)$) são funções exponenciais negativas, o que facilita o cálculo da Fiabilidade. Para que este período de vida seja maior é necessário minimizar o período de mortalidade infantil e minimizar ou anular a fase de degradação substituindo preventivamente o componente. É possível maximizar o período de vida útil através de ações de despiste precoce e manutenção preventiva.

Depois de atingir a idade T_n , a taxa de avarias cresce acentuadamente por consequência de fenómenos de degradação provocados pelo desgaste e/ou fadiga dos materiais. Este período é designado por período de degradação ou envelhecimento. Em casos normais, só uma pequena fração de amostras iniciais terão falhado até à vida nominal T_n , a grande maioria irá falhar dentro de pouco tempo. Esta etapa da vida pode ser evitada substituindo-se preventivamente o componente antes deste atingir a idade T_n , ou beneficiando-se o seu estado, de forma a adiar o momento T_n , ou seja, prolongar significativamente a sua “vida útil”. Para conseguir adiar ou até mesmo evitar esta fase da vida de um bem é necessário ter o conhecimento preciso do seu início (T_n). Isto é conseguido através do estabelecimento de políticas de manutenção preventiva (de beneficiação ou de substituição). As falhas nesta região podem ocorrer devido ao desgaste causado por atrito, má manutenção, práticas de revisão incorretas, corrosão, fluência e desgaste causado pelo envelhecimento (Dhillon, 2006).

2.6. Distribuições de Probabilidades

Existem diversas funções de distribuição de probabilidades que permitem descrever as características de falhas de diferentes componentes. Uma única distribuição não é adequada a todas as circunstâncias. As distribuições de probabilidades mais frequentemente utilizadas para representar fenómenos de vida de componentes são:

- Distribuição de *Weibull*;
- Distribuição Normal;
- Distribuição Exponencial;
- Distribuição Lognormal.

Seguidamente serão descritas as quatro distribuições de probabilidades.

2.6.1. Distribuição de *Weibull*

A distribuição de *Weibull* é uma distribuição de Fiabilidade de uso geral, precisa, prática e é largamente utilizada na engenharia devido à sua versatilidade, sobretudo na descrição de fenómenos de vida de componentes elementares de

sistemas, ao longo de todo o seu ciclo de vida. Esta distribuição permite caracterizar as falhas ou avarias durante os três períodos característicos da vida de um bem típico, ou seja, período infantil, período de vida útil e período de degradação ou envelhecimento.

A sua vasta utilização deve-se à possível variação dos seus parâmetros, tal como o parâmetro de forma (β), parâmetro de escala ou vida característica (η) e o parâmetro de localização (γ). Com esta variação é possível obter outras distribuições particulares como a Exponencial, a Normal e a Lognormal e assim modelar uma grande variedade de dados e características de vida. A distribuição de *Weibull* pode apresentar três formas: tri-paramétrica, bi-paramétrica e mono-paramétrica (Kececioglu, 2002a).

No seu caso mais geral a função densidade de probabilidade de falha ($f(t)$) da distribuição de *Weibull* tri-paramétrica é definida pela Equação (2.11).

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.11)$$

Com a distribuição de *Weibull* tri-paramétrica é possível analisar casos em que o início de operação do produto não coincide com o início da análise.

Se o parâmetro de localização (γ) for assumindo como zero, obtém-se uma distribuição de *Weibull* bi-paramétrica, definida pela Equação (2.12)

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.12)$$

Na sua forma bi-paramétrica a sua aplicação é mais simples e é utilizada para componentes novos, ou seja, sem vida inicial.

A distribuição de *Weibull* torna-se mono-paramétrica se, para além de possuir o parâmetro de localização igual a zero, possuir o parâmetro de forma igual à unidade ($\beta = 1$). Esta forma particular é igual à distribuição Exponencial. A sua forma mono-paramétrica é definida matematicamente pela Equação (2.13).

$$f(t) = \left(\frac{1}{\eta}\right) \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)} \quad (2.13)$$

A equação para a função probabilidade de falha da distribuição de *Weibull* tri-paramétrica é dada pela Equação (2.14).

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.14)$$

Em que t é variável e pode ser um tempo, distância, ciclos, entre outros.

A função Fiabilidade para a distribuição de *Weibull* é dada pela seguinte expressão:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.15)$$

A função de taxa de avarias de *Weibull* é dada pela Equação (2.16).

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (2.16)$$

A taxa de avarias da distribuição em análise caracteriza valores para a taxa de avarias, de forma decrescente ($\beta < 1$), constante ($\beta = 1$) ou crescente ($\beta > 1$) (Reliasoft Corporation, 2015) (Assis, 1997).

2.6.2. Distribuição Normal

A distribuição Normal é semelhante à distribuição de *Weibull* quando o parâmetro de forma (β) toma o valor de aproximadamente 3,4. Neste caso apresentam uma perfeita simetria em relação ao valor médio. A distribuição Normal é aplicada principalmente quando ocorrem poucas falhas no início ou no fim da vida do produto, concentrando-se em torno de um valor médio.

Esta distribuição, amplamente utilizada, é também conhecida como a distribuição *Gaussiana*. A sua função densidade de probabilidade é definida matematicamente pela Equação (2.17).

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(t-\mu)}{\sigma} \right]^2} \quad (2.17)$$

Onde μ representa o valor médio dos tempos até à falha e σ representa o desvio padrão dos tempos até à falha.

A Fiabilidade para a distribuição Normal é dada pela Equação (2.18).

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(t-\mu)}{\sigma} \right]^2} dt \quad (2.18)$$

E a probabilidade de falha é dada por:

$$\begin{aligned} F(t) &= 1 - R(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt \\ &= \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(t-\mu)}{\sigma} \right]^2} dt \end{aligned} \quad (2.19)$$

Verifica-se que não existe uma solução direta das equações anteriores, pelo que se recorre a tabelas de distribuição normal ou a programas computacionais.

A taxa de avarias para esta distribuição é sempre crescente sendo a variação dada fundamentalmente pelo valor do desvio padrão (σ) (parâmetro de forma) (Dhillon, 2006) (Kececioglu, 2002a) (Reliasoft Corporation, 2015).

2.6.3. Distribuição Exponencial

Como foi referido anteriormente, a distribuição Exponencial é um caso particular da distribuição de *Weibull*, quando o parâmetro de localização é nulo e o parâmetro de forma assume o valor da unidade, ou seja, esta distribuição é utilizada para modelar o comportamento de componentes ou sistemas com uma taxa de avarias constante. Pelo que, esta distribuição aplica-se quando os componentes se encontram em vida útil (λ =constante).

A Equação (2.20) representa a função densidade de probabilidade de falha para a distribuição Exponencial de dois parâmetros.

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot (t-\gamma)} \quad (2.20)$$

A equação para a função probabilidade de falha acumulada é dada por:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot (t-\gamma)} \quad (2.21)$$

A função Fiabilidade da distribuição Exponencial de dois parâmetros é dada pela Equação (2.22).

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^{t-\gamma} \lambda \cdot e^{-\lambda x} dx = e^{-\lambda \cdot (t-\gamma)} \quad (2.22)$$

Em vida útil, a taxa de avaria é inversamente proporcional ao tempo médio entre avarias (MTBF) e expressa-se matematicamente pela Equação (2.23).

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (2.23)$$

Assumindo que o parâmetro de localização (γ) é igual a zero a distribuição torna-se Exponencial com um parâmetro e é representada pela Equação (2.24).

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \Leftrightarrow f(t) = \frac{1}{MTBF} \cdot e^{-\frac{t}{MTBF}} \quad (2.24)$$

A função Fiabilidade para a distribuição Exponencial de um parâmetro é dada por:

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \Leftrightarrow R(t) = e^{-\frac{t}{MTBF}} \quad (2.25)$$

A função de taxa de avarias da distribuição Exponencial é dada pela Equação (2.26).

$$\begin{aligned} \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} &\Leftrightarrow \lambda(t) = \frac{\lambda \cdot e^{-\lambda \cdot (t-\gamma)}}{e^{-\lambda \cdot (t-\gamma)}} \Leftrightarrow \lambda(t) = \lambda \\ &= \textit{constante} \end{aligned} \quad (2.26)$$

A taxa de avarias para a distribuição em estudo é sempre constante (Reliasoft Corporation, 2015) (Kececioglu, 2002a) (Assis, 1997).

2.6.4. Distribuição Lognormal

Esta distribuição aplica-se em situações assimétricas onde as falhas se concentram num dos extremos do intervalo, ou em situações onde se verificam grandes diferenças nos valores observados. De forma geral, esta distribuição aplica-se sempre que se constata que o logaritmo da vida de um bem segue uma distribuição Normal.

A distribuição Lognormal é comumente utilizada para análise de Fiabilidade geral, quando se trata de situações relativas ao número de ciclos até à falha por fadiga e resistência do material. Quando os logaritmos naturais dos tempos até à falha são normalmente distribuídos, então dizemos que os dados seguem a distribuição Lognormal. A função densidade de probabilidade de falha da distribuição Lognormal é dada pela Equação (2.27).

$$f(t) = \frac{1}{t \cdot \sigma' \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t' - \mu'}{\sigma'} \right)^2} \quad (2.27)$$

$$f(t) \geq 0, t > 0, \sigma' > 0$$

$$t' = \ln(t)$$

Onde μ' é a média dos logaritmos naturais ($\ln \mu$) dos tempos até à falha e σ' é o desvio padrão dos logaritmos naturais ($\ln \sigma$) dos tempos até à falha.

A Fiabilidade para uma missão de tempo t , iniciando-se quando a idade é nula, para a distribuição Lognormal é determinada pela Equação (2.28) e Equação (2.29).

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(x) dx \quad (2.28)$$

ou

$$R(t) = \int_{\ln(t)}^{\infty} \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu'}{\sigma'} \right)^2} dx \quad (2.29)$$

Tal como acontece com a distribuição Normal, não existe uma solução para a função de Fiabilidade Lognormal. As soluções podem ser obtidas através da utilização de tabelas Normais.

A taxa de falha da distribuição Lognormal é dada pela Equação (2.30).

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{1}{t \cdot \sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t' - \mu'}{\sigma'} \right)^2}}{\int_{\ln(t)}^{\infty} \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu'}{\sigma'} \right)^2} dx} \quad (2.30)$$

A taxa de avarias da distribuição Lognormal é semelhante à distribuição Normal, sendo a sua variação dada fundamentalmente pelo valor do desvio padrão (padrão de forma) (Dhillon, 2006) (Kececioglu, 2002a) (Reliasoft Corporation, 2015) (Assis, 1997).

Capítulo 3

Ensaio Acelerados de Vida

A análise de dados de vida para quantificar as características da vida de um produto, sistema ou componente, normalmente envolve a análise de tempos até à falha obtidos em condições normais de funcionamento. Contudo, obter estes dados de vida pode ser difícil, devido à crescente competitividade empresarial, à longevidade dos produtos, ao pequeno período entre o projeto e o lançamento e por fim pelo desafio de testar produtos que estão sujeitos a condições normais de utilização.

Sendo fundamental observar as falhas dos produtos para uma melhor compreensão dos modos de falha e da sua vida característica, ou seja, obter dados fiabilísticos, foi necessário desenvolver métodos para forçar os produtos a falhar mais cedo, ou seja, acelerar as suas falhas, do que se estivessem sujeitos a condições normais de utilização. Estes métodos designam-se por ensaios acelerados de vida (*Accelerated Life Test (ALT)*), que têm como objetivo acelerar as falhas com o propósito de quantificar as características de vida de um produto em condições normais de serviço (Reliasoft Corporation, 2015).

Segundo *Hietala and Ojala (2017)* testes acelerados de vida como “*uma deterioração/envelhecimento induzido num componente para que surjam falhas normais, operando em níveis de solicitações muito maiores do que seria esperado em condições normais de utilização*” (Hietala and Ojala, 2017).

Le Liu et al (2017) afirma que, os testes acelerados de degradação são geralmente utilizados para a avaliação da vida útil e obter a Fiabilidade de produtos altamente fiáveis, dados estes que não são possíveis de obter através de testes tradicionais.

Segundo *Pallerosi (2017)* os ensaios acelerados são ensaios no qual os níveis das solicitações aplicadas são escolhidos de modo a exceder os valores

especificados nas condições de referência, a fim de reduzir o tempo necessário para se observar a reação do componente ou para ampliar esta reação durante um intervalo de tempo. Para ser válido, o ensaio acelerado não deve alterar os modos de falha básicos e os mecanismos de falha.

Escobar (2007) define que os testes acelerados de vida se dividem em ensaios acelerados de vida qualitativos e ensaios acelerados de vida quantitativos. Os ensaios acelerados de vida qualitativos apenas identificam as falhas e os modos de falha que potencialmente o bem irá sofrer sem fazer quaisquer previsões da vida do produto sob condições normais de utilização. Por outro lado, os ensaios acelerados de vida quantitativos fazem previsões da vida de um produto nas suas condições normais de funcionamento, com dados obtidos através de ensaios acelerados de vida.

3.1. Ensaios Acelerados de Vida Qualitativos

Os ensaios acelerados de vida qualitativos são testes que somente produzem informação dos possíveis modos de falha, tal como o *Elephant Test*; *Torture Test*; *HALT (Highly Accelerated Life Test)*, *Shake & bake tests*, *STRIFE (Stress-Life)* e *EST (Environmental Stress Testing)*, entre outros. São realizados em pequenas amostras submetidas a tensões cíclicas, constantes ou múltiplas. No entanto, se o ensaio não for projetado corretamente, o produto pode falhar devido a modos que não ocorreriam na vida real. Um bom estudo qualitativo é aquele que rapidamente revela os modos de falha que ocorrem durante a vida de um produto sob condições normais de utilização. Em geral, os testes qualitativos não são concebidos para proporcionar dados de vida, ou seja, não quantificam a Fiabilidade dos bens em condições normais de uso. No entanto, fornecem informações sobre que tipos e níveis de tensões podem ser utilizadas num posterior ensaio quantitativo. Este tipo de ensaio pode melhorar a Fiabilidade dos equipamentos pois revela os possíveis modos de falha e é possível combatê-los. Em muitos casos, os ensaios qualitativos são um precursor para os testes quantitativos.

3.2. Ensaios Acelerados de Vida Quantitativos

Ao contrário dos testes referidos anteriormente, os ensaios acelerados de vida quantitativos (QALT- *Quantitative Accelerated Life Tests*) caracterizam-se por quantificar as características de vida de um produto, componente ou sistema sob condições normais de utilização promovendo informações acerca da Fiabilidade do mesmo. Podem também ser utilizados para ajudar na avaliação de riscos ou comparações de projetos, entre outros.

Os testes quantitativos ainda se podem dividir em dois principais métodos, nomeadamente o que se refere ao aumento da taxa de operação e o que se refere ao aumento da taxa de desgaste, que serão detalhados na Secção 3.3. O principal objetivo dos testes de vida quantitativos é obter as informações sobre o tempo até à falha de um determinado produto/bem para ser possível entender e prever os modos de falha, e poder atuar nos mesmos (Reliasoft Corporation, 2015) (Müller and Hinz, 2017). Na Tabela 1, podem-se verificar as principais diferenças entre os testes acelerados de vida quantitativos e qualitativos.

Tabela 1 - Principais diferenças entre os testes acelerados de vida qualitativos e quantitativos (adaptado de (Müller and Hinz, 2017)).

Teste acelerado de vida qualitativo	<p>Objetivo:</p> <ul style="list-style-type: none">-Deteção de falhas no projeto e nos processos de fabrico, diagrama causa-efeito;-Melhoria da Fiabilidade do produto. <p>Requisitos dos testes:</p> <ul style="list-style-type: none">-Conhecimento detalhado sobre o objeto de teste;-Requer experiência da pessoa que realiza o teste. <p>Modelos matemáticos:</p> <ul style="list-style-type: none">-Nenhuma matemática/estatística envolvida.
Teste acelerado de vida quantitativo	<p>Objetivo:</p> <ul style="list-style-type: none">-Determinação da distribuição do tempo de falha;-Obter informações sobre o processo de degradação;-Identificação dos mecanismos dominantes de falha. <p>Requisitos dos testes:</p> <ul style="list-style-type: none">-Plano de teste detalhado: duração do ensaio, número de amostras, intervalo de confiança, fatores de aceleração e ambiente de ensaio. <p>Modelos matemáticos:</p> <ul style="list-style-type: none">-Relação solicitação-vida: <i>Arrhenius, Eyring, Coffin-Manson, Norris-Lanzberg</i>;-Distribuição de vida/probabilidades: <i>Weibull, Lognormal, Exponencial</i>.

3.3. Métodos de Aceleração

Segundo Müller and Hinz (2017) e Reliasoft Corporation (2015) existem dois métodos principais de aceleração para obter tempos até à falha de forma acelerada, que se dividem em ensaios por aumento da taxa de operação e ensaios por aumento da taxa de desgaste, como representado na Figura 5.

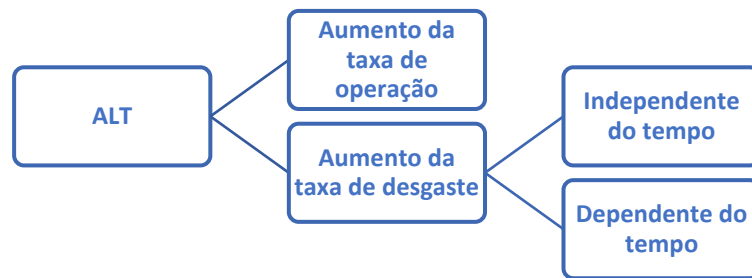


Figura 5 - Diferentes métodos de aceleração de ensaios acelerados de vida.

Para produtos que não operam de uma forma continuada, acelera-se o tempo até que surjam falhas, aumentando a taxa de utilização destes produtos. A este tipo de ensaio designa-se por aumento da taxa de operação (“*Usage Rate Acceleration*”). Por outro lado, é possível aumentar o nível de solicitações ao qual o componente está exposto, de modo a que excedam os seus limites de utilização em condições normais de serviço. A este tipo de ensaio designa-se por aumento da taxa de desgaste (“*Overstress Acceleration*”) (Reliasoft Corporation, 2015)(Müller and Hinz, 2017).

3.3.1. Aumento da Taxa de Operação

Este método é aplicável a componentes que não operam de forma contínua quando estão sujeitos a condições normais de utilização. Ao aumentar a taxa de operação os componentes passam a trabalhar de forma contínua, o que faz com que as falhas sejam encontradas mais rapidamente. Por exemplo, o aumento da frequência de abertura e fecho da porta de um micro-ondas até que surjam modos de falha.

No entanto, quando a taxa de utilização é aumentada, as condições de funcionamento tais como a temperatura do componente devem ser as mesmas que

no uso normal. Este método apresenta limitações quando testado em componentes que apresentam uma utilização contínua ao longo da sua vida. Nestes casos, o seu uso não é viável sendo então necessário o uso do método do aumento da taxa de desgaste (Reliasoft Corporation, 2015) (Hietala and Ojala, 2017).

3.3.2. Aumento da Taxa de Desgaste

Este ensaio baseia-se na aplicação de solicitações superiores às solicitações que o produto estaria sujeito em condições normais de utilização. Os resultados obtidos através deste ensaio são extrapolados para obtê-los em condições normais da sua utilização. Os testes acelerados de vida podem ser realizados em diferentes condições de temperatura, humidade, tensão, pressão, vibrações, entre outros, com o objetivo de acelerar ou simular o mecanismo de falha. Estes testes também podem ser realizados com a combinação de diferentes solicitações.

Os testes acelerados de vida de aumento da taxa de desgaste devem ser selecionados de modo a que acelerem os modos de falha, mas que não introduzam modos de falha que não ocorram sob condições normais de utilização. Normalmente estes ensaios são realizados fora dos limites das especificações do produto, mas não fora dos limites definidos na fase de projeto do mesmo. A escolha da carga e do processo de elaboração do ensaio é extremamente importante. Se estes níveis ou limites não forem conhecidos, devem-se realizar testes qualitativos com o objetivo de verificar os limites apropriados.

É evidente que, se as cargas aplicadas nos ensaios acelerados forem elevadas, o tempo requerido para a realização dos ensaios decresce, porque as falhas irão ocorrer mais rapidamente. Contudo, quando as cargas se afastam das condições de uso a incerteza da extrapolação aumenta. Os intervalos de confiança poderão fornecer uma medida dessa incerteza na extrapolação (Reliasoft Corporation, 2015).

A *Reliasoft Corporation* (2015) define ainda que existem diferentes tipos de cargas que podem ser considerados quando se realiza um ensaio acelerado de vida. As solicitações mais comuns podem ser constantes, por patamares, cíclicas ou aleatória. Este tipo de cargas são classificadas de acordo com a dependência da solicitação em função do tempo. Há dois possíveis regimes de solicitações,

nomeadamente as solicitações que são independentes do tempo e as solicitações que dependem do tempo. Os diferentes tipos de solicitações são descritos de seguida.

3.3.2.1. Solicitações independentes do tempo/constante

Quando a solicitação aplicada é independente do tempo, o gráfico solicitação vs. tempo é representado por uma reta horizontal como mostra a Figura 6.

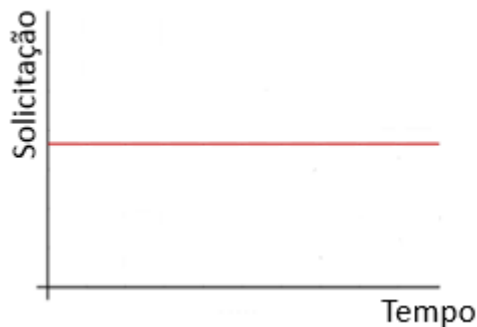


Figura 6 - Solicitação independente do tempo (adaptado de (Reliasoft Corporation, 2015)).

Este tipo de solicitação apresenta inúmeras vantagens em relação às solicitações variáveis com o tempo, tal como:

- Maior facilidade na execução de um teste de solicitação constante;
- Maior facilidade em quantificar um teste de solicitação constante;
- Maior variabilidade de modelos para análise de dados, e são amplamente divulgados e empiricamente verificados;
- Maior precisão na extrapolação a partir de um teste de solicitação constante do que a extrapolação de um teste de solicitação dependente do tempo;
- Presume-se que a maioria dos produtos operam com uma solicitação constante em condições normais (Reliasoft Corporation, 2015).

3.3.2.2. Solicitações dependentes do tempo

Quando as solicitações são dependentes do tempo, o produto é submetido a um nível de solicitações que varia com o mesmo.

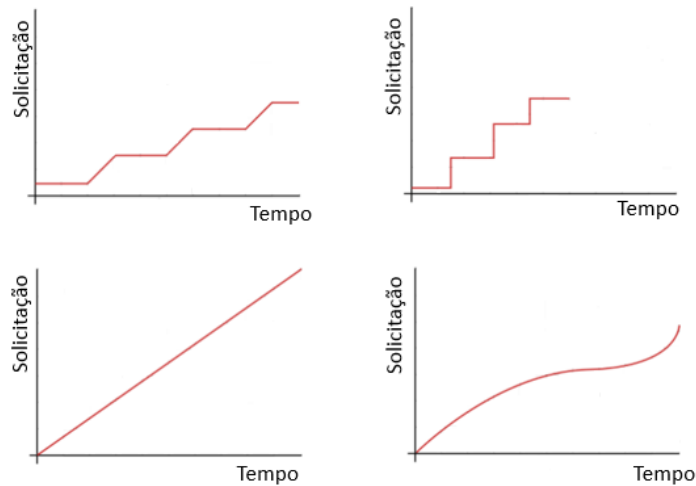


Figura 7 - Exemplos de solicitações em função do tempo (adaptado de (Reliasoft Corporation, 2015)).

Na Figura 7 encontram-se representados diferentes casos típicos de testes de esforços dependentes do tempo, como o modelo de solicitações por patamares e o modelo de solicitações de rampa.

3.4. Modelos Matemáticos

A interpretação dos dados obtidos através dos ensaios acelerados requer modelos que relacionam variáveis de aceleração como a temperatura, a radiação, a tensão, a pressão, entre outras com a aceleração do tempo. Para analisar uma gama de variáveis de aceleração, pode-se estabelecer um modelo para os dados descreverem o efeito que a(s) variável(eis) têm sobre os processos de falha que causam. A ideia geral é testar a(s) variável(eis) de aceleração em níveis elevados para acelerar o processo de falha e extrapolar para níveis mais baixos de solicitação (Escobar and Meeker, 2007).

Escobar e Meekerl (2007) defendem que existem modelos físicos e modelos empíricos. Os modelos físicos são criados para mecanismos onde as falhas são bem compreendidas, é possível obter um modelo baseado na teoria físico/química que descreve o processo de falha e é possível realizar a extrapolação para condições de uso. Por outro lado, é possível obter modelos empíricos, que são obtidos quando existe pouca compreensão dos processos físico/químicos que conduzem à falha e torna-se impossível desenvolver um modelo baseado na teoria físico/química (Escobar and Meeker, 2007).

Segundo *Pallerosi* (2007) e *Reliasoft Corporation* (2015) existem diversos modelos matemáticos de ensaios acelerados, tais como:

- Relação de *Arrhenius*;
- Relação de *Eyring*;
- Relação da Lei de Potência Inversa;
- Relação Temperatura-Humidade;
- Relação Térmica Não-Térmica;
- Relação Multivariada;
- Modelos de solicitações variando no tempo.

Segundo *Elsayed* (1996) existem quatro tipos de modelos para relacionar os dados de falha em condições aceleradas com medidas de Fiabilidade em condições normais de solicitação ou de projeto que são:

- Modelos estatísticos paramétricos;
- Modelos estatísticos não-paramétricos;
- Modelos físico-estatísticos;
- Modelos físico-experimentais.

Quando se utiliza qualquer dos modelos é necessário que se verifique que os componentes que operam sob as condições normais apresentam o mesmo mecanismo de falha que os que ocorrem nas condições dos ensaios acelerados.

Quando a relação entre as solicitações aplicadas (temperatura, humidade, tensão, entre outros) e o tempo até à falha do componente é difícil de determinar com base nos princípios físicos ou químicos são aplicados os modelos estatísticos paramétricos. Nesta situação, os componentes são testados em diferentes níveis de solicitações aceleradas obtendo-se tempos até à falha em cada nível, posteriormente é possível determinar a distribuição de probabilidade que mais se adequa e os seus parâmetros. É previsível que a distribuição de probabilidade e os parâmetros de forma sejam iguais em todos os níveis de solicitações, bem como nas situações operacionais, pois os tempos nos diferentes níveis estão relacionados linearmente. O mesmo já não acontece com o parâmetro de escala, que pode ser distinto para os diferentes níveis de solicitações. Os modelos estatísticos paramétricos mais frequentes são: o modelo de aceleração para distribuição Exponencial; o modelo de aceleração para a distribuição de *Weibull*; o modelo de

aceleração para a distribuição de *Rayleigh* e o modelo de aceleração para a distribuição Lognormal.

Os modelos estatísticos não-paramétricos são utilizados quando os dados de tempos até à falha conduzem a uma distribuição de probabilidades mais complexa ou desconhecida ou mesmo quando o número de observações é pequeno. Os modelos utilizados nesta situação são o modelo linear e o modelo de riscos proporcionais.

Os modelos físico-estatísticos, utilizam o efeito das solicitações aplicadas na taxa de avarias por componente em teste. Tomando o exemplo de *Ensayed* (1996), a taxa de avarias de muitos circuitos eletrónicos integrados é acelerada por fatores como a temperatura, logo o modelo que relaciona a taxa de avarias com o fator de aceleração, neste caso a temperatura, deverá ter em conta as propriedades físicas e químicas dos componentes testados. Uma vez que são testados vários componentes com o mesmo nível de solicitação e as falhas ocorrem de forma aleatória, a expressão da taxa de avarias também deve refletir a distribuição de probabilidades subjacente. Os modelos que representam este efeito são: o modelo de *Arrhenius*; o modelo de *Eyring*; o modelo da Lei da Potência Inversa e o modelo combinado.

O último modelo é o modelo físico-experimental, que tem em conta que o tempo até à falha de muitos componentes pode ser estimado com base no mecanismo físico de falha pelo desenvolvimento de princípios teóricos para os mecanismos de falha ou a realização de experiências usando diferentes níveis dos fatores que afetam o tempo até à falha. Os modelos mais utilizados para prever o tempo até à falha em função dos parâmetros que resultam da falha dos componentes são o modelo de eletromigração, modelo de falhas por humidade e modelo de falhas por fadiga.

Por vezes existem muitas situações em que a falha real dos componentes, especialmente em níveis de tensão próximos de condições operacionais, pode não ser catastrófica, mas o componente pode degradar-se dentro do tempo do ensaio. Por exemplo, um componente pode iniciar o ensaio com uma leitura de valor de resistência aceitável, mas à medida que o tempo de teste progride, a resistência eventualmente chega a um nível inaceitável que faz com que o componente falhe. Em tais casos, as medições da degradação das características de interesse (aquelas

cujas alterações podem causar falhas catastróficas do componente) são frequentemente analisadas durante o teste. Estes testes designam-se por ensaios de degradação acelerados e os dados de degradação obtidos pelos mesmos são então analisados e utilizados para prever o tempo até à falha em condições normais (Elsayed, 1996).

Neste Capítulo, serão descritos alguns modelos comumente utilizados para a estimativa de vida como por exemplo o modelo de *Arrhenius* e *Eyring* para a temperatura, o modelo da Lei da Potência Inversa para os esforços mecânicos e o Modelo Térmico Não-Térmico que relaciona duas variáveis de solitação, uma térmica e outra não-térmica. Se não houver um modelo adequado disponível para um produto específico, é possível desenvolver um modelo empírico baseado nos modelos existentes, nos detalhes do produto e nas suas condições de operação (Hietala and Ojala, 2017).

3.4.1. Modelo de *Arrhenius*

O modelo de *Arrhenius* deriva da equação de *Arrhenius*, que foi proposta pelo físico/químico *Svante Arrhenius* no seu estudo da dissociação do eletrólito, em 1887. Contudo, hoje é amplamente utilizado como uma ferramenta para descrever fenómenos diferentes da influência da temperatura na taxa de reações químicas, isto é, difusão, condutividade térmica e elétrica e a viscosidade (Fridrichová and Dvorák, 2016) (Reliasoft Corporation, 2015).

Em testes acelerados de vida, o modelo de *Arrhenius* é utilizado quando a variável estudada nos mesmos é térmica, isto é, a temperatura. Este modelo estima a vida característica à temperatura de uso dos dados de falha obtidos a altas temperaturas (Kececioglu, 2002b) (Reliasoft Corporation, 2015). Este modelo de *Arrhenius* é a relação de vida-solitação mais utilizada em testes acelerados de vida, uma vez que o aumento da temperatura é um dos fatores mais comumente utilizados para acelerar um mecanismo de falha (Escobar and Meeker, 2007).

O modelo de *Arrhenius* correlaciona a vida ($V_{Arrhenius}$) do componente em função de um dado nível de solitações aplicadas ($k_B \cdot T^*$), e é dado pela Equação (3.1).

$$V_{Arrhenius} = A_{Arrhenius} \cdot e^{-\frac{E_A}{k_B \cdot T^*}} \quad (3.1)$$

Onde, $V_{Arrhenius}$ corresponde à taxa de processo até à falha ou velocidade da reação; $A_{Arrhenius}$ representa uma constante não térmica; E_A exprime a energia de ativação (eV); k_B representa a constante de *Boltzman's* ($8,617385 \times 10^{-5} \text{ eVK}^{-1}$) e por fim T^* representa a temperatura absoluta em graus *Kelvin* (Kececioglu, 2002b) (Pallerosi, 2007).

A energia de ativação é a energia que uma molécula deve ter para participar na reação. Por outras palavras, a energia de ativação é uma medida do efeito que a temperatura tem sobre a reação (Reliasoft Corporation, 2015).

Assumindo que a vida é inversamente proporcional à taxa do processo até à falha, a Equação (3.1) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$L = C_{Arrhenius} \cdot e^{\frac{B_{Arrhenius}}{V}} \quad (3.2)$$

Em que L representa uma medida de vida quantificável (vida média, vida característica, $B(x)$ *life* ou outra), $C_{Arrhenius}$ e $B_{Arrhenius}$ são parâmetros do modelo que são determinados a partir dos dados de vida e $C_{Arrhenius}$ possui um valor sempre maior que zero ($C_{Arrhenius} > 0$). A variável V representa o nível de solicitação da variável de aceleração, para este modelo representa valores de temperatura ou temperatura absoluta em *Kelvin* ou graus *Rankine*.

Dependendo da aplicação a constante $B_{Arrhenius}$ pode ser representada pela seguinte Equação (3.3).

$$B_{Arrhenius} = -\frac{E_A}{k_B} \quad (3.3)$$

Quando a energia de ativação não é conhecida, a variável $B_{Arrhenius}$ deve ser tratada como um parâmetro do modelo. A variável $B_{Arrhenius}$ tem as mesmas propriedades que a energia de ativação. Isto é, $B_{Arrhenius}$ representa o efeito que a solicitação (neste caso a temperatura) tem sobre a vida de um bem, quanto maior o seu valor, maior é a influência da temperatura na vida de um bem. Quando este parâmetro toma valores negativos, significa que a vida média aumenta com o aumento da solicitação.

A vida dos componentes referente à temperatura de utilização (L_U) e à temperatura do ensaio acelerado (L_A) são dadas pela Equação (3.4) e pela Equação (3.5), respectivamente.

$$L_U = C_{Arrhenius} \cdot e^{\frac{E_A}{k_B \cdot V_U}} \quad (3.4)$$

$$L_A = C_{Arrhenius} \cdot e^{\frac{E_A}{k_B \cdot V_A}} \quad (3.5)$$

No qual V_U representa o nível de sollicitação da variável de aceleração para as condições de normal operação, neste caso representa a temperatura de operação e V_A representa o nível de sollicitação da variável de aceleração para as condições do teste acelerado, neste caso representa a temperatura do ensaio acelerado.

Consequentemente a razão entre a vida em condições normais e a vida em condições aceleradas representa o fator de aceleração (A_F). O fator de aceleração representa a rapidez com que o componente falha sob um nível de sollicitação mais elevado (ou acelerado) quando comparado com o seu nível de sollicitação em condições normais de uso e é dado por:

$$A_F = \frac{L_U}{L_A} = \frac{C_{Arrhenius} \cdot e^{\frac{E_A}{k_B \cdot V_U}}}{C_{Arrhenius} \cdot e^{\frac{E_A}{k_B \cdot V_A}}} = e^{\frac{E_A}{k_B} \left(\frac{1}{V_U} - \frac{1}{V_A} \right)} \quad (3.6)$$

Utilizando a Equação (3.6) e resolvendo em ordem a L_U obtém-se a expressão da vida útil para condições normais de utilização do componente em função do fator de aceleração e da vida útil do componente do teste acelerado, como representado na Equação (3.7).

$$L_U = L_A \cdot e^{\frac{E_A}{k_B} \left(\frac{1}{V_U} - \frac{1}{V_A} \right)} \quad (3.7)$$

Para cada tipo de dados existe uma distribuição de vida que melhor se ajusta aos mesmos, pelo que existem diferentes medições de Fiabilidade para as diferentes distribuições. Nas seguintes secções será apresentado a combinação do presente modelo com as respetivas distribuições estatísticas.

3.4.1.1. Relação Arrhenius-Weibull

Quando a distribuição de vida subjacente ao modelo de *Arrhenius* é a distribuição de *Weibull*, considera-se que a variável L é igual ao parâmetro de forma ou vida característica (η), ou seja:

$$L = \eta \quad (3.8)$$

Tendo em conta a afirmação da Equação (3.8), a função densidade de probabilidade de falha para o modelo de *Arrhenius* quando associado à relação de *Weibull* bi-paramétrica expressa-se matematicamente pela Equação (3.9).

$$f(t; V) = \frac{\beta}{C_{Arrhenius} \cdot e^{\frac{B_{Arrhenius}}{V}}} \cdot \left(\frac{t}{C_{Arrhenius} \cdot e^{\frac{B_{Arrhenius}}{V}}} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{C_{Arrhenius} \cdot e^{\frac{B_{Arrhenius}}{V}}} \right)^{\beta}} \quad (3.9)$$

A função Fiabilidade para a relação *Arrhenius-Weibull* é dada pela Equação (3.10).

$$R(t; V) = e^{-\left(\frac{t}{C_{Arrhenius} \cdot e^{\frac{B_{Arrhenius}}{V}}} \right)^{\beta}} \quad (3.10)$$

Se o parâmetro $B_{Arrhenius}$ for positivo, a fiabilidade aumenta à medida que a solicitação diminui.

A taxa de avarias é dada pela seguinte expressão:

$$\begin{aligned}\lambda(t; V) &= \frac{f(t; V)}{R(t; V)} \\ &= \frac{\beta}{C_{Arrhenius} \cdot e^{\frac{B_{Arrhenius}}{V}}} \cdot \\ &\quad \cdot \left(\frac{t}{C_{Arrhenius} \cdot e^{\frac{B_{Arrhenius}}{V}}} \right)^{\beta-1}\end{aligned}\quad (3.11)$$

3.4.1.2. Relação Arrhenius-Exponencial

Quando a distribuição de vida subjacente ao modelo de *Arrhenius* é a distribuição Exponencial, considera-se que L representa o tempo médio entre avarias ($L=MTBF$), ou seja:

$$L = MTBF \quad (3.12)$$

Tendo em conta este pressuposto a função densidade de probabilidade de falha exprime-se matematicamente pela Equação (3.13).

$$\begin{aligned}f(t; V) &= \frac{1}{C_{Arrhenius} \cdot e^{\frac{B_{Arrhenius}}{V}}} \\ &\quad \cdot \frac{t}{C_{Arrhenius} \cdot e^{\frac{B_{Arrhenius}}{V}}}\end{aligned}\quad (3.13)$$

A função de Fiabilidade para a relação *Arrhenius*-Exponencial é dada pela Equação (3.14).

$$R(t; V) = e^{-\frac{t}{C_{Arrhenius} \cdot e^{\frac{B_{Arrhenius}}{V}}}} \quad (3.14)$$

3.4.1.3. Relação Arrhenius-Lognormal

Quando a distribuição de vida subjacente ao modelo de *Arrhenius* é a distribuição Lognormal, considera-se que L representa o valor médio dos logaritmos naturais (μ'), isto é:

$$L = \mu' \Leftrightarrow \quad (3.15)$$

$$\Leftrightarrow \mu' = C_{Arrhenius} \cdot e^{\frac{B_{Arrhenius}}{V}}$$

Também pode ser escrito por:

$$e^{\mu'} = C_{Arrhenius} \cdot e^{\frac{B_{Arrhenius}}{V}} \quad (3.16)$$

Aplicando o logaritmo natural à Equação (3.16) obtém-se a seguinte expressão:

$$\mu' = -\ln(C_{Arrhenius}) + \frac{B_{Arrhenius}}{V} \quad (3.17)$$

Pelo que a função densidade de probabilidade para a relação *Arrhenius-Lognormal* exprime-se pela Equação (3.18).

$$f(t; V) = \frac{1}{t \cdot \sigma' \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t' - \ln(C_{Arrhenius}) + \frac{B_{Arrhenius}}{V}}{\sigma'} \right)^2} \quad (3.18)$$

A função Fiabilidade para a mesma relação é dada por:

$$R(t, V) = \int_{t'}^{\infty} \frac{1}{t \cdot \sigma' \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t' - \ln(C_{Arrhenius}) + \frac{B_{Arrhenius}}{V}}{\sigma'} \right)^2} dt \quad (3.19)$$

3.4.2. Modelo de *Eyring*

O modelo de *Eyring* foi formulado pelos princípios da mecânica quântica e é utilizado quando a variável do ensaio acelerado de vida é a temperatura, embora também possa ser aplicado para outras variáveis, tal como a humidade. Este modelo é menos utilizado do que o modelo descrito na Secção 3.4.1, mas é mais completo (Pallerosi, 2007).

O modelo de *Eyring* correlaciona a vida L do componente em função do nível de solicitação (geralmente a temperatura) aplicado.

A relação de *Eyring* é dada pela seguinte expressão:

$$L = \frac{1}{V} \cdot e^{-\left(A_{Eyring} - \frac{B_{Eyring}}{V}\right)} \quad (3.20)$$

As variáveis A_{Eyring} e B_{Eyring} são parâmetros determinados a partir dos dados dos testes acelerados de vida, onde A_{Eyring} é designado por um fator de posição, referindo-se principalmente ao processo de degradação, às condições de teste, geometrias e dimensões do componente a ensaiar e o parâmetro B_{Eyring} representa um fator de solitação que se refere principalmente à temperatura (Pallerosi, 2007). A variável V representa o nível de solitação, neste caso representa a temperatura absoluta do teste em grau *Kelvin* ($^{\circ}K$) ou em graus *Rankine* ($^{\circ}Ra$).

Como referido anteriormente o modelo de *Eyring* é semelhante à relação de *Arrhenius*, esta semelhança é mais evidente se o modelo de *Eyring* for rescrito da seguinte forma:

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{V} \cdot e^{-\left(A_{Eyring} - \frac{B_{Eyring}}{V}\right)} = \frac{e^{-A_{Eyring}}}{V} \cdot e^{\frac{B_{Eyring}}{V}} \\ &= \frac{1}{V} \cdot Const. \cdot e^{\frac{B_{Eyring}}{V}} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Comparando a Equação (3.21) com a relação de *Arrhenius* (Equação (3.2)), verifica-se que a diferença entre as duas relações é o termo $\frac{1}{V}$, pelo que produzem resultados muito semelhantes.

A vida de um bem quando sujeito à solitação do ensaio acelerado, neste caso à temperatura do teste acelerado de vida (V_A), exprime-se matematicamente pela Equação (3.22).

$$L_A = \frac{1}{V_A} \cdot e^{-\left(A_{Eyring} - \frac{B_{Eyring}}{V_A}\right)} \quad (3.22)$$

O mesmo acontece para a temperatura a condições normais de utilização (V_U), que é dada pela Equação (3.23).

$$L_U = \frac{1}{V_U} \cdot e^{-\left(A_{Eyring} - \frac{B_{Eyring}}{V_U}\right)} \quad (3.23)$$

O fator de aceleração para o modelo de *Eyring* é dado pelo quociente entre a vida de um bem em condições normais de utilização e a vida de um bem em condições aceleradas e é representado pela seguinte expressão:

$$A_F = \frac{L_U}{L_A} = \frac{V_A}{V_U} \cdot e^{B_{Eyring} \cdot \left(\frac{1}{V_U} - \frac{1}{V_A}\right)} \quad (3.24)$$

Resolvendo a Equação (3.24) em ordem a L_U obtém-se a vida de um bem em condições normais de utilização em função da variável de solicitação acelerada (V_A), variável em condições normais de utilização (V_U), da vida em condições aceleradas (L_A) e do parâmetro B_{Eyring} , como descrito na Equação (3.25).

$$L_U = L_A \cdot \frac{V_A}{V_U} \cdot e^{B_{Eyring} \cdot \left(\frac{1}{V_U} - \frac{1}{V_A}\right)} \quad (3.25)$$

Para cada tipo de dados existe uma distribuição de vida que melhor se ajusta aos mesmos, pelo que existem diferentes medições de Fiabilidade para as diferentes distribuições. Nas seguintes secções será apresentado a combinação do presente modelo com as respetivas distribuições estatísticas.

3.4.2.1. Relação Eyring-Weibull

Tal como referido no modelo de *Arrhenius*, o mesmo acontece para o modelo de *Eyring*, quando a distribuição de vida subjacente dos dados é a distribuição de *Weibull*, o parâmetro de escala ou vida característica (η) é igual à vida do bem descrita por L . A função densidade de probabilidade para a relação *Eyring-Weibull* é obtida tendo em conta que:

$$L = \eta \Leftrightarrow \eta = \frac{1}{V} \cdot e^{-\left(A_{Eyring} - \frac{B_{Eyring}}{V}\right)} \quad (3.26)$$

Substituindo a Equação (3.26) na função densidade de probabilidade de falha de *Weibull* (Equação (2.11)) obtém-se a $f(t)$ para a relação *Eyring-Weibull* (Equação (3.27)).

$$\begin{aligned}
f(t; V) &= \beta \cdot V \cdot e^{\left(A_{Eyring} - \frac{B_{Eyring}}{V}\right)} \\
&\cdot \left(t \cdot V \cdot e^{\left(A_{Eyring} - \frac{B_{Eyring}}{V}\right)}\right)^{\beta-1} \\
&\cdot e^{-\left(t \cdot V \cdot e^{\left(A_{Eyring} - \frac{B_{Eyring}}{V}\right)}\right)^\beta}
\end{aligned} \tag{3.27}$$

A função Fiabilidade para o modelo de *Eyring* segundo a distribuição de *Weibull* é dada por:

$$R(t; V) = e^{\left[-t \cdot V \cdot e^{\left(A_{Eyring} - \frac{B_{Eyring}}{V}\right)}\right]^\beta} \tag{3.28}$$

A taxa de avarias para a relação *Eyring-Weibull* é dada pela Equação (3.29).

$$\lambda(t; V) = \frac{f(t; V)}{R(t; V)} = \beta \cdot \left(t \cdot V \cdot e^{\left(A_{Eyring} - \frac{B_{Eyring}}{V}\right)}\right)^{\beta-1} \tag{3.29}$$

3.4.2.2. Relação *Eyring-Exponencial*

O modelo de *Eyring* estima a taxa de degradação dos componentes em função da solicitação de teste, quando a distribuição de vida subjacente dos dados é a Exponencial considera-se que MTBF é inversamente proporcional à taxa de avarias como referido na Equação (2.23).

Relacionando a Equação (3.20) e a Equação (2.24), obtém-se a função densidade de probabilidade para o modelo de *Eyring*, expressando-se matematicamente pela Equação (3.30).

$$\begin{aligned}
f(t; V) &= V \cdot e^{\left(A_{Eyring} - \frac{B_{Eyring}}{V}\right)} \\
&\cdot e^{\left[-t \cdot V \cdot e^{\left(A_{Eyring} - \frac{B_{Eyring}}{V}\right)}\right]}
\end{aligned} \tag{3.30}$$

A Fiabilidade para a relação *Eyring-Exponencial* pode ser dada por:

$$R(t;V) = \int_T^{\infty} f(t;V) dt = e^{\left[-t \cdot V \cdot e^{\left(A_{Eyring} - \frac{B_{Eyring}}{V} \right)} \right]} \quad (3.31)$$

3.4.2.3. Relação Eyring-Lognormal

Quando a distribuição de vida subjacente aos dados é a Lognormal, considera-se que L é a média dos logaritmos naturais (μ'). A função densidade de probabilidade para o modelo de *Eyring* para a distribuição Lognormal considera o seguinte pressuposto:

$$L = \mu' \Leftrightarrow \mu' = \frac{1}{V} \cdot e^{-\left(A_{Eyring} - \frac{B_{Eyring}}{V} \right)} \quad (3.32)$$

Que também pode ser escrito como:

$$e^{\mu'} = \frac{1}{V} \cdot e^{-\left(A_{Eyring} - \frac{B_{Eyring}}{V} \right)} \quad (3.33)$$

Aplicando o logaritmo natural à Equação (3.33), obtém-se a Equação (3.34).

$$\mu' = -\ln(V) - A + \frac{B}{V} \quad (3.34)$$

Substituindo a Equação (3.34) na função densidade de probabilidade Lognormal (Equação (2.27)) obtém-se a expressão da função $f(t)$ para a combinação do modelo de *Eyring* com a distribuição Lognormal (Equação (3.35)).

$$f(t,V) = \frac{1}{t \cdot \sigma' \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t' + \ln(V) + A - \frac{B}{V}}{\sigma'} \right)^2} \quad (3.35)$$

A função Fiabilidade para o modelo de *Eyring* segundo a distribuição Lognormal exprime-se pela Equação (3.36).

$$R(t,V) = \int_{t'}^{\infty} \frac{1}{t \cdot \sigma' \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t' + \ln(V) + A - \frac{B}{V}}{\sigma'} \right)^2} dt \quad (3.36)$$

3.4.3. Modelo da Lei da Potência Inversa

O modelo da Lei da Potência Inversa é amplamente utilizado para analisar dados de ensaios acelerados de vida de fluidos isolantes, condensadores, rolamentos, fusos e muitos componentes mecânicos ou eletrônicos. Têm o objetivo de estimar as suas vidas em condições normais de utilização quando os parâmetros de aceleração são não térmicos (por exemplo, velocidade, carga, meio corrosivo, vibração, tensões mecânicas ou elétricas, pressões, choques, entre outros) (Zhang and Chuckpaiwong, 2002)(Pallerosi, 2007).

A medida de vida quantificável para este modelo é dada pela Equação (3.37).

$$L = \frac{1}{K_{LPT} \cdot V^{n_{LPT}}} \quad (3.37)$$

Onde V representa a variável de aceleração, para o modelo da Lei da Potência Inversa representa uma sollicitação não térmica do teste acelerado de vida. Os parâmetros K_{LPT} e n_{LPT} são positivos e característicos do componente e do método de teste utilizado.

O parâmetro n_{LPT} representa o efeito das sollicitações na vida de um bem. Quanto maior for o seu valor maior será o efeito da sollicitação na vida. Quando o valor de n_{LPT} se aproxima de zero indica que apenas existe um pequeno efeito das sollicitações na vida de um determinado bem.

Os parâmetros de *Weibull* nas condições do teste acelerado de vida podem ser encontrados usando métodos de estimativa tais como, mínimos quadrados ou máxima verossimilhança (Reliasoft Corporation, 2015) (Kececioglu, 2002b) (Zhang and Chuckpaiwong, 2002).

A vida característica para as condições do ensaio acelerado (V_A), são dadas pela seguinte equação:

$$L_A = \frac{1}{K_{LPT} \cdot (V_A)^{n_{LPT}}} \quad (3.38)$$

A vida característica em condições normais de utilização (V_U), é descrita matematicamente pela Equação (3.39).

$$L_U = \frac{1}{K_{LPT} \cdot (V_U)^{n_{LPT}}} \quad (3.39)$$

O fator de aceleração para o modelo da Lei da Potência Inversa, exprime-se matematicamente pela Equação (3.40).

$$A_F = \frac{L_U}{L_A} = \left(\frac{V_A}{V_U} \right)^{n_{LPT}} \quad (3.40)$$

Resolvendo a Equação (3.40) em ordem L_U é possível obter a Equação (3.41), onde é possível obter a vida característica em condições normais de operação.

$$L_U = L_A \cdot \left(\frac{V_A}{V_U} \right)^{n_{LPT}} \quad (3.41)$$

Para cada tipo de dados existe uma distribuição de vida que melhor se ajusta aos mesmos, pelo que existem diferentes medições de Fiabilidade para as diferentes distribuições. Nas seguintes secções será apresentado a combinação do presente modelo com as respetivas distribuições estatísticas.

3.4.3.1. Relação Lei da Potência Inversa-Weibull

Tal como nos modelos anteriormente descritos, o mesmo acontece para o modelo da Lei da Potência Inversa. Quando a distribuição de vida subjacente ao modelo da Lei da Potência Inversa é a distribuição de *Weibull*, o parâmetro de forma ou vida característica (η) é considerado igual a L .

Pelo que a função densidade de probabilidade de falha para a relação do modelo da Lei da Potência Inversa com a distribuição de *Weibull* bi-paramétrica é dada pela seguinte expressão:

$$f(t; V) = \beta \cdot K_{LPT} \cdot V^{n_{LPT}} \cdot (t \cdot K_{LPT} \cdot V^{n_{LPT}})^{\beta-1} \cdot e^{-(t \cdot K_{LPT} \cdot V^{n_{LPT}})^\beta} \quad (3.42)$$

A função Fiabilidade para a relação Lei da Potência Inversa-*Weibull* é representado pela Equação (3.43).

$$R(t; V) = e^{-(t \cdot K_{LPT} \cdot V^{n_{LPT}})^{\beta}} \quad (3.43)$$

A taxa de avarias é dada pela seguinte expressão:

$$\begin{aligned} \lambda(t; V) &= \frac{f(t; V)}{R(t; V)} \\ &= \beta \cdot K_{LPT} \cdot V^{n_{LPT}} \cdot (K_{LPT} \cdot V^{n_{LPT}} \cdot t)^{\beta-1} \end{aligned} \quad (3.44)$$

A taxa de avarias para as condições do teste acelerado (λ_A) e para as condições normais de operação (λ_U) são representadas pela Equação (3.45) e pela Equação (3.46), respetivamente.

$$\lambda_A = \beta \cdot K_{LPT} \cdot (V_A)^{n_{LPT}} \cdot (K_{LPT} \cdot (V_A)^{n_{LPT}} \cdot t)^{\beta-1} \quad (3.45)$$

$$\lambda_U = \beta \cdot K_{LPT} \cdot (V_U)^{n_{LPT}} \cdot (K_{LPT} \cdot (V_U)^{n_{LPT}} \cdot t)^{\beta-1} \quad (3.46)$$

Realizando o quociente entre a Equação (3.45) e a Equação (3.46) e resolvendo em ordem a λ_U é possível obter de outra forma a taxa de avarias para condições normais de utilização, como representado na Equação (3.47).

$$\lambda_U = \lambda_A \cdot \left(\frac{V_U}{V_A}\right)^n \cdot \left[\left(\frac{V_U}{V_A}\right)^n \cdot \left(\frac{T_U}{T_A}\right)\right]^{\beta-1} \quad (3.47)$$

3.4.3.2. Relação Lei da Potência Inversa-Exponencial

Quando a distribuição de vida subjacente ao modelo da Lei da Potência Inversa é a distribuição Exponencial, considera-se que L representa o tempo médio entre avarias ($L=MTBF$). Pelo que a função densidade de probabilidade de falha é dada pela Equação (3.48).

$$f(t, V) = K_{LPT} \cdot V^{n_{LPT}} \cdot e^{-t \cdot K_{LPT} \cdot V^{n_{LPT}}} \quad (3.48)$$

A função de Fiabilidade para esta relação expressa-se matematicamente pela Equação (3.49).

$$R(t, V) = e^{-t \cdot K_{LPT} \cdot V^{n_{LPT}}} \quad (3.49)$$

3.4.3.3. Relação Lei da Potência Inversa-Lognormal

Quando a distribuição de vida subjacente ao modelo da Lei da Potência Inversa é a distribuição Lognormal, considera-se que L representa o valor médio dos logaritmos naturais (μ'), como apresentado na Equação (3.50).

$$L = \mu' \Leftrightarrow \mu' = \frac{1}{K_{LPT} \cdot V^{n_{LPT}}} \quad (3.50)$$

Esta relação também pode ser escrita da seguinte forma:

$$e^{\mu'} = \frac{1}{K_{LPT} \cdot V^{n_{LPT}}} \quad (3.51)$$

Aplicando o logaritmo natural à Equação(3.51) obtém-se a seguinte expressão:

$$\mu' = -\ln(K_{LPT}) - n \cdot \ln(V) \quad (3.52)$$

Pelo que a função densidade de probabilidade para esta situação exprime-se matematicamente pela Equação (3.53).

$$f(t, V) = \frac{1}{t \cdot \sigma' \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t' + \ln(K_{LPT}) + n \cdot \ln(V)}{\sigma'} \right)^2} \quad (3.53)$$

A função Fiabilidade é dada pela Equação (3.54)-

$$R(t, V) = \int_{t'}^{\infty} \frac{1}{t \cdot \sigma' \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t' + \ln(K_{LPT}) + n \cdot \ln(V)}{\sigma'} \right)^2} dt \quad (3.54)$$

3.4.4. Modelo Térmico Não-Térmico (TNT)

O modelo Térmico Não-Térmico (TNT) utiliza duas diferentes variáveis de solicitação, nomeadamente a temperatura e uma variável não térmica. Este modelo resulta da combinação da relação de *Arrhenius* e da Lei da Potência Inversa, e expressa-se matematicamente pela Equação (3.55).

$$L = \frac{C_{TNT}}{U^{n_{TNT}} \cdot e^{-\frac{B_{TNT}}{V}}} \quad (3.55)$$

A medida de vida quantificável (L) é função das variáveis U , B_{TNT} , n_{TNT} , C_{TNT} e V . A variável U representa o nível de solicitação da variável de aceleração não térmica como a tensão, vibração entre outras. A variável V , para este modelo, representa a temperatura absoluta, as restantes variáveis B_{TNT} , C_{TNT} e n_{TNT} são os parâmetros do modelo a serem determinados.

O modelo TNT pode ser linearizado e representado graficamente num gráfico vida *vs.* solicitação, isto é conseguido através do logaritmo natural de ambos os lados da relação TNT, como representado na Equação (3.56).

$$\ln(L) = \ln(C_{TNT}) - n_{TNT} \cdot \ln(U) + \frac{B_{TNT}}{V} \quad (3.56)$$

Neste caso a função depende de duas solicitações pelo que para obter o gráfico vida *vs.* solicitação é necessário manter uma das variáveis de solicitação constante, fazendo variar a outra. Quando a variável de solicitação não térmica é mantida constante, o modelo TNT linearizado exprime-se matematicamente pela Equação (3.57).

$$\ln(L) = \text{const.} + \frac{B_{TNT}}{V} \quad (3.57)$$

Da mesma forma, quando a variável de solicitação térmica é mantida constante o modelo TNT linearizada é descrita pela Equação (3.58).

$$\ln(L) = \text{const.} - n_{TNT} \cdot \ln(U) \quad (3.58)$$

Dependendo da variável de solicitação que é mantida constante, através da linearização do modelo TNT verifica-se que o parâmetro B_{TNT} ou n_{TNT} representam a inclinação da reta resultante. Se a solicitação que se mantém constante for a solicitação não térmica então, B_{TNT} é o declive da reta de vida no gráfico vida *vs.* temperatura. Quanto maior for o declive da reta, maior a dependência da vida do produto para a variável de solicitação. Ou seja, B_{TNT} é a variável que mede o efeito que a temperatura tem na vida de um bem e n_{TNT} representa a medida do efeito que a solicitação não térmica tem na vida de um

produto. Quanto maior o valor de B_{TNT} maior a dependência da vida de um bem pela temperatura. Da mesma forma, quanto maior o valor de n_{TNT} maior a dependência da vida pela solicitação não térmica.

O fator de aceleração para a relação TNT é dado pela Equação (3.59).

$$A_F = \frac{L_U}{L_A} = \frac{\frac{C}{U_U^{n_{TNT}}} e^{\frac{B_{TNT}}{V_U}}}{\frac{C}{U_A^{n_{TNT}}} e^{\frac{B_{TNT}}{V_A}}} = \left(\frac{U_A}{U_U}\right)^{n_{TNT}} e^{B_{TNT} \left(\frac{1}{V_U} - \frac{1}{V_A}\right)} \quad (3.59)$$

Em que L_U representa a vida útil nas condições de utilização, L_A a vida para solicitações aceleradas de vida, V_U representa a temperatura em condições normais de utilização, V_A representa a temperatura no nível acelerado de solicitação; U_A apresenta o nível não térmico acelerado e U_U a solicitação não térmica em condições normais de aceleração.

Para cada tipo de dados existe uma distribuição de vida que melhor se ajusta aos mesmos, pelo que existem diferentes medições de Fiabilidade para as diferentes distribuições. Nas seguintes secções será apresentado a combinação do presente modelo com as respetivas distribuições estatísticas.

3.4.4.1. Relação Térmico Não-Térmico-Weibull

Quando a distribuição de vida subjacente ao modelo da TNT é a distribuição de *Weibull*, o parâmetro de forma ou vida característica (η) é considerado igual a L .

A função densidade de probabilidade de falha para a relação do modelo TNT-*Weibull* é dada pela seguinte expressão:

$$f(t, U, V) = \frac{\beta \cdot U^{n_{TNT}} \cdot e^{-\frac{B_{TNT}}{V}}}{C_{TNT}} \cdot \left(\frac{t \cdot U^{n_{TNT}} \cdot e^{-\frac{B_{TNT}}{V}}}{C_{TNT}} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t \cdot U^{n_{TNT}} \cdot e^{-\frac{B_{TNT}}{V}}}{C_{TNT}} \right)^\beta} \quad (3.60)$$

A função Fiabilidade para esta relação é conseguida através da Equação (3.61).

$$R(t, U, V) = e^{-\left(\frac{t \cdot U^{n_{TNT}} \cdot e^{-\frac{B_{TNT}}{V}}}{C_{TNT}} \right)^\beta} \quad (3.61)$$

3.4.4.2. Relação Térmico Não-Térmico-Exponencial

Quando a distribuição de vida subjacente ao modelo da TNT é a distribuição Exponencial, considera-se que L representa o tempo médio entre avarias ($L=MTBF$). Pelo que a função densidade de probabilidade de falha é dada pela seguinte expressão:

$$f(t, U, V) = \frac{U^{n_{TNT}}}{C_{TNT}} \cdot e^{-\frac{B_{TNT}}{V}} \cdot e^{\frac{U^{n_{TNT}}}{C_{TNT}} \left(e^{-\frac{B_{TNT}}{V}} \right) \cdot t} \quad (3.62)$$

A função Fiabilidade para a relação do modelo da TNT-Exponencial é dado pela Equação (3.63).

$$R(t, U, V) = e^{-\frac{t \cdot U^{n_{TNT}} \cdot e^{-\frac{B_{TNT}}{V}}}{C_{TNT}}} \quad (3.63)$$

3.4.4.3. Relação Térmico Não-Térmico-Lognormal

O modelo da TNT quando combinado com a distribuição Lognormal, tal como nos modelos descritos anteriormente, considera-se que L representa o valor médio dos logaritmos naturais (μ'), como na Equação (3.64).

$$L = \mu' \Leftrightarrow \mu' = \frac{C_{TNT}}{U^{n_{TNT}} \cdot e^{-\frac{B_{TNT}}{V}}} \quad (3.64)$$

Também pode ser escrito pela Equação (3.65).

$$e^{\mu'} = \frac{C_{TNT}}{U^{n_{TNT}} \cdot e^{-\frac{B_{TNT}}{V}}} \quad (3.65)$$

Aplicando o logaritmo natural à Equação (3.65) obtém-se a seguinte expressão:

$$\mu' = \ln(C_{TNT}) - n \cdot \ln(U) + \frac{B_{TNT}}{V} \quad (3.66)$$

A função densidade de probabilidade de falha é obtida pela seguinte expressão:

$$f(t, U, V) = \frac{1}{t \cdot \sigma' \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t' - \ln(C_{TNT}) + n \cdot \ln(U) + \frac{B_{TNT}}{V}}{\sigma'} \right)^2} \quad (3.67)$$

A função Fiabilidade é descrita matematicamente pela Equação (3.68).

$$R(t, U, V) = \int_{t'}^{\infty} \frac{1}{t \cdot \sigma' \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t' - \ln(C_{TNT}) + n \cdot \ln(U) + \frac{B_{TNT}}{V}}{\sigma'} \right)^2} dt \quad (3.68)$$

3.5. Metodologia dos Ensaio Acelerados de Vida

Com a realização dos ensaios acelerados de vida obtém-se tempos até à falha do componente em análise em condições aceleradas. Não se pretende obter previsões nem estimativas de um nível particular de elevadas solicitações, mas sim obter estas medidas noutros níveis de solicitações, tal como o nível de solicitação para condições normais de utilização.

O procedimento para realizar uma análise de dados de vida recolhidos a partir de ensaios acelerados de vida, é o seguinte:

1. Selecionar a distribuição de vida mais adequada;
2. Selecionar a relação vida-solicitação (modelos matemáticos) mais adequada;
3. Estimar parâmetros;
4. Extrair informações de Fiabilidade no nível desejado.

Para conseguir realizar previsões fiabilísticas do componente em tais condições é necessário utilizar uma distribuição estatística (*Weibull*, Exponencial, Lognormal ou outra) que descreva da forma mais adequada os tempos até à falha obtidos nos ensaios acelerados de vida, pois o principal objetivo é adquirir informação fiabilística para diferentes níveis de solicitação, mais especificamente o nível de normal utilização. Para atingir este objetivo, é necessário desenvolver um método para percorrer o caminho entre a função densidade de probabilidade de falha em condições aceleradas para extrapolar a função densidade de probabilidade de falha em condições normais de utilização.

Se a função densidade de probabilidade de falha fosse descrita por um ponto existiriam infinitas formas de percorrer o caminho entre o ponto acelerado para o ponto em condições normais de utilização (Figura 8).



Figura 8 - Percurso entre a $f(x)$ acelerada para a $f(x)$ em uso normal (adaptado de (Reliasoft Corporation, 2015))

Mesmo que exista um modelo ou função para realizar o percurso entre os dois pontos, continuam a existir diversas formas de ligar os dois pontos, pelo que é necessário obter mais pontos, ou seja, obter uma função de densidade de probabilidade para outro nível de solicitação. É necessário no mínimo dois pontos

obtidos a diferentes níveis de solicitação para conseguir mapear a função de forma a obter resultados para as condições normais de utilização (Figura 9).

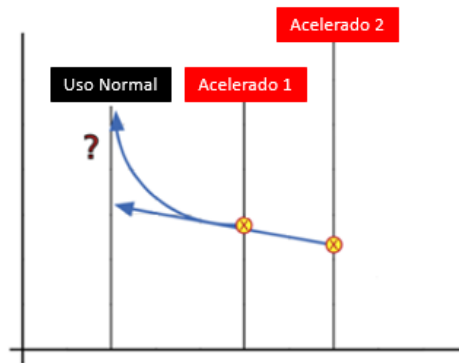


Figura 9 - Percurso entre a $f(x)$ acelerada para a $f(x)$ em uso normal, com dois pontos (adaptado de (Reliasoft Corporation, 2015))

O primeiro passo na realização de uma análise de dados de um ensaio acelerado de vida é a escolha de uma distribuição de vida que melhor se adapte aos dados obtidos através dos ensaios acelerados de vida. Através da distribuição mais adequada, é necessário determinar a característica de vida, ou seja, os parâmetros da distribuição estatística dos diferentes níveis de solicitações, como a média, mediana, $R(x)$, $F(x)$, entre outros. Dependendo da distribuição de vida subjacente assumida, diferentes características de vida são consideradas.

O passo seguinte passa pela seleção do modelo matemático (modelo de *Eyring*, *Arrhenius*, entre outros) que mais se adequa à variável de aceleração aplicada no ensaio acelerado de vida e determinação dos parâmetros do modelo selecionado.

Após a seleção da distribuição de vida e do modelo matemático mais apropriado, é necessário selecionar um método para realizar a estimativa dos parâmetros. Os métodos disponíveis para estimar os parâmetros de um modelo incluem o método gráfico, o método dos mínimos quadrados e o método de estimativa da máxima verossimilhança (Reliasoft Corporation, 2015)(Escobar and Meeker, 2007).

3.6. Dados e Tipos de Dados

Os modelos estatísticos dependem extensivamente dos dados para fazer previsões. Na análise dos dados de vida, os modelos são as distribuições estatísticas e os dados são dados de vida ou dados de tempo até à falha do bem em estudo. No caso da análise dos dados de vida acelerada, os modelos são as relações de vida-solicitação e os dados são os dados de tempo até à falha num nível de solicitação específico. A precisão de qualquer previsão é diretamente proporcional à qualidade, exatidão e completude dos dados fornecidos. Dados bons, juntamente com a escolha do modelo adequado, normalmente resulta em boas previsões.

Na análise dos dados de vida, por vezes, existe a necessidade de utilizar todos os conjuntos de dados disponíveis mesmo que sejam incompletos ou incluam incerteza quanto à ocorrência da falha. Mas, os dados ditos não favoráveis ou insuficientes poderão resultar em más previsões de vida, pelo que é necessário separar os dados de vida em dois tipos: dados completos e em dados censurados.

3.6.1. Dados Completos

Dados completos são aqueles que o valor de cada unidade de amostra é observado ou conhecido. Dados completos são aqueles que apresentam os tempos até à falha de todas as unidades da amostra em análise. Por exemplo, ao testar cinco unidades e todas falhassem (e os tempos de falha fossem registados), teríamos então informações completas sobre o tempo de cada falha da amostra.

3.6.2. Dados Censurados

Em muitos casos, nem todas as unidades da amostra falham (ou seja, o evento de interesse não foi observado) ou os tempos exatos de falha de todas as unidades não são conhecidos. Esse tipo de dados é comumente chamado de dados censurados. Existem três tipos de esquemas de censura possíveis, censurados à direita (também chamados dados suspensos), censurados por intervalo e censurados à esquerda.

3.6.2.1. *Dados censurados à direita (suspensão)*

Este é o caso mais comum de dados censurados. No caso de dados de vida, estes conjuntos de dados são compostos por unidades que não falharam. Por exemplo, se testássemos cinco unidades e apenas três falhassem no final do teste, teríamos dados censurados à direita (ou dados de suspensão) referente às duas unidades que não falharam. O termo censurado à direita implica que o evento de interesse (isto é, o tempo até a falha) está à direita do ponto de dados. Ou seja, se as unidades continuassem a operar, a falha ocorreria em algum momento da escala de tempo.

3.6.2.2. *Dados censurados por intervalo*

Os dados censurados por intervalo refletem a incerteza quanto aos tempos exatos em que os componentes falharam dentro de um intervalo. Este tipo de dados obtém-se frequentemente de testes ou situações em que os componentes sujeitos aos ensaios acelerados de vida não são constantemente monitorizados. Se apenas forem inspecionados os componentes num intervalo de tempo só é conhecido que o componente falhou ou não falhou entre as inspeções, não é possível ter a certeza do tempo exato em que ocorreu a falha do componente. Este tipo de dados censurados também é chamado de dados de inspeção por alguns autores.

Geralmente, é recomendado evitar dados censurados por intervalos pois estes apresentam menos informação quando comparados com os dados completos. No entanto, há casos em que os dados de intervalo são inevitáveis devido à natureza do produto, ao teste e ao equipamento de teste. Nesses casos, deve-se ter em atenção os intervalos de inspeção, pois devem ser suficientemente curtos para observar as falhas. Se o intervalo de inspeção for muito longo e num caso extremo todas as unidades do teste falharam dentro desse intervalo, não será possível obter a distribuição de falhas para os produtos.

No caso dos ensaios de vida acelerada, o conjunto de dados afeta a exatidão da distribuição de vida ajustada e, subsequentemente, a extrapolação dos modelos matemáticos. Neste caso, os intervalos de inspeção devem ser escolhidos de acordo com o fator de aceleração esperado em cada nível de solicitação e, portanto, esses intervalos serão de comprimentos diferentes para cada nível de solicitação.

3.6.2.3. *Dados censurados à esquerda*

O terceiro tipo de censura é semelhante aos dados censurados por intervalo. Os dados censurados à esquerda, apenas dão a informação de que a falha ocorreu antes de um determinado tempo, mas não exatamente quando. Isto é idêntico aos dados censurados por intervalo em que o tempo inicial do intervalo é zero (Reliasoft Corporation, 2015).

Capítulo 4

Materiais Compósitos e a Radiação Ultravioleta

Neste Capítulo serão discutidos os temas que servirão de suporte para a compreensão dos capítulos que procedem o mesmo. Este Capítulo irá servir como suporte para a plena percepção do caso de estudo que completa este projeto. O caso prático irá envolver a realização de ensaios acelerados de vida a materiais compósitos quando expostos à radiação ultravioleta. Inicialmente será apresentada a base teórica sobre os materiais compósitos, tal como os seus constituintes (matriz e fibra) e o seu processo de fabrico. Serão também expostos os conceitos básicos sobre a radiação UV, índice UV (IUV) e os seus perigos e benefícios. Após a compreensão destes dois temas, serão exibidos os efeitos que a radiação UV provoca nos polímeros mais propriamente nos materiais compósitos.

4.1. Materiais Compósitos

O material compósito é um material diferente dos materiais comuns heterogéneos. Estes materiais são utilizados desde a antiguidade, tal como a madeira e o *cob* (material de construção composto por areia, terra e palha) (Gay and Hoa, 2003). Atualmente os materiais compósitos são utilizados em aplicações onde se pretendem obter propriedades melhoradas do que aquelas conseguidas com materiais comuns heterogéneos.

De acordo com a norma ASTM D3878 (2015), os materiais compósitos são definidos por *“uma substância constituída por dois ou mais materiais, insolúveis um no outro, que são combinados para formar um material útil à engenharia, com propriedades mecânicas diferentes das suas fases constituintes”*.

De forma geral, os materiais compósitos são constituídos por dois materiais: um material de reforço designado por fibra e um material de base designado por matriz, estes dois materiais diferem na sua forma, composição química e nas suas

propriedades. A sua união proporciona um conjunto diferente das partes constituintes, mantendo a sua individualidade, ou seja, eles não se dissolvem ou fundem completamente um no outro, embora atuem em conjunto, formando um material com as melhores propriedades mecânicas dos seus constituintes do que os materiais convencionais (J.N.Reddy, 2004). O material resultante possui propriedades heterogêneas e anisotrópicas, ou seja, apresenta mais que uma fase e as suas propriedades mecânicas dependem da direção das fibras (Gay and Hoa, 2003).

A rigidez, a resistência mecânica, o baixo peso, a resistência à corrosão, as propriedades térmicas ajustáveis, a vida à fadiga e a resistência ao desgaste são algumas das propriedades que podem ser melhoradas através da formação de materiais compósitos.

Tendo em conta todas estas vantagens de utilização dos materiais compósitos, a sua aplicação tem crescido e tem abrangido diversas áreas como a aeronáutica, construção naval, automóvel e aplicações biomédicas, entre outras, tornando a sua aplicação vantajosa em relação aos materiais tradicionais (Adams and Advani, 2001).

É comum classificar estes materiais em dois níveis distintos. O primeiro nível diz respeito ao tipo de matriz (fase contínua) e o segundo nível ao reforço (fase descontínua). Dentro destes níveis, os materiais compósitos podem ser classificados segundo os subníveis apresentados na Figura 10 e na Figura 11 (Adams and Advani, 2001).

A fase contínua pode ser dividida em três grupos as matrizes orgânicas, matrizes metálicas e as matrizes cerâmicas, como esquematizado na Figura 10.

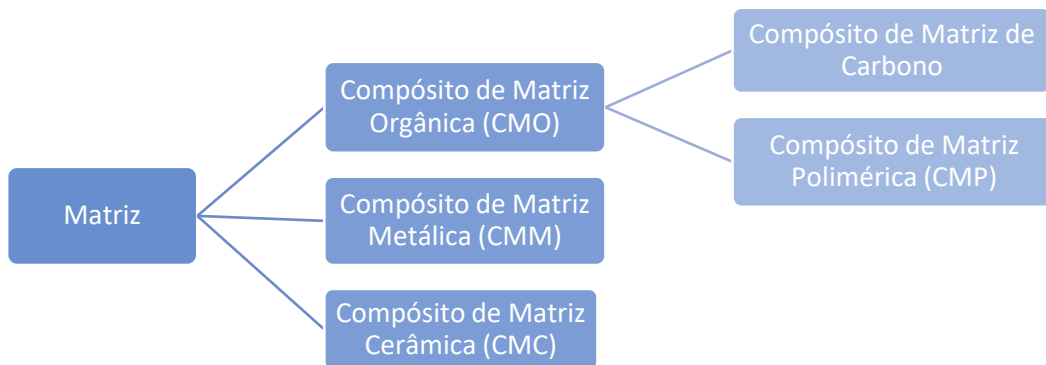


Figura 10 - Classificação do material compósito quanto ao tipo de matriz (adaptado (Adams and Advani, 2001)).

O reforço pode ser dividido em partículas, fibras ou estruturais. As fibras podem ser divididas em dois grupos, nomeadamente as fibras curtas e as fibras longas. As fibras estruturais dividem-se entre os laminados que são constituídos por diversas camadas de reforço empilhadas com diferentes ou iguais orientações, e a *sandwich* que é constituído por três camadas, duas lâminas finas separadas por uma camada de um material de baixa densidade (Allen, 1969).

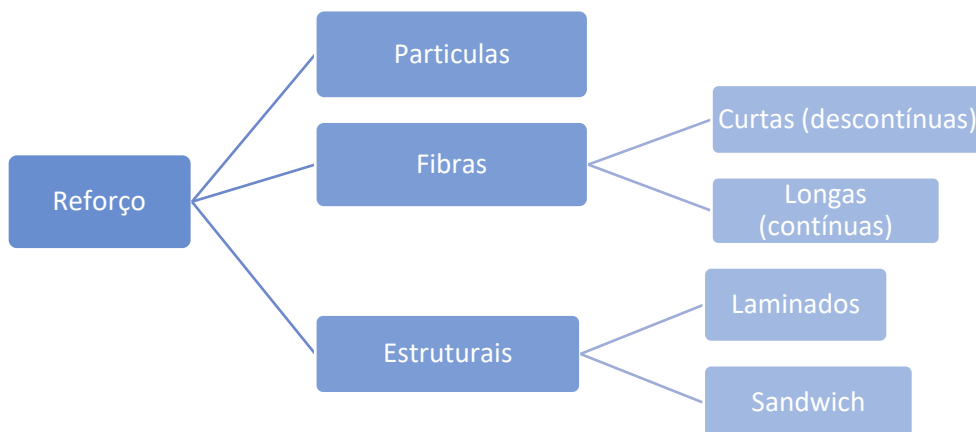


Figura 11 - Classificação do material compósito quanto ao tipo de reforço (adaptado de (Adams and Advani, 2001)).

O comportamento mecânico dos materiais compósitos é classificado de forma geral como linear elástico e, portanto, a sua curva tensão-deformação caracteriza-se por uma reta, tal como representado na Figura 12.

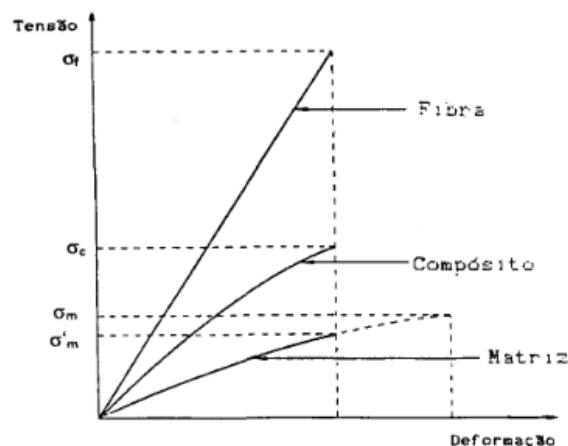


Figura 12 - Curva tensão-extensão materiais compósitos, matriz e fibra.

A Figura 12 ilustra uma curva típica de um material compósito, apresentando também as respectivas curvas da fibra e da matriz.

4.1.1. Reforço (Fibras)

A resistência mecânica e a tenacidade são algumas das propriedades que provêm das fibras, são estas que têm a função de suportar os carregamentos externos sobre os quais os materiais compósitos estão sujeitos. As fibras podem ser longas ou curtas, e são as curtas que exibem melhores propriedades de resistência e rigidez (J.N.Reddy, 2004). As fibras longas são mais adequadas para esforços no sentido em que as mesmas estão dispostas.

As principais fibras utilizadas são as seguintes:

- Fibra de vidro;
- Fibra de aramida (muito leve);
- Fibra de carbono (Alto módulo de elasticidade ou alta resistência);
- Fibra de boro (Alto módulo de elasticidade ou alta resistência);
- Fibra de carboneto de silício (Alta resistência à temperatura).

A orientação das fibras do compósito tem grande influência nas propriedades finais do mesmo, pelo que o reforço pode assumir as seguintes formas:

- Unidirecional;
- Bidirecional;
- Multidirecional.

4.1.2. Matriz

O material da matriz tem a função de manter as fibras unidas, atua como meio de transferência de carga entre as fibras e protege as fibras da exposição ao meio ambiente. É também responsável por dar forma às fibras conforme desejado, conferir o acabamento final bem como fornecer resistência mecânica ao material final. A matriz contribui de forma constante para as propriedades do material final, enquanto que as propriedades das fibras são dependentes da direção das mesmas (J.N.Reddy, 2004).

A natureza da matriz pode ser:

- Polimérica: Resinas termoplásticas (polipropileno, poliamida, polifenilenoossulfona, polieteretercetona, entre outras) e resinas termo endurecidas (poliésteres, fenólicos, melaminas, silicones, poliuretanos, *epoxy*, entre outras);
- Mineral: Carboneto de silício, carbono (podem ser utilizadas em altas temperaturas);
- Metálica: Ligas de alumínio, ligas de titânio, eutéticos orientados.

4.1.3. Processo de Fabrico

A ligação entre as fibras e a matriz é conseguida durante a fase de fabrico do material, pelo que, esta fase apresenta uma influência fundamental nas propriedades mecânicas do produto final (Gay and Hoa, 2003).

A resina e as fibras apenas se tornam num material compósito após a última fase de fabrico, ou seja, quando a matriz é endurecida. Após esta fase o material já não pode ser moldado ou modificado, ao contrário do que acontece com as ligas metálicas, em que é possível modifica-las através de tratamentos térmicos. No caso dos compósitos com matriz polimérica, durante o processo de solidificação, esta passa do estado líquido para o estado sólido (endurecimento) através de um agente que é misturado à resina (catalisador).

Os processos de fabrico devem ser realizados de forma cuidada visto que podem induzir danos durante o mesmo, tornando-se cruciais para o bom desempenho do produto final (Chaki and Harizi, 2015). Os processos de fabrico

divergem em diferentes fatores dos quais se destacam o custo, a facilidade de fabrico, o tamanho dos componentes que se pretende fabricar e a tecnologia dos equipamentos. Os processos mais comumente utilizados são os seguintes:

- Modelação manual ou por contacto (*Wet Hand Lay-up*);
- Modelação por compressão;
- Modelação por projeção (*Spray-Up*);
- Modelação por transferência de resina (*RTM*);
- Pultrusão;
- Modelação por revolução de componentes;
- Modelação por injeção;
- Enrolamento filamental.

O procedimento referente aos processos de modelação encontra-se ilustrado na Figura 13. Este procedimento é idêntico para todos os processos de fabrico por modelação, iniciando-se pela fase da impregnação do reforço com a resina seguindo-se a fase da compactação através de pressão, ocorrendo de seguida o início do processo de cura (polimerização) e por fim a desmoldagem da peça final e o seu acabamento.

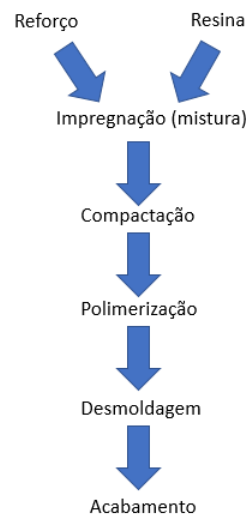


Figura 13 - Fluxograma do procedimento de modelação manual (adaptado de (Gay and Hoa, 2003)).

O molde pode ser constituído por diferentes materiais tal como metal, polímeros, madeira ou gesso.

No presente projeto apenas serão referidos os processos de fabrico por modelação manual e modelação por compressão, os quais se encontram detalhados de forma sintética nas seguintes secções.

4.1.3.1. Modelação manual ou por contacto (*Wet Hand Lay-up*)

O processo de modelação por contacto é o processo de fabrico que apresenta uma simples utilização e elevada versatilidade, pelo que é comumente utilizado para o fabrico de materiais compósitos.

Para este processo de fabrico apenas é utilizado um molde (quer seja fêmea ou macho). As camadas de fibra são impregnadas com resina e catalisador e são colocadas no molde (Figura 14). A compactação é feita usando um rolo para expelir as bolsas de ar do interior das camadas. Por fim, a cura ocorre à temperatura ambiente e a sua duração está dependente da quantidade de catalisador presente na mistura (resina e catalisador).

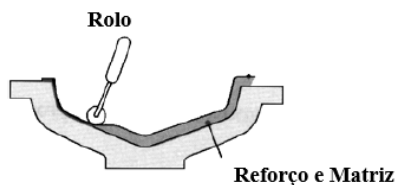


Figura 14 - Modelação manual ou por contacto (*Wet Hand Lay-up*) (adaptado de (Gay and Hoa, 2003)).

Para acelerar o processo de cura e melhorar o acabamento do produto final é possível realizar algumas alterações ao processo de fabrico. A utilização de um saco de vácuo após o *lay-up* favorece a compactação do material devido à ação da pressão atmosférica, conseguindo a eliminação das bolhas de ar. Posteriormente o conjunto pode ser colocado num autoclave e a cura ocorre a determinados ciclos de pressão e temperatura distintos favorecendo o processo de cura (J.N.Reddy, 2004) (Gay and Hoa, 2003).

Este processo de fabrico requer diversas horas de preparação e muita mão-de-obra. Tipicamente é aplicado para a pequena indústria.

4.1.3.2. Modelação por compressão

A modelação por compressão é semelhante ao processo descrito anteriormente, distinguindo-se pela existência de um contramolde. O reforço e a matriz são colocados sobre o molde e o contramolde é colocado por cima das camadas de reforço e de matriz. Este contramolde irá proporcionar uma maior pressão sobre o impregnado. A polimerização pode ocorrer à temperatura ambiente ou superior (aquecimento do molde), como esquematizado na Figura 15.

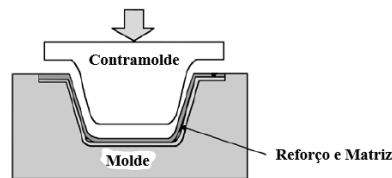


Figura 15 - Modelação por compressão. (adaptado de (Gay and Hoa, 2003)).

Este processo de fabrico, apresenta menores tempos de cura, pelo que é mais rápido, requer uma menor mão-de-obra e pode também ser automatizado (Gay and Hoa, 2003).

4.1.4. Laminado

Um laminado é um conjunto de lâminas empilhadas para alcançar a rigidez e espessura desejada. A sequência de camadas com diferentes orientações de um material compósito reforçado com fibra é denominada por esquema de laminação ou sequência de empilhamento. A sequência de empilhamento indica os diferentes ângulos de orientação das fibras que poderão variar de camada para camada, como é possível observar na Figura 16.

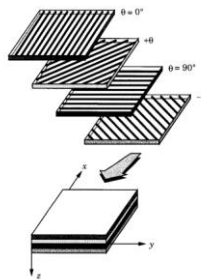


Figura 16 - Empilhamento de camadas de um laminado (J.N.Reddy, 2004).

A disposição das fibras em cada camada obedece às condições de funcionamento especificadas, uma vez que, a sua orientação influencia as propriedades do laminado (Gay and Hoa, 2003). Com esta versatilidade da parte dos materiais compósitos é possível obter um material com as propriedades desejadas para a finalidade pretendida.

Por outro lado, devido ao desajuste entre as propriedades de cada camada, as tensões de corte produzidas entre as camadas podem causar delaminação e desmoldagem da fibra. No processo de fabrico dos laminados também podem ser introduzidos defeitos no material como vazios interlaminares, delaminação, orientação incorreta das fibras, fibras danificadas e variação da espessura (J.N.Reddy, 2004).

É possível obter as propriedades de um laminado através de equações teóricas. A fração de massa de fibra presente num laminado é calculada pelo quociente entre a massa de fibra e a massa total do laminado, tal como representado na Equação (4.1).

$$M_f = \frac{\text{Massa de fibras}}{\text{Massa Total}} \quad (4.1)$$

Por outro lado, a fração de massa da matriz é obtida pela divisão da massa da matriz pela massa total do laminado (Equação (4.2)).

$$M_m = \frac{\text{Massa da matriz}}{\text{Massa Total}} \quad (4.2)$$

A massa da matriz também pode ser calculada pela seguinte equação:

$$M_m = 1 - M_f \quad (4.3)$$

A fração de volume de fibra que está presente no laminado é calculada pela Equação (4.4).

$$V_f = \frac{\text{Volume de fibras}}{\text{Volume Total}} \quad (4.4)$$

Tal como a fração de massa da matriz, o volume é calculado da mesma forma, e exprime-se matematicamente pela Equação (4.5).

$$V_m = \frac{\text{Volume de matriz}}{\text{Volume Total}} \quad (4.5)$$

Também pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$V_m = 1 - V_f \quad (4.6)$$

A densidade do laminado pode ser calculada pelo quociente entre a massa total e o volume total (Equação (4.7)).

$$\rho = \frac{\text{Massa Total}}{\text{Volume Total}} \quad (4.7)$$

A densidade do laminado também pode ser calculada pela Equação (4.8) (Gay and Hoa, 2003).

$$\rho = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (4.8)$$

Em que ρ_f representa a densidade de fibra e ρ_m a densidade da matriz.

A abordagem teórica, designada por abordagem micromecânica, utilizada para determinar as constantes de engenharia de um material compósito contínuo reforçado com fibras, baseia-se nos seguintes pressupostos:

1. Existe uma ligação perfeita entre as fibras e a matriz;
2. As fibras são uniformemente distribuídas;
3. A matriz está livre de vazios ou microfissuras e inicialmente livre de esforços;
4. As fibras e a matriz são isotrópicas e obedecem à lei de *Hooke*;
5. As cargas aplicadas são paralelas ou perpendiculares ao laminado.

Através da abordagem micromecânica é possível calcular o módulo de elasticidade e o coeficiente de *Poisson* do material compósito que pode ser expresso pelos módulos de elasticidade, coeficiente de *Poisson* e fração de volume dos seus constituintes. As constantes de engenharia de um laminado são dadas pelas seguintes equações.

$$E_l = E_f V_f + E_m V_m \quad (4.9)$$

$$E_t = \frac{E_f E_m}{E_f V_f + E_m V_m} \quad (4.10)$$

$$v_{lt} = V_f v_f + V_m v_m \quad (4.11)$$

$$G_{lt} = \frac{G_f G_m}{G_f V_m + G_m V_f} \quad (4.12)$$

Onde E_l representa o módulo de elasticidade longitudinal, E_t o módulo de elasticidade transversal, v_{lt} representa o coeficiente de *Poisson* e G_{lt} o módulo de corte (J.N.Reddy, 2004). Os índices l e t representam a direção longitudinal e transversal às fibras, respetivamente.

O módulo de corte do laminado é obtido através do módulo dos seus constituintes, e expressa-se pela Equação (4.13) e pela Equação (4.14), respetivamente.

$$G_f = \frac{E_f}{2(1 + v_f)} \quad (4.13)$$

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + v_m)} \quad (4.14)$$

4.2. Radiação ultravioleta

A radiação UV representa uma parcela do espectro solar e desempenha um papel muito importante em muitos processos na biosfera. Apresenta muitos benefícios, mas pode ser bastante prejudicial quando em valores excessivos. A radiação UV emitida pelo sol atinge a superfície terrestre atravessando a atmosfera e passa por processos de absorção, reflexão e dispersão (Fioletov and Kerr, 2010).

A radiação UV é uma radiação eletromagnética com um comprimento de onda compreendido entre 100 a 400 nm (ISO 21348-2007) e apresenta comprimentos de onda menores que a luz visível e maiores que os raios-X. A radiação UV constitui cerca de 10% da luz total emitida pelo sol. Segundo a norma ISO 21348-2007 a radiação UV divide-se em diversas subcategorias, como:

- Ultravioleta de vácuo (VUV) [10;200[nm;

- Ultravioleta extremo (EUV) [10;121[nm;
- Ultravioleta longínquo (FUV) [122;200[nm;
- Ultravioleta C (UVC) [100;280[nm;
- Ultravioleta médio (MUV) [200;300[nm;
- Ultravioleta B (UVB) [280;315[nm;
- Ultravioleta próximo (NUV) [300;400[nm;
- Ultravioleta A (UVA) [315;400[nm.

Verificou-se que as faixas de comprimentos de onda não são exatas ocorrendo variações de bibliografia para bibliografia.

Quando se refere à saúde humana e ao meio ambiente, a radiação UV é normalmente dividida na radiação UVA, UVB e UVC (Fioletov and Kerr, 2010). A radiação UVA constitui 99% da radiação solar que chega ao solo. Esta componente da radiação UV, quando incide sobre a pele humana, afeta a derme, camada localizada imediatamente abaixo da epiderme, provocando o fotoenvelhecimento e cânceros cutâneos, entre outros. A radiação UVB constitui os restantes 1% da radiação solar que chega ao solo, sendo a radiação que causa os maiores danos visíveis na pele do ser humano pois atinge a epiderme, provocando o bronzeamento, queimaduras e cânceros cutâneos. A componente C da radiação UV praticamente não chega ao solo, pois é absorvida pela camada do ozono e pelo oxigénio.

Por outro lado, a radiação UV também é benéfica em quantidades controladas, pois é ela a responsável pela produção de vitamina D no corpo humano, essencial para a maioria dos vertebrados terrestres como o ser humano. De igual forma a fototerapia é utilizada para tratamento de determinadas condições da pele como a psoríase, eczema, dermatite atópica. Esta radiação também é utilizada como efeito bactericida, na aceleração da polimerização de materiais e em germicidas.

A luz ultravioleta apesar da sua principal fonte de emissão ser o sol, esta também se encontra em lâmpadas de descarga de mercúrio, que são utilizadas para esterilização e clínicas de bronzeamento artificial.

A quantidade de fluxo de radiação UV que atinge a superfície terrestre pela área exposta a essa radiação define-se como irradiação e é expressa em W/m^2 . (Fragata and Amorin, 2010)

4.2.1. Índice UV

O IUV foi inicialmente introduzido no Canadá em 1992 como resposta às crescentes preocupações em relação ao potencial aumento da radiação ultravioleta que atingia o solo devido à deterioração da camada de ozono (Schmalwieser and Gröbner, 2017) (Turner and Manners, 2017).

Em 1994, o índice foi adotado como um indicador padrão de níveis de radiação UV pela *World Meteorological Organization* e pela *World Health Organization* (Schmalwieser and Gröbner, 2017).

A aplicação do IUV surgiu com a necessidade de informar o público quanto ao crescente número de casos de cancro na pele devido aos riscos da radiação solar.

Mais tarde, em 1995, foi adotado mundialmente como um indicativo padrão de níveis de radiação UV, permitindo ser utilizado como referência para a exposição solar e para estudos de investigação. Ou seja, foi definido para representar a radiação UV de uma forma universal e simples como um único número adimensional (Fioletov and Kerr, 2010). Apesar de ser mundialmente utilizado, foram definidos diferentes índices UV em distintos países (Schmalwieser and Gröbner, 2017).

Segundo o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA (2017)), o IUV exprime-se numericamente como o resultado da multiplicação do valor médio do tempo de irradiação efetiva [W/m^2] por 40. Por exemplo, se estivermos na presença de uma irradiação efetiva de $0.2 W/m^2$, realizando a multiplicação por 40 obtém-se um valor do IUV de 8 (IPMA, 2017).

O IUV pode ter diferentes classificações tendo em conta o nível de irradiação efetiva (Figura 17), tal como:

- Baixo - IUV menor ou igual que 2;
- Moderado - IUV entre 3 e 5;
- Alto - IUV entre 6 e 7;

- Muito alto - IUV entre 8 e 10;
- Extremo - IUV igual ou superior a 11.

Os valores médios do IUV para a latitude de Portugal, enquadram-se para o período compreendido entre os meses de outubro e abril entre 3 e 6, que se classifica como Moderado com possibilidade de Alto em alguns momentos deste período e entre 9 e 10 para o período compreendido entre Maio e Setembro, o que corresponde a Muito Alto.



Figura 17 - Classificação do IUV.

O IUV é calculado com base na interação de diferentes fatores, nomeadamente:

- Localização geográfica do local em análise (latitude e longitude). A maior emissão de radiação ultravioleta encontra-se nas cidades mais próximas da linha do equador;
- Altitude da superfície, para altitudes mais elevadas obtém-se maiores índices de UV, pois ocorre uma diminuição do ozono na atmosfera e consequentemente aumenta a quantidade de radiação UV que incide na superfície;
- A época do ano, pois no inverno a radiação UV é mais baixa do que no verão devido à posição do sol;
- Hora do dia, ao meio do dia (~12h-15h) as quantidades de radiação UV que atingem a superfície terrestre são mais elevadas do que no resto do dia;
- Condições atmosféricas, como nuvens, nebulosidade ou partículas presentes na atmosfera atenuam a quantidade de radiação UV que atinge o solo (Orte and Wolfram, 2017);

- Tipo de superfície, existem superfícies que refletem mais ou menos a radiação UV dependendo da sua morfologia. Superfícies com melhores características refletoras, refletem mais radiação UV;
- Poluição local, que afeta a espessura da camada do ozono e por consequência a quantidade de radiação UV que ultrapassa esta camada e atinge o solo (Orte and Wolfram, 2017) (Vanicek and Frei, 2005).

Tendo em conta outras referências bibliográficas, o IUV é calculado pela seguinte expressão:

$$IUV = 40 [m^2/W] \int_{250}^{400} S_{\lambda} \cdot E_{\lambda} d\lambda \quad (4.15)$$

Onde S_{λ} representa a irradiação solar espectral incidente numa superfície e expressa-se em W/m^2 , E_{λ} representa o espectro de ação eritemática (EAS- *Erythmal Action Sprectrum*) que descreve o efeito relativo do espectro UV em diferentes comprimentos de onda na produção de eritema (queimadura solar). O índice UV é uma escala adimensional e a sua gama de valores globais varia muito. O fator de escala 40 foi originalmente escolhido para fornecer uma gama de valores de 0 a 10, variando os seus valores máximos para cada cidade, por exemplo, o máximo valor do IUV no Canadá é 10 enquanto que na Austrália ou Nova Zelândia podem existir valores superiores a 16 por outro lado no Reino Unido raramente é excedido o IUV de 8 (Turner and Manners, 2017). A Comissão Internacional de Iluminação (*International Commission of Illumination*) define que os valores de EAS são expressos pelas seguintes expressões:

$$\begin{aligned} E_{\lambda(250 \leq \lambda \leq 298 \text{ nm})} &= 1, \\ E_{\lambda(298 < \lambda \leq 328 \text{ nm})} &= 10^{0,094(298-\lambda)}, \\ E_{\lambda(328 < \lambda \leq 400 \text{ nm})} &= 10^{0,015(140-\lambda)}, \end{aligned} \quad (4.16)$$

4.3. Efeitos da Radiação UV sobre os Polímeros

O conhecimento da degradação dos materiais é de máxima importância para o pleno conhecimento do seu comportamento quando sujeito às condições de

utilização. A degradação é qualquer reação destrutiva que possa ser causada por agentes químicos, físicos, mecânicos ou em simultâneo. Estas reações provocam modificações irreversíveis nas propriedades dos materiais poliméricos como as propriedades mecânicas e o seu aspeto visual.

Quando os materiais se encontram num ambiente exterior, estão sujeitos a diversas condições ambientais, desde elevadas e baixas temperaturas, radiação solar, chuva, humidade e erosão. Estas condições podem afetar diretamente as propriedades mecânicas (especialmente a resistência e a rigidez) e colocar em perigo estruturas e componentes.

Em certos materiais esta degradação provocada pela radiação solar é determinante, tal como nos polímeros utilizados para os sacos do lixo, fraldas e embalagens que se pretende a sua destruição com as condições ambientais. No entanto na maioria dos materiais e utilizações esse efeito não é desejável pelo que é importante o seu controlo através de agentes que retardam esta degradação.

Como mencionado na Secção 4.1, existem diversas vantagens quanto à utilização dos materiais compósitos para diferentes aplicações devido à relação entre a alta resistência, rigidez e o seu reduzido peso. Mas estes também apresentam desvantagens, uma delas refere-se à sua durabilidade a longo prazo especialmente quando se encontram em condições ambientais adversas. Pelo que as estruturas em compósitos devem ser projetadas para resistir a uma grande diversidade de ambientes encontrados para diferentes operações.

Embora sejam as fibras as responsáveis por conferir tenacidade e resistência ao material, o desempenho geral do material depende muito das propriedades da matriz e da ligação entre a matriz e a fibra. Quando estes estão sujeitos à temperatura ambiente e à ausência da luz solar o seu comportamento é estável por muito tempo, no entanto quando estão sujeitas à radiação solar e a condições atmosféricas adversas o seu comportamento altera-se e as suas propriedades quer químicas como físicas modificam-se.

A radiação UV presente no espectro solar e a humidade são os dois principais fatores ambientais que afetam diretamente as propriedades físico-químicas dos materiais compósitos, provocando a quebra da estrutura molecular (Kumar and Singh, 2002).

A faixa de comprimento de onda responsável pelos processos de degradação dos materiais está compreendida entre 280 e 400 nm que corresponde à radiação UVA e UVB. A quantidade de UVA que chega à superfície terrestre é muito mais elevada do que a quantidade de UVB, mas é a radiação UVB a responsável por uma maior velocidade do processo de degradação dos polímeros (Fragata and Amorin, 2010).

A degradação provocada pela radiação solar designa-se por fotodecomposição e envolve a degradação do material através dos raios UV. Esta degradação surge como descoloração, perda de brilho, fissuras, perda de resistência mecânica ou desintegração do material. Os efeitos do ataque UV aumentam com o tempo de exposição e a intensidade da luz solar. Esta degradação pode ser reduzida com a utilização de absorventes de UV inibindo o seu efeito (Montagna and Marlene, 2012).

A fotodecomposição provoca a produção de aldeídos, cetonas e ácidos carboxílicos. Quando existem poluentes atmosféricos na atmosfera como nitrogénio, óxidos de enxofre ocorre a foto-oxidação o que conduz à insaturação do polímero (Montagna and Marlene, 2012).

A energia dos fotões UV presentes nas diversas parcelas da radiação solar incidente na superfície terrestre é comparável à energia de dissociação das ligações covalentes dos polímeros que são tipicamente entre 290-460 kJ/mole. Assim os fotões UV absorvidos pelos polímeros resultam em reações foto-oxidativas que alteram a estrutura química resultando na deterioração do material. Essas reações químicas causam quebras na cadeia molecular, consequentemente induz uma diminuição da resistência mecânica, o que resulta numa excessiva fragilidade podendo levar ao início de microfissuras. As reações foto-oxidativas também podem resultar na produção de moléculas cromóforos responsáveis por conferir uma descoloração no polímero (Kumar and Singh, 2002).

A degradação provocada pela radiação UV é a que merece o maior estudo pois é aquela que provoca maiores alterações na amostra. A radiação UV provoca alterações nas características termofísicas, mecânicas e químicas do material. Afeta principalmente as propriedades conferidas pela matriz como a resistência à compressão, resistência ao corte interlaminar, fadiga, resistência ao impacto entre

outras. Basta a deterioração da matriz para colocar em causa o desempenho e fiabilidade do material.

Para avaliar a degradação dos materiais compósitos em condições normais de serviço, os mesmos podem ser submetidos a ensaios acelerados de vida ou a ensaios em condições normais de serviço. Nos ensaios realizados às condições normais de utilização, o material é exposto a condições ambientais próximas das reais condições de utilização do material. Os ensaios acelerados destacam-se devido à rapidez da obtenção dos dados sobre o desempenho do material ao longo da vida. Para os materiais compósitos, normalmente, são utilizados como variáveis de solicitação a temperatura, a radiação UV e a humidade. As elevadas temperaturas provocam a termo-oxidação e a foto-oxidação é provocada pela excessiva exposição à radiação UV. A degradação do material é monitorizada pela mudança do estado físico e pela alteração das propriedades mecânicas do material. A radiação ultravioleta é um dos fatores mais efetivos para a degradação de materiais orgânicos através da foto-oxidação (Cysne Barbosa and Ana, 2017).

Com modernas tecnologias de concentração solar é possível simular diversos anos de exposição natural à radiação UV num teste realizado num curto período de tempo.

No mercado, existem câmaras que simulam os efeitos da exposição a longo prazo de materiais e revestimentos a condições atmosféricas mais agressivas como a radiação ultravioleta, humidade e calor. Estas câmaras de teste utilizam lâmpadas fluorescentes para fornecer um espectro de radiação com comprimentos de onda da radiação ultravioleta. A humidade é conseguida pela condensação forçada e a temperatura é controlada por aquecedores.

As amostras são submetidas a um ciclo de exposição a radiação ultravioleta seguida de ciclos de exposição a humidade por condensação. Os ciclos serão aplicados dependendo do material e do objetivo do ensaio. Com estes ensaios é possível a comparação com amostras de controle que não foram expostas às condições ambientais.

Na Figura 18 (a), está representado um exemplo de uma câmara de simulação de UV e na Figura 18 (b) é exemplificado como se procede a simulação da exposição das amostras.

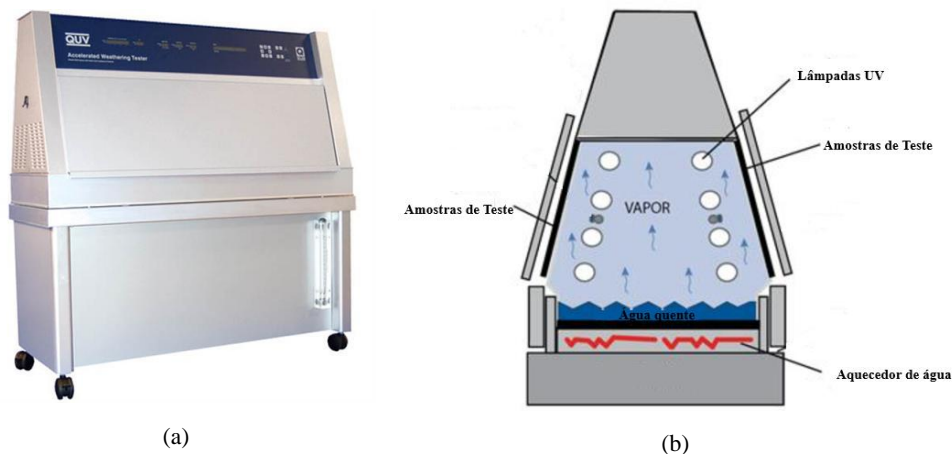


Figura 18 - Exemplos de câmaras de simulação de UV.

Através do aquecimento da água formam-se partículas de vapor que simulam a chuva e a humidade que se depositam na superfície das amostras. Os efeitos provocados pela radiação solar são conseguidos através de diversas lâmpadas que emitem radiação UV nos componentes da radiação UVA e UVB. Simulando os danos causados pela luz solar e a chuva.

A câmara de simulação induz, portanto, degradação e envelhecimento nas amostras, provocando perda de brilho, de cor, desintegração, oxidação e perda de resistência mecânica. Desse modo, auxilia o desenvolvimento de novos materiais e aperfeiçoamento dos materiais já existentes, tornando-os mais resistentes a ambientes de alta incidência de UVA e UVB, chuva e orvalho.

Estes equipamentos estão conforme as normas ASTM G154, ASTM D4329, ASTM D4587 e ISO 4892 entre outras.

Capítulo 5

Caso de Estudo

O presente caso de estudo pretende comprovar a teoria dos ensaios acelerados com um caso prático, através da criação de uma câmara que permita simular a influência da exposição de materiais compósitos à radiação UV.

Para a elaboração deste caso de estudo, o primeiro passo consistiu em delinear os objetivos, através de uma pesquisa de mercado sobre equipamentos que permitam realizar o estudo pretendido. Tendo em conta a pesquisa de mercado, os objetivos para este projeto e as possibilidades monetárias foi possível idealizar uma solução para a câmara de ensaio. Nesta solução foram definidas as especificações e normas que abrangem este tema. Reunindo todos estes fatores foi possível proceder-se à aquisição dos materiais e produtos necessários para chegar ao produto final.

Este Capítulo divide-se em três subcapítulos. O primeiro onde se acompanha todo o desenvolvimento da câmara de ensaios de radiação UV e os seus constituintes, seguindo a descrição do processo de fabrico das amostras, e por fim o procedimento de ensaios das amostras expostas à radiação ultravioleta.

5.1. Objetivo

O presente caso de estudo tem como principal objetivo a análise da degradação de forma acelerada de materiais poliméricos, através do envelhecimento rápido provocado pela simulação da luz solar conseguida através de lâmpadas de radiação ultravioleta.

De forma mais detalhada, pretende-se realizar amostras de manta de fibra de vidro e matriz polimérica (resina *epoxy*) que serão sujeitas à radiação solar emitida por lâmpadas UV simulando a radiação emitida pelo sol. Estas amostras serão

expostas a diferentes tempos de exposição (32, 64, 96 e 128 horas). A luz emitida pelas lâmpadas irá degradar física e quimicamente as amostras, provocando a mudança de cor, o surgimento de fissuras e a degradação das propriedades mecânicas das mesmas. Para comprovar este facto, estas serão sujeitas a ensaios de tração, onde se pretende comparar as propriedades mecânicas das amostras nos diferentes tempos de exposição.

Após obter os diferentes valores das propriedades mecânicas para os diferentes tempos de exposição pretende-se realizar um estudo no *software* ALTA. Através dos resultados obtidos nos ensaios acelerados de vida é possível extrapolar dados fiabilísticos para uma exposição normal.

A maior parte das câmaras encontradas no mercado simulam a exposição de materiais à radiação solar, calor e água simulando a deterioração causada por estes fenómenos. A câmara idealizada para o presente estudo, destina-se apenas à simulação do efeito da radiação solar sobre os materiais poliméricos. A exposição utilizada nesta prática não se destina a simular danos causados por fenómenos meteorológicos localizados, tais como a poluição atmosférica, ataques biológicos e exposição à água salgada.

5.2. Câmara

A câmara de ensaio que se pretende construir destina-se a induzir mudanças nas propriedades das amostras a ensaiar através da porção de UV da luz solar e elevadas temperaturas. A câmara de ensaios encontra-se conforme as normas ASTM G151 e G154, e como tal não se destina a simular a deterioração causada por fenómenos meteorológicos localizados.

As normas não definem o projeto da câmara, nem os materiais da mesma, apenas define que esta deve ser resistente à corrosão e providenciar a colocação de amostras e quaisquer dispositivos como sensores, termómetros e equipamentos de monitorização. E define que os instrumentos de medição devem estar localizados de forma a que recebam uma irradiação uniforme pela fonte de luz.

O equipamento de ensaio deve ser construído de forma a que a irradiação em qualquer local da área de utilização para exposição das amostras seja pelo menos 70% da irradiação máxima medida nessa área.

A câmara será constituída por duas lâmpadas de radiação ultravioleta e será monitorizada a temperatura e a humidade no interior da câmara através de um sensor de temperatura e humidade e o índice de radiação UV através de um sensor de UV, respetivamente. Estes sensores serão descritos na Secção 5.2.2.

5.2.1. Lâmpadas

Segundo as normas ASTM, um elevado número de lâmpadas de radiação UV que emitem radiação em diferentes comprimentos de onda, podem ser utilizadas para simular os efeitos pretendidos.

As lâmpadas mais indicadas para este efeito, especificadas nas normas, correspondem às lâmpadas UVA-340 que emite radiação inferior a 300 nm, estas geralmente não degradam os materiais tão rapidamente quanto as lâmpadas UVB, mas podem permitir uma maior correlação com a meteorologia real ao ar livre. Também são descritas como mais indicadas as lâmpadas UVB-315 (280-315 nm), que emite radiação nos comprimentos de onda mais curtos encontrados na luz solar na superfície terrestre e é responsável por danos consideráveis nos polímeros. Este UV de curto comprimento de onda pode produzir uma rápida degradação do polímero e muitas vezes causa degradação por mecanismos que não ocorrem quando os materiais são expostos à luz solar.

Realizando uma pesquisa de mercado, verificou-se a vasta existência de lâmpadas que emitem radiação ultravioleta destinando-se a soluções como germicida (UVC), secagem de verniz, atuação como efeito bactericida, utilizada para simulação da radiação solar para terrários, entre outras aplicações. O fabricante de lâmpadas OSRAM, produz lâmpadas de radiação ultravioleta que simulam o efeito da radiação solar através da emissão de UVA e UVB, encontrando-se estas lâmpadas dentro da gama descrita pelas normas ASTM, pelo que se concluiu que a lâmpada *Ultra-Vitalux* é a mais adequada para o estudo pretendido.

A lâmpada *Ultra-Vitalux* (Figura 19) apresenta como principais características a emissão de radiação ultravioleta, uma tensão nominal de 230 V, emite radiação de 13,6 W nos comprimentos de onda UVA entre 315 e 400 nm e 3 W nos comprimentos de onda UVB entre 280 e 315 nm.



Figura 19 - Lâmpada Ultra-Vitalux.

Esta é uma lâmpada especial que apresenta na sua composição uma mistura de radiação semelhante à luz solar natural. A radiação, é gerada por um filamento de tungstênio e uma lâmpada de alta pressão. O vidro especial do bulbo da lâmpada está equipado com um refletor interno que concentra a radiação. Na Tabela 2 apresenta-se as principais características das lâmpadas em análise.

Tabela 2 - Características gerais da Lâmpada Ultra Vitalux 300W 230V E27.

Descrição do produto	ULTRA VITALUX 300 W 230 V E27	
Dados elétricos	Tensão nominal	230 V
Dados fotométricos	Potência no comprimento de onda UVA entre 315 e 400 nm	13,6 W/m ²
	Potência no comprimento de onda UVB entre 280 e 315 nm	3 W/m ²
Dimensões e geometria	Diâmetro (d)	127,0 mm
	Comprimento (l)	185 mm
	Ângulo de radiação	30°
Espectativa de vida	Vida mediana	1000 h
Informação adicional do produto	Soquete (base)	E27

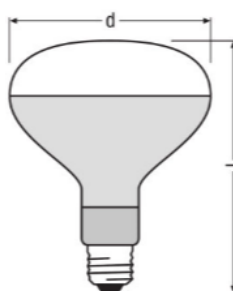


Figura 20 - Dimensões nominais da Lâmpada Ultra-Vitalux.

Estas lâmpadas são especialmente utilizadas para a simulação da luz solar, secagem de cola, envelhecimento artificial do material, exposição de revestimentos foto resistentes e sensíveis à radiação UV, utilização em terrários e solários. Devido ao seu tipo de radiação solar, a lâmpada *ULTRA-VITALUX®* é particularmente adequada para simular o sol em testes de materiais industriais.

No entanto, esta lâmpada apresenta uma grande capacidade de gerar calor pelo que as lâmpadas só podem ser operadas em locais adequados. As lâmpadas também devem ser protegidas contra a humidade e salpicos de água. Em caso de uso impróprio, a radiação UV pode levar a queimaduras solares e conjuntivite, não estando aprovado para uso em pessoas de acordo com a nova edição da norma EN 60335-2-27.

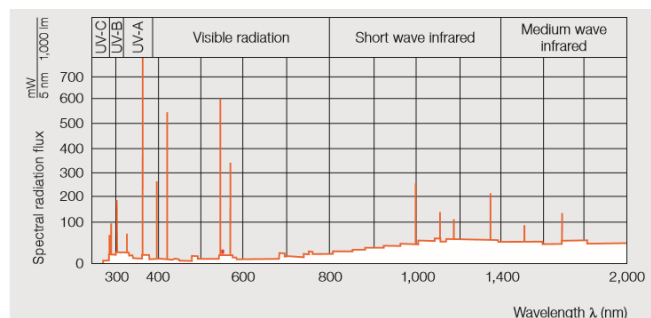


Figura 21 - Fluxo de radiação espectral em função do comprimento de onda.

Analisando a Figura 21, verifica-se que as lâmpadas apresentam uma maior intensidade de fluxo de radiação no comprimento de onda aproximadamente 370 nm que corresponde à emissão da radiação UVA.

A Figura 22, fornecida pelo fabricante, indica que as amostras que se pretende estudar devem estar a 500 mm abaixo das lâmpadas e estas abrangem uma área circular de 250 mm de diâmetro.

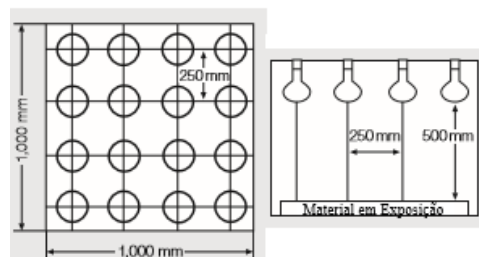


Figura 22 - Indicações do fornecedor para a posição das lâmpadas relativamente ao material em exposição.

Os níveis reais de irradiação na superfície da amostra de teste podem variar devido à idade das lâmpadas, à distância destas às lâmpadas, à temperatura do ar dentro da câmara e à temperatura ambiente do laboratório.

5.2.2. Sensores

5.2.2.1. Sistema de aquisição do IUV

O ML8511 (Figura 23) é um sensor UV adequado para adquirir a intensidade UV em ambientes fechados ou exteriores. O ML8511 está equipado com um amplificador interno que converte foto-corrente em tensão dependendo da intensidade UV.

O sensor MP8511, funciona com a saída de um sinal analógico em relação à quantidade de luz UV detetada. Este sensor é muito útil na aplicação em dispositivos que alertam o usuário de queimaduras solares ou detetam o IUV em relação às condições climáticas. Este sensor deteta radiação entre os comprimentos de onda compreendidos entre 280-390 nm de luz de forma mais eficaz. Isso é categorizado como parte do espectro UVB e da maior parte do espectro UVA. O sensor produz uma tensão analógica linearmente relacionada à intensidade UV medida [mW / cm^2].

O sensor apresenta como principais aplicações a sua integração em *smartphones*, relógios, estações meteorológicas, navegação de bicicletas, jogos entre outras.



Figura 23 - Sensor ML8511.

O sensor apresenta as seguintes características:

- Fotodíodo sensível a UV-A e UV-B;
- Amplificador operacional embutido;
- Saída de tensão analógica;
- Corrente de alimentação baixa (300 μ A típica) e baixa corrente de espera (0.1 μ A típica).

O diagrama de blocos do sensor em análise encontra-se representado na Figura 24.

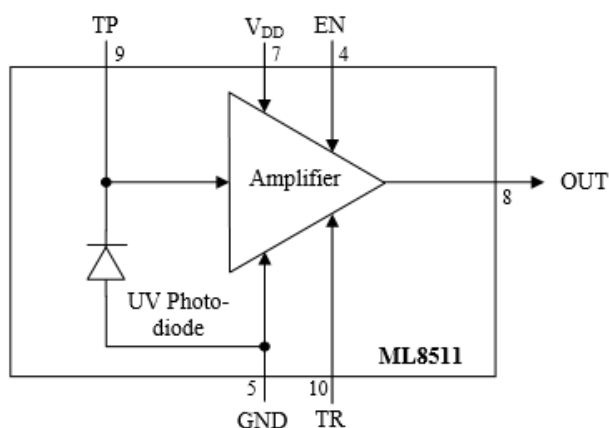


Figura 24 - Diagrama de Blocos ML8511.

É recomendado que as condições de temperatura de operação na aplicação do sensor estejam entre o valor mínimo de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e o valor máximo de $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Relativamente à tensão da corrente o seu valor típico é de 3,3 V para a tensão operacional, e este valor não deve ser inferior a 2,7 V nem superior a 3,6 V (Tabela 3).

Tabela 3 - Condições de operação recomendadas.

Parâmetro	Mínimo	Típico	Máximo
Tensão Operacional (V_{DD})	2,7 V	3,3 V	3,6 V
Temperatura Operacional (T_a)	$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$	-	$70\text{ }^{\circ}\text{C}$

Na Figura 25, encontra-se esquematizado a tensão de saída em função da radiação UV, verifica-se que existe uma relação linear entre a tensão de saída do sensor e a intensidade de radiação ultravioleta [mW/cm^2] quando $V_{DD}=3,0\text{ V}$. Verifica-se também que a saída do sensor é estável em toda a faixa de temperatura operacional.

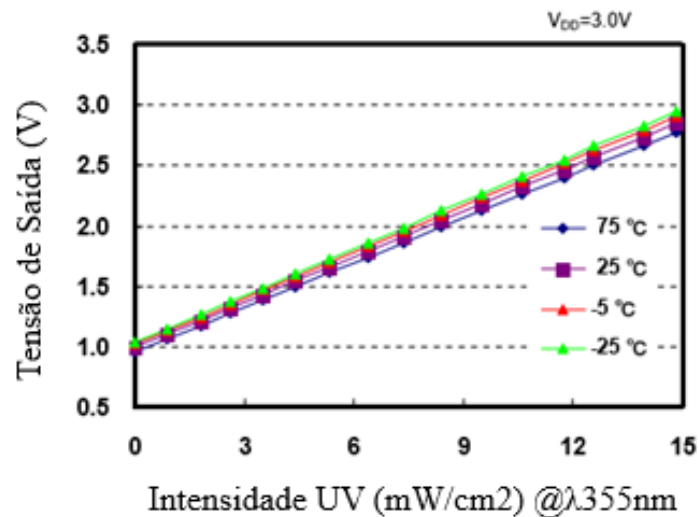


Figura 25 - Gráfico da tensão de saída em função da Intensidade UV.

A resposta espectral do sensor ML8511 encontra-se nos comprimentos de onda UVA e UVB como representado na Figura 26.

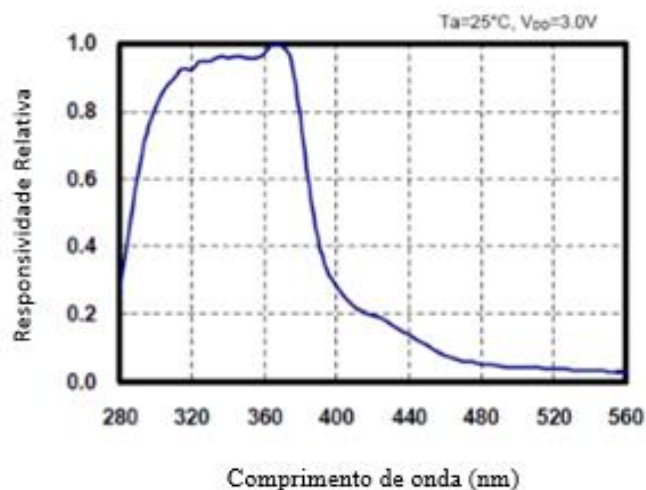


Figura 26 - Resposta do sensor em função do comprimento de onda.

Especificamente a radiação UVA entre 315 e 400 nm e a radiação UVB entre 280 e 315 nm.

5.1.1.1. Sensor temperatura e humidade

O sensor Si7021 (Figura 27), é um sensor de humidade e temperatura digital de baixo custo, fácil utilização e elevada precisão. Realiza leituras da humidade relativa e da temperatura com elevada precisão.



Figura 27 - Sensor Si7021.

Apresenta as seguintes características:

- Precisão típica da humidade de +/- 2 %;
- Precisão típica da temperatura de +/- 0,3 °C;
- Opera entre os 0 e 100 % de humidade, mas não é recomendado o contacto com água (como chuva).

Estes sensores são calibrados de fábrica e os dados de calibração são armazenados na memória não volátil do *chip*, garantindo que os sensores sejam totalmente permutáveis sem necessidade de recalibração ou alteração de *software*. Na Figura 28, encontra-se esquematizado o gráfico que representa a precisão da humidade relativa, onde se verifica que ocorrem maiores imprecisões acima de aproximadamente 80% da humidade relativa.

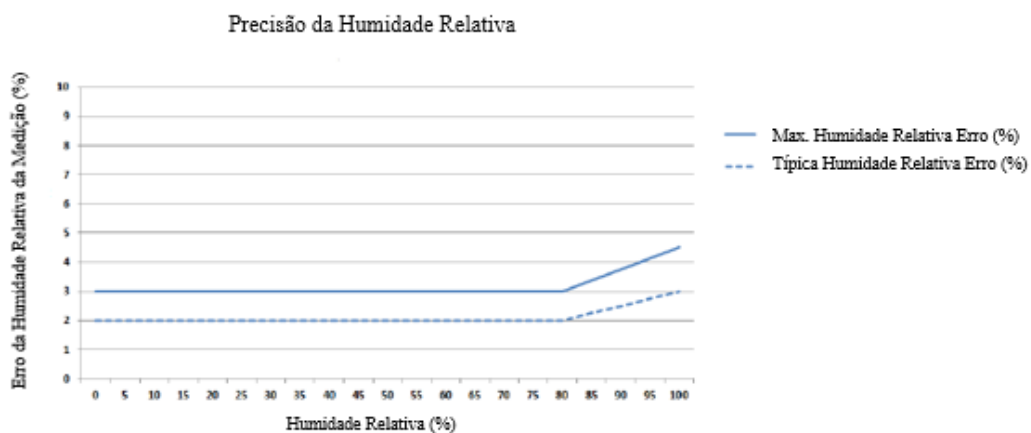


Figura 28 - Precisão da humidade relativa.

Na Figura 29, está representada a precisão da temperatura ao longo da sua gama, em que se verifica que não ocorre erros de leitura entre aproximadamente - 5 °C e 85 °C, para além deste intervalo a precisão de leitura não é favorável.

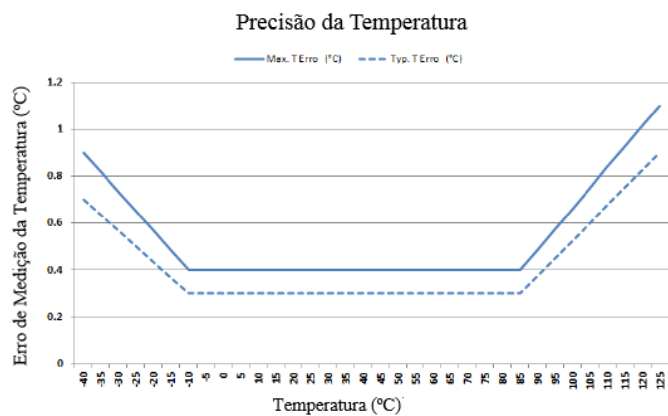


Figura 29 - Precisão da temperatura do sensor Si7021.

5.2.3. Modelo da Câmara Final

Tendo em conta as especificações e as possibilidades monetárias para este projeto chegou-se ao esboço final (Figura 30). As dimensões da câmara e o aspeto da mesma foi idealizado tendo em conta as indicações do fornecedor das lâmpadas.

As lâmpadas foram posicionadas de forma a que na área utilizada para expor as amostras à radiação UV, a irradiação seja superior a 70 % do seu valor máximo.

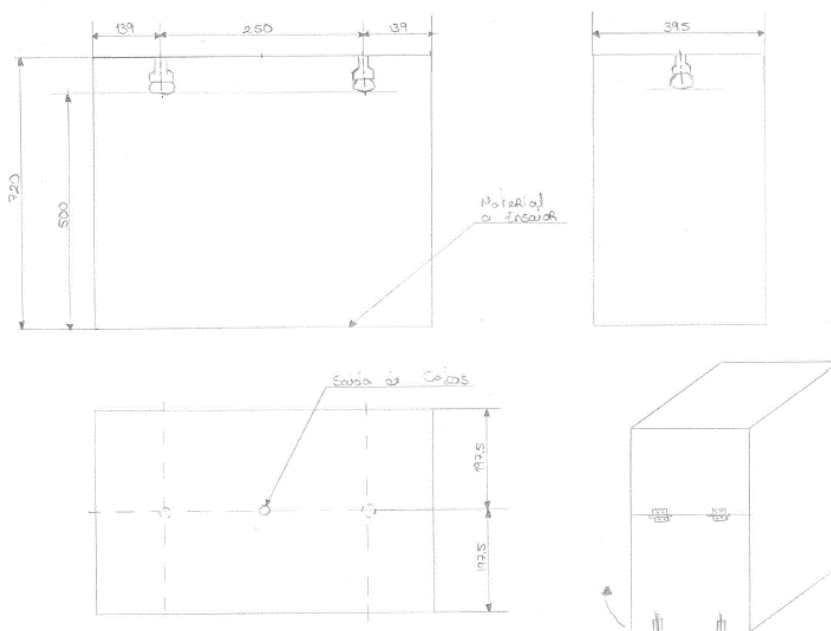


Figura 30 - Esboço da câmara de ensaio.

Após a idealização da câmara de ensaios, procedeu-se à sua construção. Esta foi realizada com painéis de madeira com aglomerado como material de interior,

cortadas de forma a se adequar às dimensões pretendidas. Estas foram unidas com pregos e parafusos tendo em conta o esboço inicial que se encontra na Figura 30. Foi também realizada a furação para a adaptação dos casquilhos e das ligações elétricas. Foi adaptado um interruptor para poder acionar ou desativar as lâmpadas.

Na Figura 31, está representado a primeira solução da câmara, à esquerda encontra-se a câmara em repouso e à direita em pleno funcionamento.

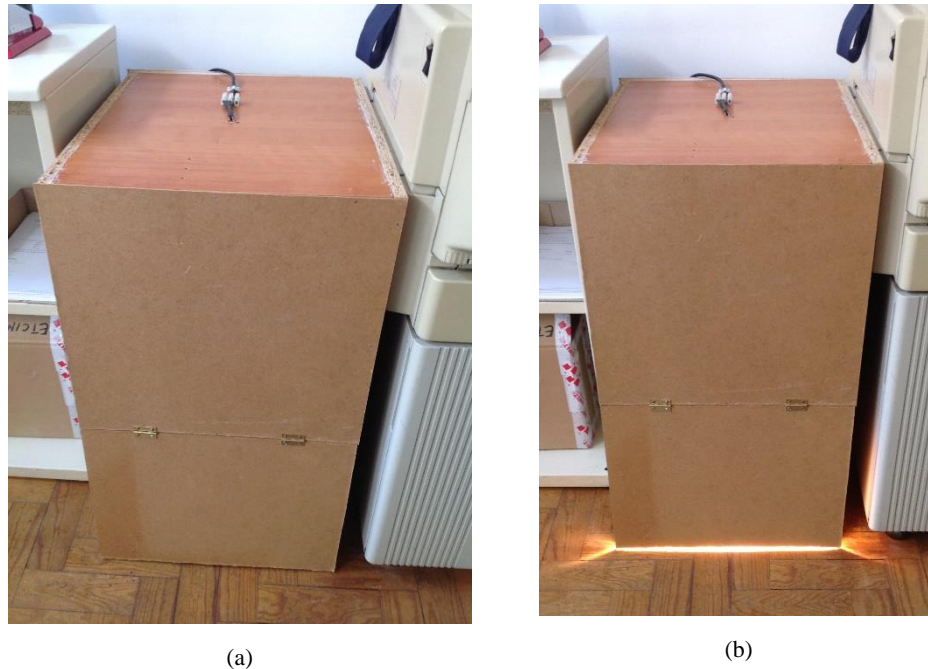


Figura 31 - Câmara de ensaio de radiação UV. (a) Câmara de ensaio em repouso; (b) Câmara de ensaio em funcionamento.

Ao realizar o teste preliminar para verificar o correto funcionamento de todo o equipamento, verificou-se que se atingia uma temperatura muito elevada dentro da câmara. Com este excessivo aquecimento, o equipamento poderia danificar-se e tornar-se perigosa a sua utilização. Para contornar este efeito, foi aplicada ventilação (Figura 32) para diminuir a temperatura dentro da câmara através de um ventilador e duas grelhas para entrada e circulação de ar. O aspeto final da câmara de ensaios de radiação ultravioleta encontra-se representado na Figura 35. É de salientar que a câmara foi realizada com materiais reutilizados para economizar os custos relacionados com a sua conceção. Apenas foram adquiridas as lâmpadas, sensores e equipamentos de ventilação.

O extrator adaptado para este projeto (Figura 32) foi um extrator de casa de banho que tem a capacidade de remover um caudal de $98 \text{ m}^3/\text{h}$ com 15 W . Com

este equipamento e com as grelhas de entrada de ar foi possível reduzir a temperatura e humidade no interior da câmara de aproximadamente 70 °C e 5 % de humidade relativa para 53 °C e 8,5 % de humidade, o que corresponde a uma temperatura mais reduzida para poder realizar os ensaios com maior segurança.



Figura 32 - Extrator.

Na Figura 33 e Figura 34 encontra-se a montagem dos casquilhos e o sistema elétrico na câmara de ensaios para acoplação das lâmpadas de emissão de radiação ultravioleta.



Figura 33 - Montagem dos casquilhos e sistema elétrico na câmara de ensaio.



Figura 34 - Montagem das lâmpadas nos respetivos casquilhos.

Após a montagem dos equipamentos e as alterações necessárias para a realização dos ensaios em segurança, chegou-se à solução final da câmara de ensaios de radiação ultravioleta como representado na Figura 35.



Figura 35 - Câmara de ensaios de radiação ultravioleta.

5.3. Amostras

A norma que sustenta a realização dos ensaios de radiação ultravioleta não define qualquer dimensão nem geometria das amostras. Esta especifica que as amostras devem ser definidas pelas especificações do método de teste utilizado para avaliar os efeitos da exposição nas mesmas. Pelo que, as amostras foram fabricadas tendo em conta as normas para a análise dos resultados a norma ASTM D3039 e a ISO 527-1 (1993).

A norma ASTM D3039 define as dimensões, geometria e método de produção das amostras para a realização dos ensaios de tração. Todas as informações que contemplam a norma para a produção das amostras, foram definidas tendo em conta a realização de diversos ensaios que produziram modos de falha aceitáveis nos mesmos. No entanto, o uso destas dimensões e geometrias não garante o sucesso para todos os materiais.

As dimensões recomendadas tendo em conta a orientação das fibras é dada pela Tabela 4.

Tabela 4 - Dimensões das amostras recomendadas para o ensaio de tração (adaptado de (ASTM D 3039)).

Orientação das Fibras	Largura [mm]	Comprimento [mm]	Espessura [mm]
0 ° unidirecional	15	250	1
90 ° unidirecional	25	175	2
Simétrica e Balanceada	25	250	2.5
Aleatória, descontínua	25	250	2.5

O comprimento das amostras deve ser substancialmente maior do que o requisito mínimo, para minimizar os esforços de flexão causados por excentricidades.

O uso de reforços nas extremidades das amostras (Figura 36) na zona dos mordentes, designados por *tab's*, não é obrigatório pois existem muitas configurações como amostras multidirecionais, materiais à base de tecido ou compósitos reforçados aleatoriamente que podem ser testados com sucesso sem os mesmos. Estes *tab's* têm o objetivo de reforçar o material na região dos mordentes do equipamento de tração, prevenindo a fratura por compressão nesta região e o escorregamento da mesma. No entanto, os *tab's* são fortemente recomendados ao testar materiais unidirecionais (ou laminados fortemente unidireccionalmente dominantes) onde as falhas ocorrem na direção da fibra, ou quando exibem materiais unidirecionais na direção da matriz para evitar danos no teste.

Tabela 5 - Dimensões dos *tab's* recomendadas para o ensaio de tração (adaptado de (ASTM D 3039)).

Orientação das Fibras	Largura <i>tab's</i> [mm]	Espessura dos <i>tab's</i> [mm]	Ângulo do <i>tab's</i> [°]
0 ° unidirecional	56	1,5	7 ou 90
90 ° unidirecional	25	1,5	90
Simétrica e Balanceada	lixa de esmeril	-	-
Aleatória, descontínua	lixa de esmeril	-	-

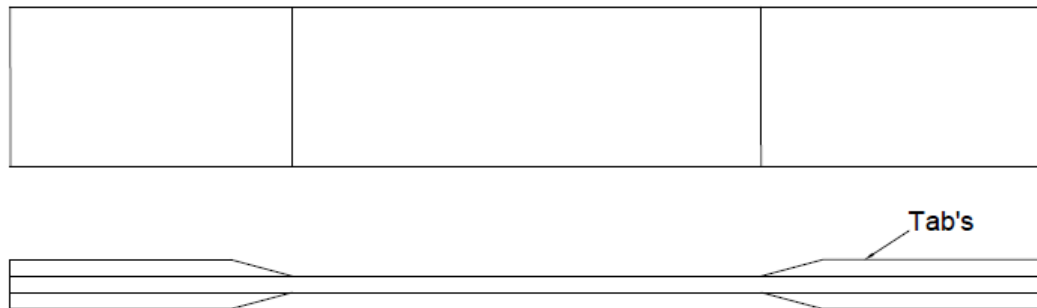


Figura 36 - Amostra de ensaio com a indicação do tab's (adaptado de (ASTM D 3039)).

As recomendações sobre as dimensões dos *tab's* são fornecidas para configurações de material típicas na Tabela 5. As dimensões apresentadas na presente tabela foram determinadas através de diversos laboratórios, para produzir modos de falha aceitáveis numa grande variedade de sistemas de materiais, mas o uso deles não garante o sucesso de todas as gamas de materiais.

5.3.1. Materiais

Para a realização das amostras foi utilizado o material existente no laboratório de Materiais Compósitos que se encontra no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. O laboratório possui diversas fibras como fibra de vidro (manta e tecido), fibra de carbono e fibra de aramida (*Kevlar*). Para realizar as amostras, foi utilizada a manta de fibra de vidro (Figura 37) (*Chopped Strad Mat (CSM)*) com as seguintes propriedades:

Tabela 6 - Propriedades da manta de fibra de vidro.

Manta de Fibra de Vidro	
Módulo de elasticidade ($E_1=E_2=E_3$)	7,8 GPa
Coefficiente de <i>Poisson</i> ($\nu_1= \nu_2$)	0,3
Coefficiente de <i>Poisson</i> (ν_3)	0,09
Módulo de Elasticidade Transversal ($G_{12}=G_{21}=G_{31}$)	2,75 GPa
Resistência à tração	108 MPa
Resistência à compressão	148 MPa
Resistência ao corte	85 MPa
Massa volúmica (gramagem)	2000 kg/m ³
Tensão de cedência (σ_{ced})	2,5 GPa



Figura 37 - Manta de fibra de vidro.

As fibras de vidro são utilizadas vastamente para o fabrico de materiais compósitos, pois estes apresentam preços competitivos, facilidade de processamento, alta resistência e outras propriedades. A sua alta compatibilidade com matrizes de poliéster e *epoxy* converte-se num material com boas propriedades e alta durabilidade (Adams and Advani, 2001). Apresentam também excelentes propriedades, tais como dureza, transparência, resistência ao ataque químico, estabilidade e inércia, bem como força, flexibilidade e rigidez.

A manta de fibra de vidro, é constituída por fibras curtas ou contínuas que formam uma camada multidirecional. As fibras são colocadas aleatoriamente e mantidas em conjunto por um aglutinante. Através da manta de fibra de vidro é possível obter propriedades isotrópicas no seu plano xy , pelo que podem ser caracterizadas por apenas duas constantes elásticas (Gay and Hoa, 2003).

Tal como as fibras, a resina utilizada para realizar as amostras é a existente no laboratório de Matérias Compósitos, resina *epoxy* SR 1500 e endurecedor SD 2505 da *Sicomín* (Figura 38).

A resina *epoxy* é um plástico termo endurecido que endurece quando misturada com um agente catalisador. A sua utilização é muito vasta, apresenta boas características estruturais e pode ser utilizada até temperaturas de 100 °C (Adams and Advani, 2001).



Figura 38 - Resina e catalisado.

Na Tabela 7 e Tabela 8 encontram-se as principais propriedades da resina e do endurecedor, obtidas através do fornecedor das mesmas.

Tabela 7 - Propriedade da resina e do endurecedor

		Resina SR 1500	Endurecedor SD 2505
Aspeto		Líquido	Líquido
Cor		Claro	Amarelo
Viscosidade [mPa.s]	15 °C	5300 ± 1000	-
	20 °C	-	350 ± 70
	25 °C	2300 ± 500	-
	30 °C	1250 ± 250	230 ± 40
	40 °C	300 ± 60	150 ± 30
Densidade relativa	20 °C	1,13 ± 0,01	1,00 ± 0,01

Tabela 8 - Propriedades mecânicas da resina pura.

Tração	
Módulo de Elasticidade Longitudinal [N/mm ²]	3100
Resistência máxima à tração [N/mm ²]	77
Resistência à rotura [N/mm ²]	71
Alongamento ao esforço máximo [%]	3,6
Alongamento na rotura [%]	4,5
Flexão	
Módulo de Flexão [N/mm ²]	3200
Resistência máxima à flexão [N/mm ²]	115
Alongamento ao esforço máximo [%]	4,8
Alongamento na rotura [%]	7,7
Ensaio de impacto Charpy	
Resiliência [kJ/m ²]	25
Temperatura de transição vítrea	
Tg1 [°C]	56

5.3.2. Produção das Amostras

Para a produção das amostras foi utilizado o processo de fabrico designado por processo de moldagem por contacto (*Wet Hand Lay-up*), descrito na Secção 4.1.3, sendo o mais adequado tendo em conta os recursos disponibilizados no laboratório da unidade curricular de Materiais Compósitos. Para este processo foram utilizados os seguintes materiais:

- Manta de fibra de vidro (Figura 37);
- Feltro absorvente (Figura 39);
- *Peel-ply* (Figura 40);
- Resina *Epoxy* (SR1500) e Endurecedor SD (2505) (Figura 38);
- Desmoldante (Figura 41).



Figura 39 - Feltro absorvente.



Figura 40 - Peel-Ply.

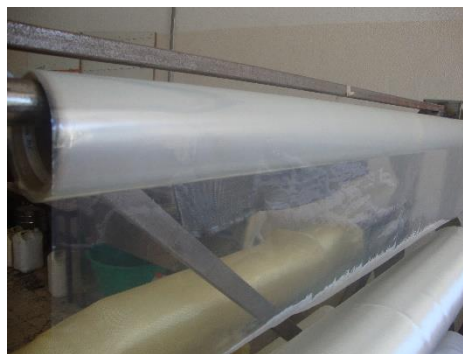


Figura 41 - Desmoldante.

As amostras foram fabricadas com duas camadas de manta de fibra de vidro empilhadas sequencialmente, de forma aleatória. O *peel-ply* foi utilizado para

conferir rugosidade à superfície da amostra, com o fim de proporcionar atrito entre a amostra e as garras do equipamento de tração.

O processo de fabrico por moldagem é muito simples, neste caso o molde é apenas uma placa plana metálica, onde são colocadas as primeiras camadas de desmoldante, absorvente (Figura 42), *peel-ply* (Figura 43) e a primeira camada de manta de fibra de vidro (Figura 44) (por esta ordem) com as dimensões pretendidas. De seguida, prepara-se a mistura numa razão de três partes de resina para uma de catalisador e cobre-se a área útil com a mesma. Para finalizar coloca-se a segunda camada de manta de fibra de vidro sobre a primeira, unta-se com a mistura e finaliza-se com a sobreposição de uma camada de absorvente, *peel-ply* e desmoldante. Para que o processo de cura ocorra de forma mais eficaz, foram colocados pesos por cima de todas as camadas de forma uniforme para aumentar a pressão sobre a placa, simulando um contramolde.



Figura 42 - Camada de desmoldante e feltro absorvente.



Figura 43 - Camada de peel-ply.



Figura 44 - Camada de manta de fibra de vidro.

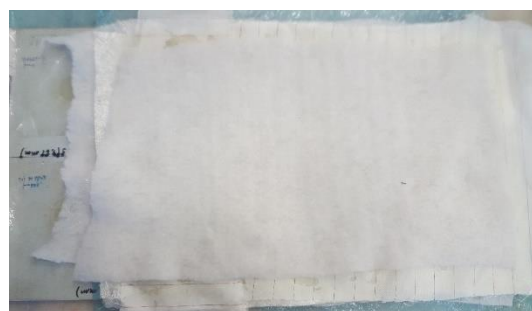


Figura 45 - Processo de fabrico finalizado.

Após decorrer o tempo de cura indicado pelo fabricante (dois a sete dias) à temperatura entre os 20 e os 25 °C, removeu-se as camadas envolventes da fibra de vidro (superiores e inferiores).

Para que o processo de fabrico fosse mais eficaz, produziu-se uma placa de maiores dimensões e de seguida procedeu-se ao seu corte para o tamanho das amostras desejadas como indicado na Figura 46.

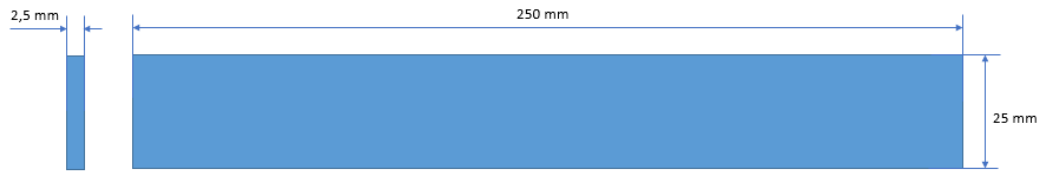


Figura 46 - Dimensões das amostras para orientação das fibras aleatórias (Adaptado ASTM D3039).

Tendo em conta o método de corte utilizado nem sempre foi possível obter as dimensões de forma rigorosa. As amostras apresentam a seguinte aparência:



Figura 47 - Amostra de ensaio.

Analisando a Tabela 5, os provetes que apresentam orientação das fibras de forma aleatória não necessitam obrigatoriamente do uso de *tab's*, pelo que estas não foram utilizadas para o ensaio. Contudo, como já referido, no processo de fabrico das amostras foi utilizado *peel-ply* que promove rugosidade na superfície do provete, pelo que não existe o perigo de ocorrer escorregamento entre o provete e as garras do equipamento de tração que poderia influenciar os resultados.

A norma que rege os ensaios de radiação ultravioleta, define que devem ser utilizadas três amostra para cada condição de teste, salvo a norma que especifica as condições para a análise das propriedades das amostras especifique outra quantidade. Tendo em conta a norma ASTM D3039, define que devem ser utilizados pelo menos cinco amostras num ensaio de tração para cada condição de teste. Pelo que foram utilizadas cinco amostras para cada condição de teste.

Após a realização das amostras, a geometria das amostras foi registada antes do ensaio de tração. Foi medida a área de secção em três lugares do provete, a área

da secção é a média destas três leituras conseguindo uma maior precisão neste cálculo. Cada amostra foi referenciada com um respetivo número indicativo que menciona as suas dimensões, propriedades, data de início e fim da exposição (Anexo B1).

5.4. Ensaio de radiação UV

Todo o procedimento do ensaio de radiação ultravioleta, como a definição dos parâmetros de funcionamento e as especificações da câmara foram definidas de acordo com as normas ASTM G 154, D4329-99 e G151. Pelo que para uma maior eficácia de informação aconselha-se a leitura das mesmas.

5.4.1. Parâmetros de Funcionamento e Especificações

Segundo a norma ASTM D4329-99, a câmara de ensaio deve estar localizada numa área com temperatura entre os 18 e os 27 °C, não deve encontrar-se empilhado em cima de outros equipamentos que possam gerar calor e consequentemente transmitir para a mesma.

Os ensaios procederam-se durante o verão pelo que as temperaturas da sala de ensaio estiveram entre os 27 a 35 °C. Foi necessário ventilar a sala para reduzir a temperatura da mesma, conseguindo controlar a temperatura exterior da câmara entre os 26 e os 27 °C.

A norma ASTM D4329 – 99 define os diferentes ciclos de teste. Os ciclos definidos são específicos para câmaras em que é possível simular o efeito da radiação UV e da chuva. A câmara construída para esta simulação apenas simula o efeito da radiação solar sobre polímeros.

Tendo em conta a análise feita à bibliografia não foi possível determinar os ciclos para obter bons resultados, pois um tempo de exposição que produz alterações significativas num determinado material, não pode ser considerado aplicável a outros materiais. O tempo mínimo de exposição utilizado deve ser o necessário para produzir uma alteração substancial nas propriedades de interesse para o material menos estável a ser avaliado. Os ciclos determinados para a realização destes ensaios basearam-se num estudo prévio onde foram expostas

cinco amostras à radiação UV durante oito horas em quatro dias consecutivos. Neste estudo prévio verificou-se que ocorria degradação das propriedades mecânicas em análise pelo que se definiu os seguintes ciclos:

- 8 horas por 4 dias a uma irradiação de $17,7 \text{ W/m}^2$ e a $50 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 8 horas por 8 dias a uma irradiação de $17,7 \text{ W/m}^2$ e a $50 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 8 horas por 12 dias a uma irradiação de $17,7 \text{ W/m}^2$ e a $50 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 8 horas por 16 dias a uma irradiação de $17,7 \text{ W/m}^2$ e a $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

Cada ciclo teve a duração de oito horas de radiação UV a uma irradiação de $17,7 \text{ W/m}^2$ e à temperatura de $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

É recomendado que não se toque na superfície dos espécimes com pele nua porque os óleos depositados podem atuar como absorventes da radiação UV ou conter contaminantes que aceleram a degradação.

As amostras só devem ser colocadas na área de projeção da radiação ultravioleta conseguida pelas lâmpadas, área esta que possui mais de 90% da radiação máxima das lâmpadas. Fora desta área não se garante a mesma porção de radiação para todas as amostras. A norma ainda aconselha a que se reproduza uma sequência de reposição das amostras da sua posição original para que a quantidade de radiação que chega às mesmas seja aproximadamente igual em todas.

A avaliação periódica dos materiais de teste é necessária para determinar a variação das propriedades em função do tempo de exposição. Após o período de exposição deve ser quantificado o tempo de exposição e registado.

Na Tabela 9, encontra-se uma compilação das condições do ensaio de radiação UV.

Tabela 9 - Condições dos ensaios de tração.

Condições do ensaio	
Temperatura no interior da câmara	$50,8 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura no exterior da câmara	$27 - 29 \text{ }^\circ\text{C}$
Humidade relativa no interior da câmara	$10,1 \%$
Intensidade da radiação UV no interior da câmara	$17,7 \text{ W/m}^2$

5.4.2. Procedimento do Ensaio de Radiação Ultravioleta

Antes de expor as amostras à radiação ultravioleta as amostras foram marcadas numericamente nas áreas não utilizadas para o teste. Previamente fez-se a mediação das dimensões das amostras em três diferentes pontos.



Figura 48 - Câmara em funcionamento.

As amostras são colocadas na área de projeção da radiação ultravioleta conseguida pelas lâmpadas, área esta que possui mais de 90 % da radiação máxima das lâmpadas (Figura 49). Tal como a norma ASTM D3039 recomenda, foram colocadas cinco amostras para cada condição de ensaio.



Figura 49 - Esquema de colocação das amostras para ensaio.

Para uma maior uniformização dos resultados as amostras foram reposicionadas durante o período de exposição, ou seja, as amostras que se encontravam nas extremidades foram colocadas no centro da câmara e as que se

encontravam no centro da câmara no início do ensaio foram reposicionadas nas extremidades, para que todas as amostras possam receber uma quantidade equivalente de exposição radiante.

Na Tabela 10 apresenta-se esquematizado o tempo de exposição para cada amostra.

Tabela 10 - Tempo de exposição para casa amostra.

Amostras	Tempo de Exposição [h]				
	0	32	64	96	128
P09	X				
P10	X				
P11	X				
P12	X				
P13	X				
P06		X			
P07		X			
P08		X			
P14		X			
P15		X			
P16			X		
P17			X		
P18			X		
P19			X		
P20			X		
P21				X	
P22				X	
P23				X	
P24				X	
P25				X	
P01					X
P02					X
P03					X
P04					X
P05					X

O controlo da temperatura e da intensidade da radiação UV é realizado através dos sensores de UV e temperatura tal como representado na Figura 50. A aquisição de dados é feita através de um sistema Arduino e de sensores onde é possível controlar a temperatura e a intensidade da radiação UV no interior da câmara. O sensor de radiação ultravioleta transforma a potência elétrica em intensidade da radiação ultravioleta que atinge o sensor. A correlação entre a tensão e a intensidade da radiação UV ocorre de forma linear, como visto no Capítulo 5.2.2.1. Através de um código inserido no *software* do Arduino (Anexo A1) é possível controlar em tempo real as leituras do sensor, através de um computador como se pode observar na Figura 51. O sistema de aquisição da temperatura e humidade ocorre da mesma forma, através do sensor Si7021. Com

um código adequado para este (Anexos A2) é possível registrar as leituras destas propriedades de milésima em milésima de segundo.

O controlo destes parâmetros foi realizado no centro da câmara, onde a radiação atingirá os valores máximos e no mesmo plano horizontal onde se irá expor as amostras a ensaiar, tal como representado Figura 52. Estas leituras foram realizadas antes de cada ensaio, para verificar se estes parâmetros se mantinham constantes ao longo dos mesmos.

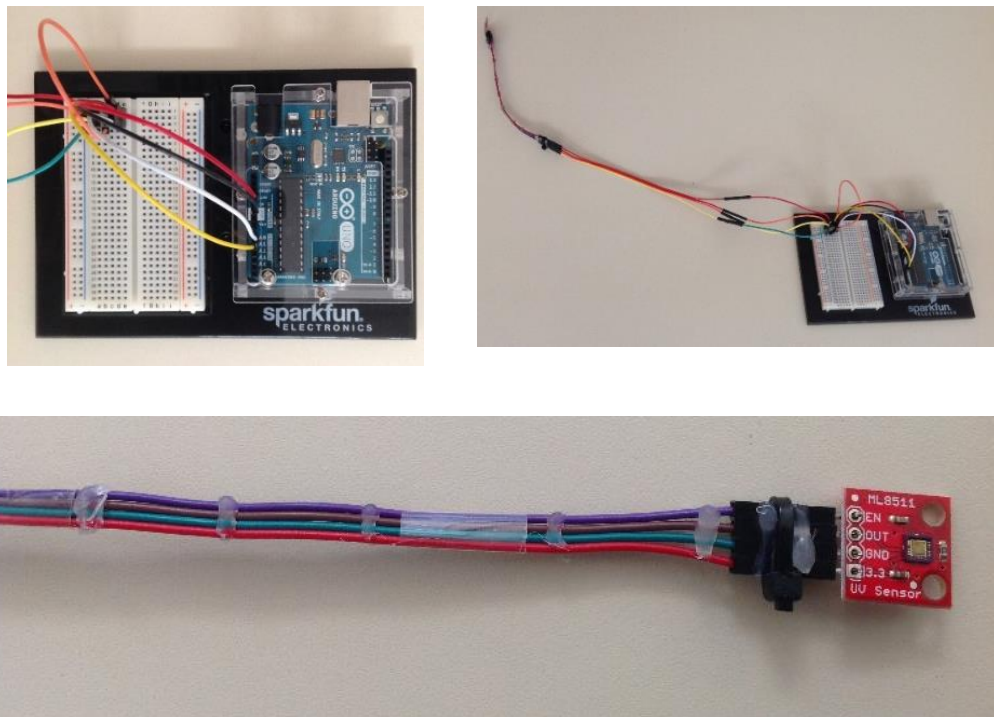


Figura 50 - Sistema Arduino e Sensores.

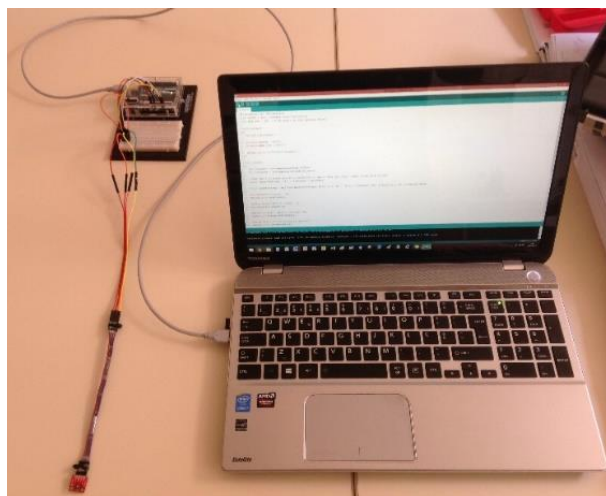


Figura 51 - Output das leituras do sensor UV.

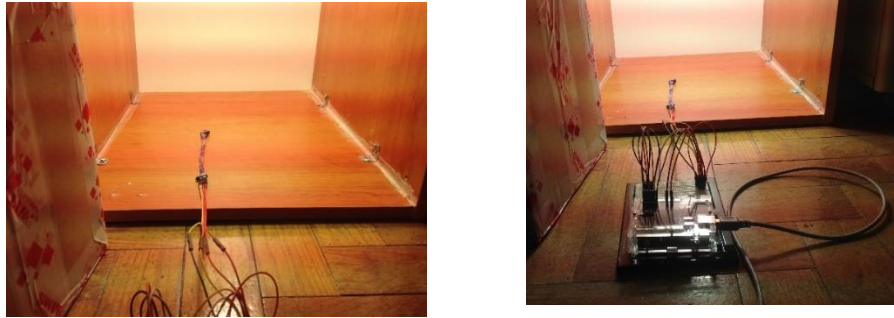


Figura 52 - Aquisição de informação através do sensor UV.

Após o término do tempo de exposição para cada grupo de amostras é realizada uma avaliação aos materiais para determinar as propriedades em função do tempo de exposição. Antes do ensaio de tração, estas são acondicionadas numa caixa de forma a não estarem expostas à radiação solar e a sua temperatura foi mantida à temperatura ambiente até que as suas propriedades sejam avaliadas. Estas propriedades são analisadas através dos ensaios de tração, onde os corpos de prova são ensaiados até à sua fratura. Todo o procedimento de ensaio será descrito no Capítulo seguinte.

Capítulo 6

Tratamento de Resultados e Análise

O cerne deste Capítulo é a análise dos resultados obtidos através dos ensaios acelerados de vida com a utilização do *software* ALTA para a obtenção de resultados de vida em condições normais de utilização. Para esta análise é necessário proceder-se ao tratamento dos dados inerentes aos ensaios acelerados de vida, para tal é referido o procedimento dos ensaios de tração e o tratamento dos resultados obtidos através dos mesmos na Secção 6.1 e 6.2, respetivamente. Dados estes que servirão para posterior introdução no *software* e obtenção dos parâmetros de vida em condições normais de utilização.

Para a obtenção dos dados de vida em condições normais de utilização é necessário ter conhecimento do IUV real a que uma amostra estaria exposta, pelo que este procedimento de aquisição da variação do IUV real na cidade de Lisboa no ano de 2016 também é referido neste Capítulo. Após estes temas é possível chegar ao foco deste projeto onde se realiza duas simulações de análise fiabilística utilizando o *software* ALTA.

6.1. Ensaio de Tração

Para analisar as propriedades mecânicas (módulo de elasticidade, tensão última e a força última) das amostras que foram expostas à radiação ultravioleta, optou-se pelo ensaio destrutivo mais conhecido, o ensaio de tração.

O ensaio de tração é um dos ensaios destrutivos mais utilizados, pois fornece dados para projeto sobre a resistência dos materiais ou pode ser utilizado para ensaios de controlo de qualidade de matérias ou produtos (Correia da Cruz and Carreira, 1992). Os resultados dos testes de tração são utilizados principalmente na seleção de materiais para aplicações em engenharia. Muitas vezes, as propriedades de tração encontram-se incluídas nas especificações de materiais

para garantir a qualidade dos mesmos. Estas propriedades são importantes para o desenvolvimento de novos materiais e produtos, podendo realizar comparações entre os diferentes materiais e produtos (Testing, 2004). A sua larga utilização deve-se à relativa facilidade de execução e à reprodutibilidade das propriedades determináveis.

O ensaio consiste em submeter um provete de geometria definida a um esforço crescente de tração aplicado continuamente até à rotura e em simultâneo registar o alongamento do provete em função da força aplicada (Correia da Cruz and Carreira, 1992).

Os equipamentos de ensaio consistem, na prática, em sistemas de fixação constituído por garras móveis que impõem ao provete uma deformação crescente e possuem sistemas que medem a força necessária a essa deformação (Correia da Cruz and Carreira, 1992). Os equipamentos de ensaio devem garantir um correto alinhamento dos provetes na máquina, pois apenas desse modo se assegura uma uniforme distribuição dos esforços axiais. Devem ainda evitar-se escorregamentos dos provetes nos dispositivos de fixação.

Para assegurar a reprodutibilidade de resultados, as condições e os procedimentos de ensaio estão de acordo com as normas ou especificações e deve-se registar, no relatório de ensaio, sempre que se verifique desvios.

Tendo em conta a norma ASTM D3039 que define o método de teste e as propriedades de tração de materiais compósitos de matriz polimérica. As amostras são colocadas nas garras de um equipamento de tração e carregadas de forma progressiva até à sua rotura. Com a monitorização do ensaio é possível obter a resposta tensão-extensão, tal como a tensão de rotura, módulo de elasticidade de tração e o coeficiente de *Poisson*. Existem muitos fatores que influenciam o teste do material em estudo, como o método de preparação do material, sequência de empilhamento, a preparação das amostras, o ambiente de teste, condicionamento das amostras, alinhamento das garras, velocidade de teste, temperatura, vazios na amostra, entre outros. O fabrico das amostras, os parâmetros, o procedimento de ensaio e a análise de resultados foram realizados segundo a norma ASTM D3039.

A velocidade do teste deve ser definida para obter uma taxa de deformação quase constante na secção de calibração. A taxa de deformação deve ser

selecionada de modo a produzir falhas entre o primeiro minuto e o décimo minuto após o início do ensaio. A velocidade definida pela norma para estas condições de teste é de 2 mm/min.

O ambiente de teste deve ser controlado e registado. As amostras devem ser armazenadas em ambiente condicionado até ao teste, se o ambiente de teste for diferente do ambiente de condicionamento.

Os modos de falha devem ser registados tal como na Figura 53 onde se encontram representados alguns modos de falha. Também é importante o registo da localização da falha nas amostras, esta deve ser registada tendo em conta o código referenciado na Tabela 11.

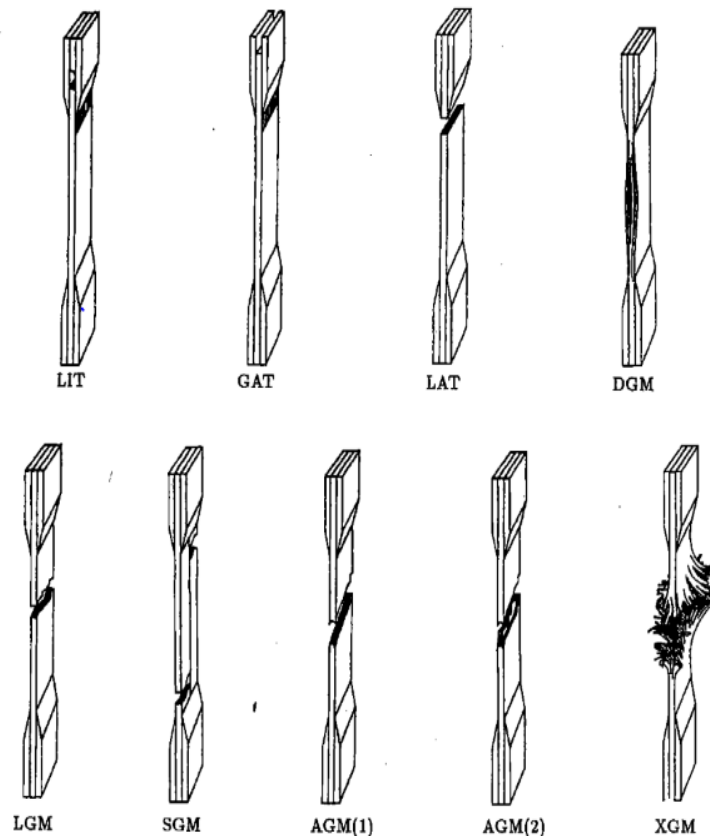


Figura 53 - Representação dos possíveis modos de falha (ASTM D3039).

Tabela 11 - Nomenclatura dos diferentes modos de falha (adaptado (ASTM D3039)).

Primeiro caracter		Segundo caracter		Terceiro caracter	
Modo de falha	Código	Área de falha	Código	Localização da falha	Código
Angulado	A	Dentro do tab	I	Inferior	B
Delaminação no eixo	D	No <i>tab</i>	A	Topo	T
Tab	G	Amostra	G	Esquerda	L
Lateral	L	Múltiplas áreas	M	Direita	R
Multi-modo	M(xyz)	Vários	V	Meio	M
Longa Divisão	S	Desconhecida	U	Vários	V
Explosivo	X			Desconhecida	U
Outro	O				

6.1.1. Equipamento de Tração

O equipamento de tração, utilizado para realizar os ensaios foi o equipamento disponibilizado pelo Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, designado por *Shimadzu Autograph AG-IS 20kN* como representado na Figura 54. Este equipamento tem a capacidade de carga máxima de 20 kN. Os ensaios de tração foram realizados tendo em conta a norma ASTM D3039 e a ISO 527-1 (1993).



Figura 54 - Equipamento de ensaio de tração Shimadzu.

O *software Trapezium2* foi desenvolvido para máquinas de teste da série *Autograph* de equipamentos de tração. Através deste *software* é possível obter a deslocação das garras em função da força de tração, e assim obter o gráfico

extensão-tensão para as amostras em teste, tal como representado na figura seguinte.

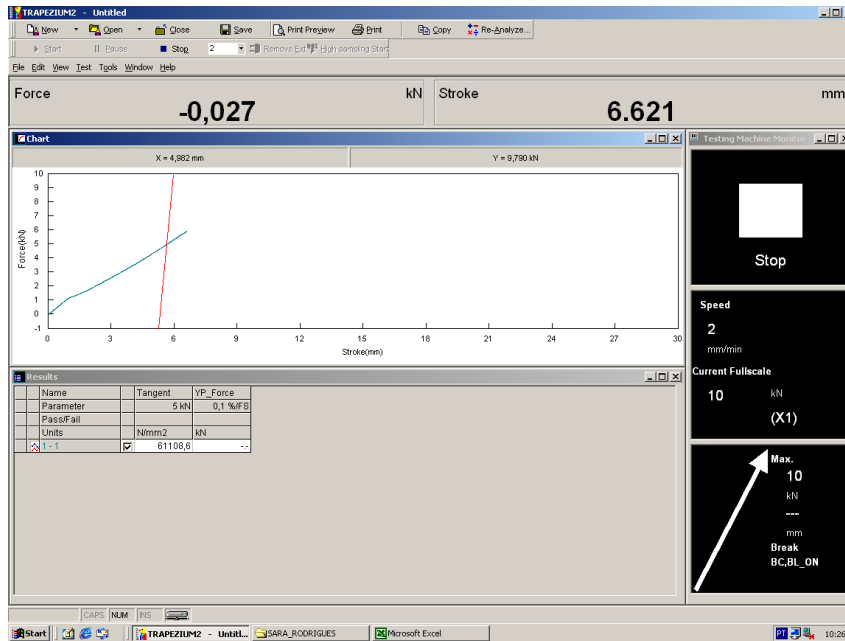


Figura 55 - Interface do software Trapezium 2.

Na Figura 56 está representado o ensaio de tração realizado a uma amostra.



Figura 56 - Ensaio de tração.

6.2. Tratamento dos resultados dos ensaios de tração

6.2.1. Teoria inerente aos ensaios de tração

O tratamento dos resultados dos ensaios de tração é realizado tendo em conta as normas ASTM D3039 e ISO 527-1 (1993) que definem os cálculos que se deve proceder para chegar às propriedades mecânicas conseguidas através destes ensaios.

Segundo a norma ISO 527-1 (1993) e ASTM D3039 é possível obter a resistência à tração, a tensão de tração, a extensão e o módulo de elasticidade. Os respetivos cálculos a proceder para a obtenção destes parâmetros são referidos nas seguintes secções.

6.2.1.1. Resistência à tração

A resistência à tração, também conhecida por força última de tração é dada pela divisão entre a carga máxima imediatamente antes da falha e a área de secção do provete.

$$F^{tu} = P^{max} / A_i \quad (6.1)$$

Em que F^{tu} representa a força de tração última, ou seja, a resistência à tração e exprime-se em MPa, P^{max} representa a carga máxima imediatamente antes da falha e A_i representa a área da secção transversal inicial, valor médio da área em três pontos do provete.

6.2.1.2. Tensão de tração

A tensão de tração em cada ponto com base na área inicial da secção transversal da amostra de teste é exprimida pela Equação (6.2).

$$\sigma_i = F_i / A_i \quad (6.2)$$

A tensão de tração (σ_i) em cada ponto exprime-se em MPa que resulta na divisão entre a força de tração registada em cada ponto (F_i) [N] pela área de secção transversal média (A_i) [mm²].

6.2.1.3. Extensão

Através das Equações (6.3) e Equação (6.4) é possível obter os valores da extensão para cada instante com base no comprimento entre os dispositivos de fixação do equipamento de tração.

$$\varepsilon_i = \Delta L / L_i \quad (6.3)$$

$$\varepsilon_i(\%) = 100 \cdot \Delta L / L_i \quad (6.4)$$

Onde, ε_i representa a extensão nominal de tração em cada ponto, expressa como uma proporção ou proporção adimensional, L_i indica a distância inicial entre garras [mm] e ΔL representa o aumento da distância entre garras [mm].

6.2.1.4. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade ou módulo de *Young* é calculado com base em duas extensões específicas, como representado na Equação (6.5).

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (6.5)$$

Em que E_t representa o módulo de elasticidade de *Young*, expresso em MPa. A tensão σ_1 representa a tensão quando o valor da deformada é igual a 0,0005 ($\varepsilon_1 = 0,0005$) e a tensão σ_2 representa a tensão quando o valor da deformada é igual a 0,0025 ($\varepsilon_2 = 0,0025$) estas tensões exprimem-se em *MPa (Megapascal)*.

6.2.2. Ensaio 1 - 0h de Exposição

Inicialmente foi realizada a primeira análise de tração das amostras que não sofreram qualquer exposição à radiação UV. Este ensaio preliminar foi realizado para obter as características das amostras, tal como, o módulo de elasticidade a tensão última e a força última antes de qualquer exposição à radiação ultravioleta. Na Tabela 12 são apresentados os resultados dos ensaios de tração para as propriedades em estudo para cada amostra e os respetivos modos de falha. As propriedades presentes na seguinte tabela foram obtidas através das equações descritas no Capítulo 6.2.1.

Tabela 12 - Propriedades mecânicas das amostras não expostas à radiação solar.

Amostras	E_t [MPa]	Tensão última [MPa]	Força última [N]	Modos de falha
T09	3397,95	90,76	4155,31	AGT
T10	3547,75	97,85	5375,31	AGT
T11	3643,98	117,08	5538,44	AGI
T12	2828,89	116,31	6776,88	AGI
T13	3031,46	108,67	6776,88	AGM
Média	3290,01	106,13	5724,56	-

Os seguintes gráficos representados nas Figura 57, Figura 58, Figura 59, Figura 60 e Figura 61, as curvas tensão-extensão das amostras ensaiadas não expostas à radiação solar. Verifica-se que o comportamento da curva era o esperado, pois tratando-se de um material compósito não apresenta a zona plástica. O comportamento mecânico dos materiais compósitos é classificado, de forma geral, como linear elástico, pelo que a sua curva tensão-extensão caracteriza-se por uma reta. A falha ocorre quando a tensão máxima é atingida.

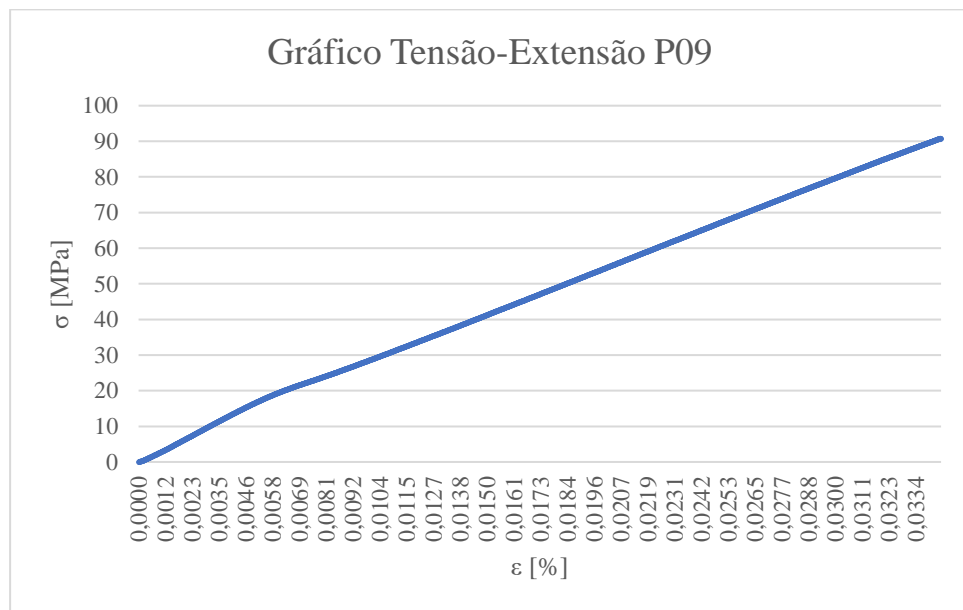


Figura 57 - Gráfico tensão-extensão da amostra P09.

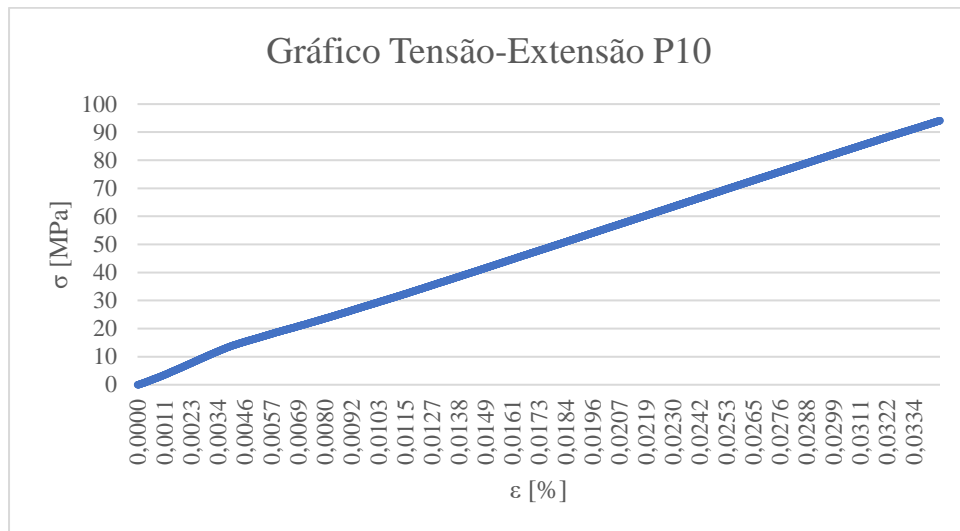


Figura 58 - Gráfico tensão-extensão P10.

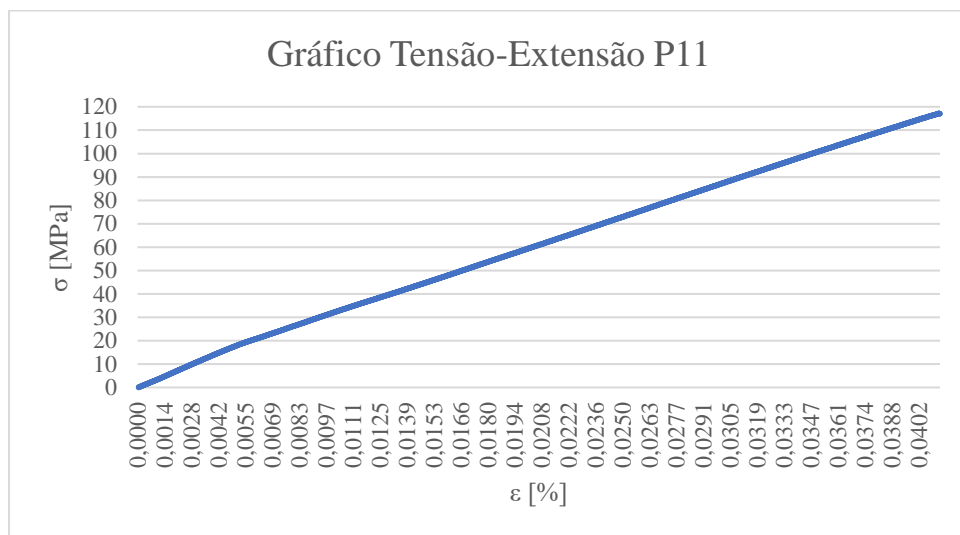


Figura 59 - Gráfico tensão-extensão P11.

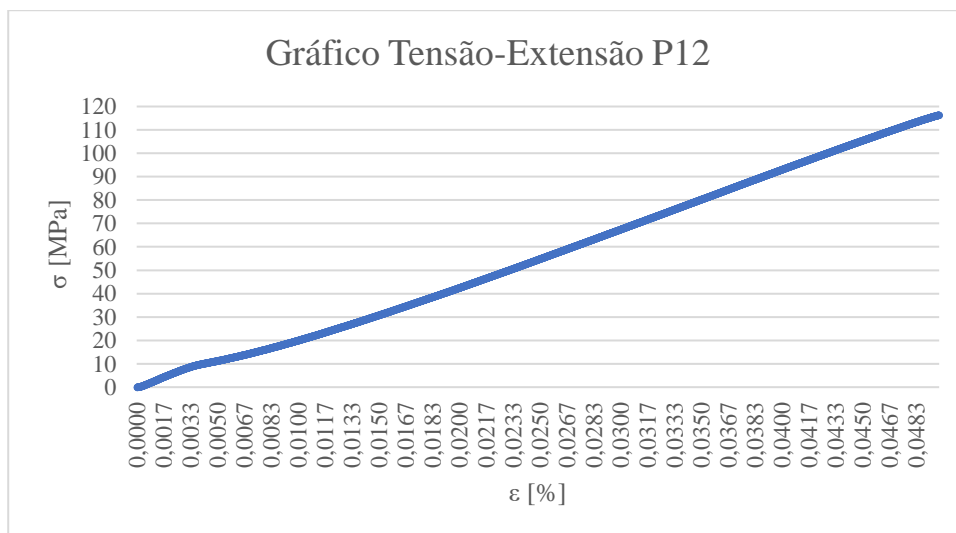


Figura 60 - Gráfico tensão-extensão P12.

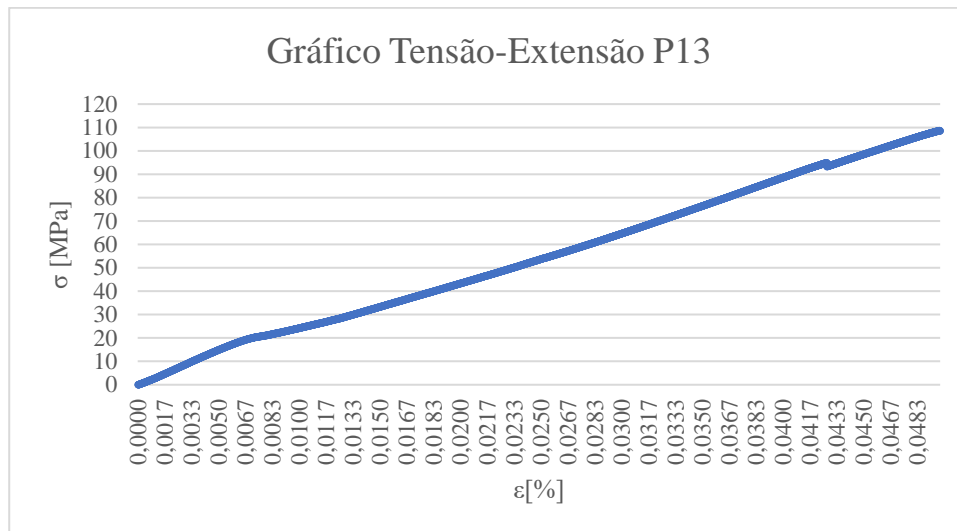


Figura 61 - Gráfico tensão-extensão P13.

Na Figura 62 estão representados os provetes após o ensaio de tração, tendo em conta a Figura 53 e a Tabela 11 foi possível analisar os modos de falha de cada provete.



Figura 62 - Amostras após ensaio tração não expostas à radiação UV.

Analisando a Figura 62, verifica-se que os modos de falha ocorrem angularmente ao provete, pelo que o primeiro carácter é representado pela letra A. As fissuras ocorreram dentro da área entre as garras do dispositivo de fixação pelo que o segundo dígito é expresso pelo carácter G. Por fim, a última letra representa a localização da falha, T quando a falha ocorre no topo, I quando a falha ocorre na

parte inferior e M quando a falha ocorre a meio do provete. Estes modos de falha encontram-se referidos na Tabela 12.

6.2.3. Ensaio 2 - 32h de Exposição

O segundo ensaio foi realizado às amostras que estiveram trinta e duas horas expostas às condições de teste especificadas. Na Tabela 13 são apresentados os resultados dos ensaios de tração para as propriedades em estudo para cada amostra e os respetivos modos de falha.

Tabela 13 - Propriedades mecânicas das amostras expostas à radiação solar durante 32h.

Amostras	E_t [MPa]	Tensão última [MPa]	Força última [N]	Modos de falha
T06	3054,28	95,23	5402,81	LGT
T07	3440,32	124,55	6912,50	LGI
T08	3440,32	99,76	5337,19	LGT
T14	3098,61	91,34	3790,63	LGI
T15	2952,81	85,88	4208,13	LGT
Média	3197,26	99,35	5130,25	-

Os gráficos tensão-extensão relativos a estas amostras encontram-se no Anexo C1.

A análise dos modos de falha é realizada de forma idêntica às amostras do ensaio anterior. Na Figura 63 é possível contemplar os diferentes modos de falha que ocorreram nas amostras em análise.



Figura 63 - Amostras após ensaio de tração (32h de exposição.).

Para este grupo de amostras, a falha de todas as amostras ocorreu de forma lateral (perpendicular ao comprimento da amostra) representado pelo carácter L, ocorreu também dentro da área entre as garras do dispositivo de fixação G, sendo a sua localização em algumas amostras na parte inferior da amostra B e noutras na parte superior T. Estes modos de falha estão descritos na Tabela 13.

6.2.4. Ensaio 3 - 64h de Exposição

O ensaio número três foi realizado às amostras que estiveram sessenta e quatro horas expostas às condições de teste definidas previamente. Na Tabela 14 são apresentados os resultados dos ensaios de tração para as propriedades em estudo para cada amostra e os respetivos modos de falha.

Tabela 14 - Propriedades mecânicas das amostras expostas à radiação solar durante 64h.

Amostras	E_t [MPa]	Tensão última [MPa]	Força última [N]	Modos de falha
T16	2970,68	94,10	3810,94	LGI
T17	2772,34	89,44	3775,63	AGI
T18	2772,34	77,56	3350,63	LGI
T19	3472,22	91,32	3780,63	AGI
T20	3492,36	88,91	3918,13	AGT
Média	3095,99	88,27	3727,19	-

Os gráficos tensão-extensão relativos a estas amostras encontram-se no Anexo C2.

Na Figura 64 estão representados os provetes após o ensaio de tração, onde é visível os seus modos de falha.



Figura 64 - Amostras após ensaio de tração (64h de exposição.).

Para algumas das amostras os seus modos de falha ocorrem angularmente ao provete e noutros linearmente, pelo que o primeiro carácter é representado por A ou L respetivamente. As fissuras ocorreram na área entre as garras do dispositivo de fixação pelo que o segundo carácter é expresso pela letra G. O último carácter representa a localização da falha, T quando a falha ocorre no topo da amostra, I quando a falha ocorre na parte inferior da amostra e M quando a falha ocorre a meio do provete. Estes modos de falha encontram-se referidos na Tabela 14.

6.2.5. Ensaio 4 - 96h de Exposição

O quarto ensaio foi realizado às amostras que estiveram noventa e seis horas expostas às condições de teste especificadas. Na Tabela 15 são apresentados os resultados dos ensaios de tração para as propriedades em estudo para cada amostra e os respetivos modos de falha.

Tabela 15 - Propriedades mecânicas das amostras expostas à radiação solar durante 96h.

Amostras	E_t [MPa]	Tensão última [MPa]	Força última [N]	Modos de falha
T21	2998,32	82,11	3661,88	LAI
T22	3127,89	81,73	3655,63	LGT
T23	3273,27	86,43	3632,81	LGM
T24	2967,87	90,21	4206,88	LGT
T25	2924,59	83,80	4334,06	LGT
Média	3058,39	84,86	3898,25	-

Os gráficos tensão-extensão relativos a estas amostras encontram-se no Anexo C3.

Ao analisar a Figura 65, onde estão representados os provetes após o ensaio de tração, verificou-se que os seus modos de falha ocorrem linearmente ao provete, pelo que o primeiro carácter é representado por L.



Figura 65 - Amostras após ensaio de tração (96h de exposição).

No provete P21 a fissura ocorreu na zona de fixação da garra inferior, pelo que a segunda letra é definida por A. Nas restantes amostras as fissuras ocorreram na área entre as garras do dispositivo de fixação pelo que o segundo dígito é exprimido pela letra G. O último carácter representa a localização da falha, T quando a falha ocorre no topo da amostra, I quando a falha ocorre na parte inferior da amostra e M quando a falha ocorre a meio do provete. Estes modos de falha encontram-se referidos na Tabela 15.

6.2.6. Ensaio 5 - 128h de Exposição

O quinto e último ensaio foi realizado às amostras que estiveram cento e vinte e oito horas expostas às condições de teste especificadas. Na Tabela 16 são apresentados os resultados dos ensaios de tração para as propriedades em estudo para cada amostra e os respetivos modos de falha.

Tabela 16 - Propriedades mecânicas das amostras expostas à radiação solar durante 128h.

Amostras	E_t [MPa]	Tensão última [MPa]	Força última [N]	Modos de falha
T01	3066,89	71,17	3950,00	LAI
T02	3022,12	70,87	3839,38	LAI
T03	3001,80	78,76	3888,75	AGT
T04	2898,61	85,35	5070,94	AAT
T05	2981,95	74,07	4183,13	LAI
Média	2994,274	76,04	4186,44	-

Os gráficos tensão-extensão relativos a estas amostras encontram-se no Anexo C4.

Ao analisar a Figura 66, onde estão representados os provetes após o ensaio de tração, verificou-se que os modos de falha ocorreram linearmente ao provete, pelo que o primeiro carácter é representado por L.



Figura 66 - Amostras após ensaio de tração (128h de exposição.).

Neste ensaio, tal como no ensaio anterior, os provetes P01, P02, P04 e P05 a fissura ocorreu na zona de fixação da garra, pelo que o segundo carácter é definido por A. Na restante amostra a fissura ocorreu na área entre as garras do dispositivo de fixação pelo que o segundo dígito é exprimido pela letra G. O último carácter representa a localização da falha, T quando a falha ocorre no topo da amostra, I quando a falha ocorre na parte inferior da amostra e M quando a falha ocorre a meio do provete. Estes modos de falha encontram-se referidos na Tabela 16.

6.2.7. Resultados Finais

Após a realização dos ensaios de tração e de obter as propriedades mecânicas das amostras para os diferentes tempos de exposição às condições de teste, é possível fazer uma análise dos resultados obtidos. Na Tabela 17 estão apresentados os diferentes valores da tensão última obtidos para as diferentes amostras em função do tempo de exposição.

Tabela 17 - Resultados da tensão última para os diferentes tempos de exposição.

Tempo de Exposição [h]	Tensão última [MPa]					Média [MPa]	Desvio Padrão [MPa]	Variação [%]
0	90,76	97,85	117,08	116,31	108,67	106,13	11,02	-
32	95,23	124,55	99,76	91,34	85,88	99,35	13,40	6,39
64	94,10	89,44	77,56	91,32	88,91	88,27	5,65	16,83
96	82,11	81,73	86,43	90,21	83,80	84,86	3,15	20,04
128	71,17	70,87	78,76	85,35	74,07	76,04	5,45	28,35

Na Tabela 17 é também apresentado a média dos valores da tensão última para cada tempo de exposição, bem como o seu desvio padrão. Na última coluna é apresentado a variação em percentagem dos valores médios da tensão última face ao valor médio da tensão última para as amostras que não estiveram expostas à radiação UV (zero horas de exposição).

Analisando os valores médios para cada tempo de exposição, verifica-se que o aumento do tempo de exposição à radiação UV conduziu a uma diminuição da resistência estática sob solicitações de carga de tração na ordem dos 6,4 % a 28,35 % em relação às amostras não expostas às condições de teste.

Na Figura 67 está representado o decréscimo da tensão última das amostras quando estas são expostas à radiação UV.

Através da Tabela 17 e da Figura 67 é possível analisar a degradação da tensão última do material com a exposição à radiação UV. Com o aumento do tempo de exposição à radiação solar simulada pelas lâmpadas de radiação UV verifica-se que a resistência mecânica diminui progressivamente, ou seja, o provete quebra em forças de tração menores com o aumento do tempo de exposição.

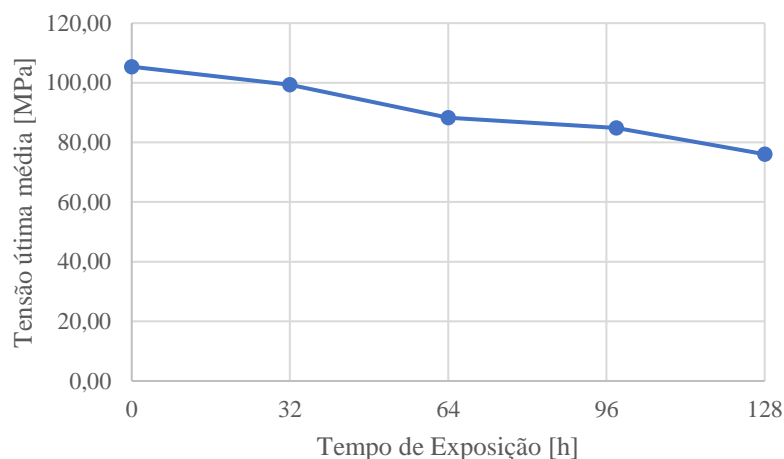


Figura 67 - Alteração da tensão última das amostras em função do tempo de exposição.

Apesar da tensão última não depender diretamente da matriz, pois a resistência do material é proporcionada pelas fibras, é a matriz a responsável por fazer a transmissão dos esforços para as fibras. Tendo em conta os resultados obtidos verifica-se que as amostras após estarem expostas a um determinado tempo de exposição ocorre uma degradação da resistência do material a esforços de tração. Considerando que as amostras produzidas com manta de fibra de vidro e matriz epoxídica são isotrópicas, ou seja, as suas propriedades não dependem da direção. A diminuição das propriedades pode ser justificada pela presença de microfissuras de superfície induzidas pela exposição á radiação UV. As amostras expostas cento e vinte e oito horas à radiação UV apresentam um decréscimo de 28,35% da tensão última.

Na Figura 68 está representado o decréscimo da tensão última e os respetivos valores do desvio padrão para cada tempo de exposição. Verifica-se que existe uma grande discrepância dos valores para cada tempo de exposição, esta discrepância pode ser justificada pelo facto da área da secção transversal diferir de amostra para amostra, pois ao efetuar o corte das mesmas não foi possível obter exatamente as mesmas dimensões.

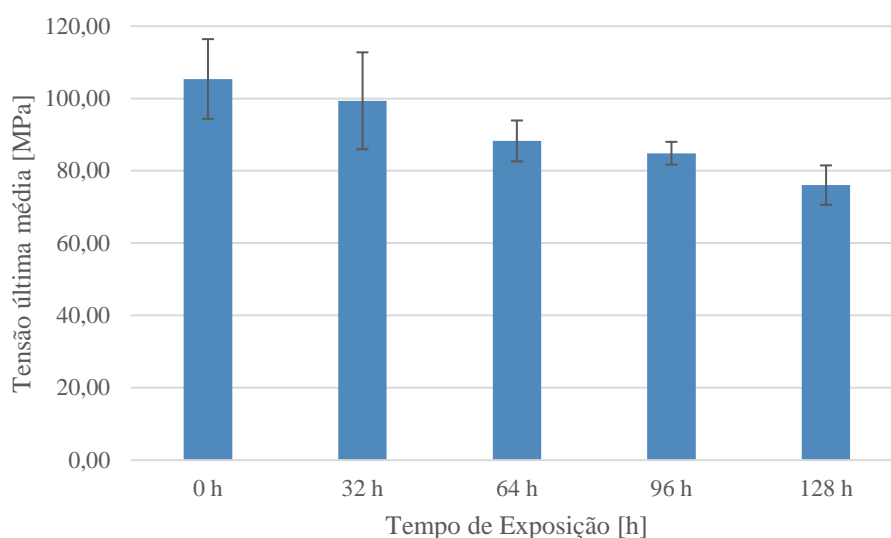


Figura 68 - Resistência do material a cargas de tração.

Foi também analisado o módulo de elasticidade para as diferentes amostras estudadas, na Tabela 18 encontram-se os diferentes módulos de elasticidade obtidos para os diferentes tempos de exposição assim com a média e o desvio padrão para cada tempo de exposição.

Tabela 18 - Resultados do módulo de elasticidade para os diferentes tempos de exposição.

Tempo de Exposição [h]	Módulo de Elasticidade [MPa]					Média [MPa]	Desvio Padrão [MPa]	Variação [%]
0	3399,15	3501,40	3623,39	2842,53	3014,14	3276,12	297,70	-
32	3054,28	3440,32	3440,32	3098,61	2952,81	3197,26	204,00	2,41
64	2970,68	2772,34	2772,34	3472,22	3492,36	3095,99	323,68	5,50
96	2998,32	3127,89	3273,27	2967,87	2924,59	3058,39	127,05	6,65
128	3066,89	3022,12	3001,80	2898,61	2981,95	2994,274	55,51	8,60

Tal como acontece com a tensão última, o módulo de elasticidade reduz com o tempo de exposição tendo em conta o valor médio. Tal como presente na última coluna da Tabela 18 após cento e vinte horas de exposição à radiação UV, ocorre uma variação de 8,60% do módulo de elasticidade quando comparado com o valor para as zero horas de exposição. Como na análise feita anteriormente, o módulo de elasticidade também não depende diretamente na degradação que ocorre na matriz provocada pela radiação UV. Esta diminuição é provocada pela foto-oxidação conseguida pela radiação UV. Na Figura 69 é possível verificar a

degradação do módulo de elasticidade das amostras em função do tempo de exposição à radiação UV.

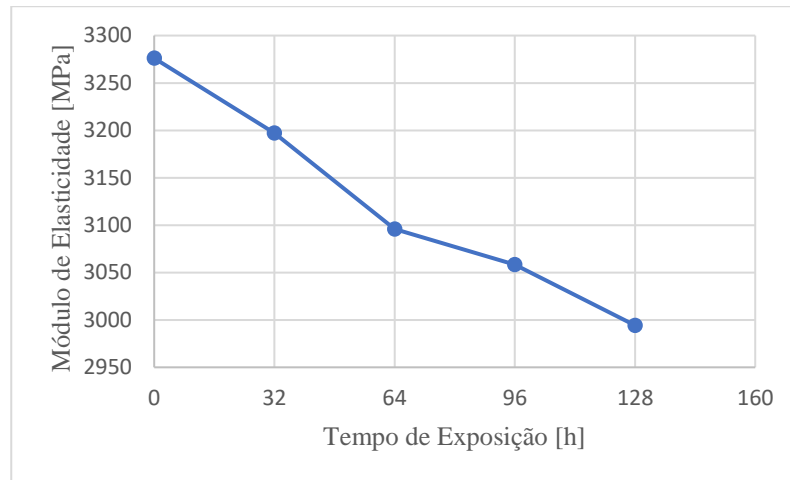


Figura 69 - Alteração do Módulo de Elasticidade das amostras em função do tempo de exposição.

Na Tabela 18 e na Figura 70 encontra-se representado o decréscimo do módulo de elasticidade e os respetivos valores do desvio padrão para cada tempo de exposição. Verifica-se que existe uma grande discrepância dos valores para cada tempo de exposição, tal como ocorre para a tensão última. Esta discrepância pode ser justificada pelo facto da área da secção transversal diferir de amostra para amostra, pois ao efetuar o corte das mesmas não foi possível obter exatamente as mesmas dimensões.

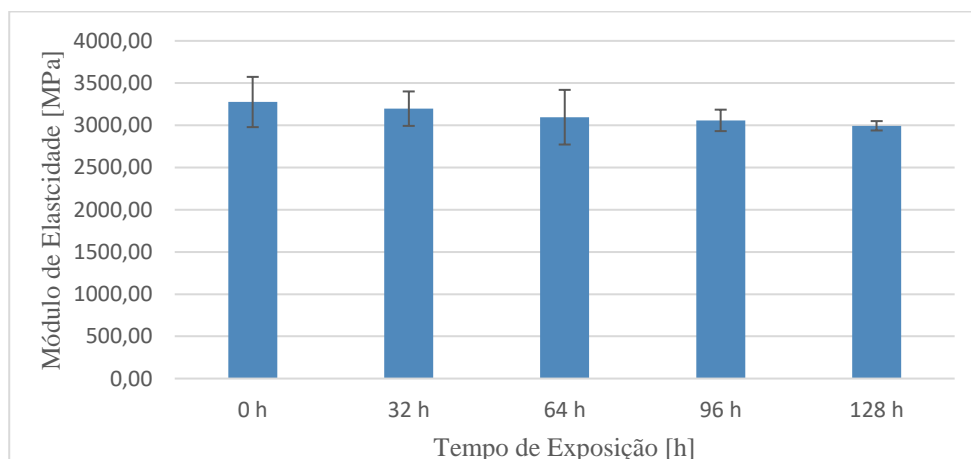


Figura 70 - Variação do Módulo de Elasticidade ao longo do tempo de exposição.

Outra grande alteração que também se verificou no material foi a mudança da sua cor. Esta mudança de cor é provocada pela foto-oxidação conseguida pela radiação UV que degrada a resina epoxy tornando-a menos resistente. Ao longo

dos diferentes tempos de exposição verificou-se uma mudança significativa da cor das amostras, tal fenómeno pode ser verificado na Figura 71.



Figura 71 - Comparação entre amostras.

Na Figura 71 está representado (da direita para a esquerda) a amostra que não esteve exposta à radiação solar, a amostra exposta a trinta e duas horas; a amostra exposta a sessenta e quatro horas; a amostra exposta a noventa e seis horas e a última amostra exposta a cento e vinte e oito horas à radiação UV.

6.3. Índice UV Real

Para realizar a extrapolação dos valores obtidos no ensaio acelerado para as condições normais de utilização é necessário ter conhecimento da variação do IUV real ao longo do ano. Para obter esta variação foi contactado o IPMA para a colaboração neste projeto quanto à disponibilidade de dados relativos ao IUV na cidade de Lisboa durante o ano de 2016. Para este efeito foi solicitado o pagamento de uma quantia correspondente ao pagamento do serviço relacionado com a disponibilização dos dados, valor este muito elevado, pelo que foi necessário partir para outro plano.

Através do *site* (<https://fastrt.nilu.no/fastrt-ez.html>), foi possível simular o IUV nos diferentes meses do ano, definindo as condições meteorológicas da estação do ano. Para obter o valor pretendido é necessário definir a cidade ou a latitude e longitude do local onde se pretende realizar a análise. Como a quantidade

de radiação que atinge uma superfície depende do tipo de superfície e da sua altitude estes parâmetros também podem ser definidos neste simulador. É ainda necessário definir o mês, o dia, a hora e os minutos, como as condições atmosféricas (existência de nuvens, céu nublado e/ou chuviscos) e a espessura da camada do ozono. O simulador apresenta a seguinte interface (Figura 72), bastante interativo que permite a escolha simples de todos os parâmetros que definem o IUV.

Foram realizadas diversas simulações ao IUV para os diferentes meses do ano a diferentes horas do dia com as respetivas condições atmosféricas para a cidade de Lisboa. As condições definidas encontram-se na seguinte tabela:

Tabela 19 - Condições de simulação.

Condições de Simulação		
Mês	janeiro a dezembro	
Dia	1 a 31 de cada mês	
Hora	0h às 24h de cada dia	
Latitude	38°42'	
Longitude	9°00'	
Altitude	2 m	
Espessura da camada do ozono	Normal	
Condições atmosféricas	janeiro-março	Chuva
	abril-agosto	Céu limpo
	setembro-dezembro	Chuva
Tipo de Superfície	janeiro-março	Cimento Húmido
	abril-agosto	Cimento Seco
	setembro-dezembro	Cimento Húmido

UV radiation level computations

Alternative services: <http://nadir.nilu.no/~olaeng/fastrt/fastrt-ez.html> and <http://zardoz.nilu.no/~olaeng/fastrt/fastrt-ez.html>

Version 2.2, Copyright © 2003 Ola Engelen
Norwegian Institute for Air Research, Email: ola.engelen@nilu.no
[Press here to reach a more extensive version](#)

Time and location

Month: Sep Day: 20 Hours (British time): 10 Minutes: 00

City: Rome

Latitude (degs N): 38,42 Longitude (degs E): 9

Sky condition: Cloudless

Ozone layer thickness: Normal

Surface altitude: 0.150 km. Range [0.0-6.0] km

Surface type: Sand

[Press here to get UV radiation level](#) [Reset form](#)

Figura 72 - Interface do simulador online do IUV.

Através destas condições foi possível obter o IUV para cada mês e por consequência gerar a Figura 73 que representa a variação do IUV na cidade de Lisboa ao longo do ano de 2016.

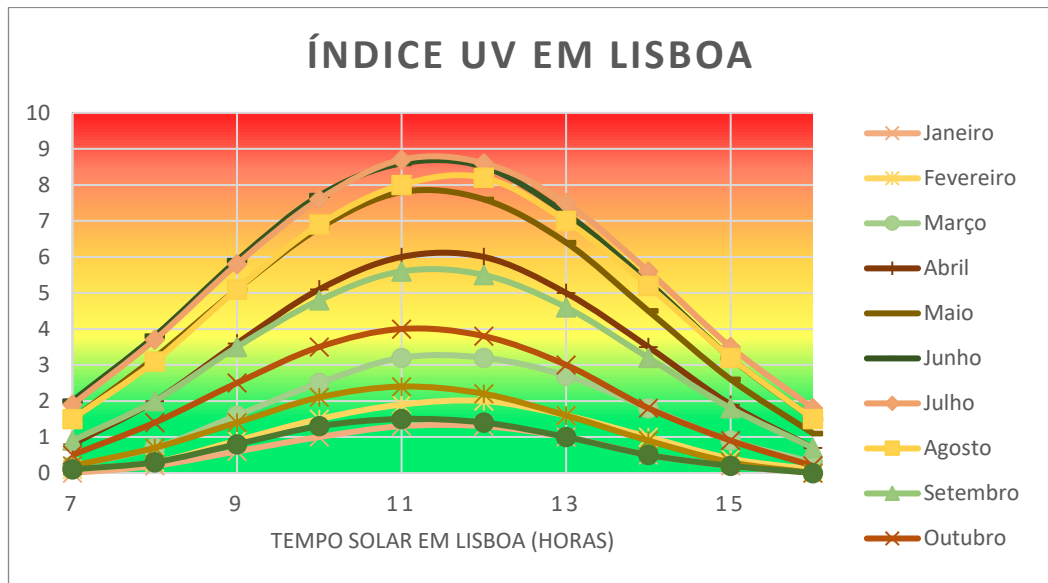


Figura 73 - Variação do índice UV na cidade de Lisboa durante o ano de 2016.

Foram obtidos os valores médios do Índice UV para cada mês e a média para o ano de 2016, estes valores encontram-se compilados na Tabela 20.

Tabela 20 - Tabela Resumo dos valores médios do IUV.

Índice UV			
Média Janeiro	0,25	Média Agosto	2,20
Média Fevereiro	0,41	Média Setembro	1,40
Média Março	0,73	Média Outubro	0,90
Média Abril	1,48	Média Novembro	0,50
Média Maio	2,04	Média Dezembro	0,30
Média Junho	2,40	Média de 2016	1,25
Média Julho	2,40		

O valor utilizado para a análise realizada neste projeto foi a irradiação UV média do ano de 2016 para que possa ser comparada com a intensidade da radiação das lâmpadas de emissão de UV. Pelo que de forma simplificada, o valor da radiação UV médio do ano de 2016 é dado pela Equação (6.6).

$$S_{\lambda} = \frac{1,25}{40} = 0,03 \text{ W/m}^2 \quad (6.6)$$

É de salientar que estes valores são aproximados, pois foram obtidos através de um simulador disponível *online*, podendo não ser os mais próximos da realidade.

6.4. Ensaios Acelerados de Vida no ALTA

Nesta Secção irá realizar-se uma análise fiabilística utilizando metodologias gráficas para obtenção dos parâmetros fiabilísticos tendo em conta o caso de estudo em análise. Para tal recorreu-se ao *software* ALTA 11. Através da inserção dos dados dos testes acelerados de vida, obtidos na Secção 6.2, e utilizando o modelo adequado é possível obter os valores pretendidos.

A análise fiabilística será realizada tendo em conta duas abordagens. A primeira abordagem visa a implementação do modelo da Lei da Potência Inversa, onde se considera a radiação UV como uma variável de solicitação. A segunda abordagem passa pela utilização do modelo Térmico Não-Térmico que considera duas variáveis de solicitação neste caso a temperatura e a radiação UV. Nesta secção será descrita a metodologia utilizada na realização das duas abordagens.

6.4.1. Metodologia

O *software* ALTA é um software projetado para realizar análise quantitativa de dados obtidos em ensaios acelerados de vida (QALT). Permite a introdução de diversos tipos de dados obtidos através de testes acelerados de vida, tais como conjuntos de tempos até à falha de um determinado bem, conjuntos de dados de suspensão de testes acelerados de vida, ou de ambos. Permite ainda escolher uma ou diversas variáveis de aceleração utilizadas nos testes, como a tensão elétrica, humidade, carga entre outras.

Por vezes os bens apresentam uma Fiabilidade tão elevada que nem com os ensaios acelerados de vida é possível produzir falhas significativas para estimar a Fiabilidade dos produtos num curto período de tempo ou por vezes o tempo disponível para a realização dos mesmos é tão reduzido que não é possível obter as falhas no tempo estipulado. Pelo que a análise da degradação é uma ferramenta muito eficaz de análise da Fiabilidade para produtos que estão associados a uma característica de desempenho mensurável, em que se considera que o bem falhou

quando o valor de degradação atinge um nível crítico predefinido. Através da análise da degradação é possível extrapolar os tempos de falha com base nos dados de degradação medidos durante o teste de degradação. Com esta análise é possível obter a Fiabilidade do produto em condições normais de utilização através dos dados dos testes acelerados de vida.

A metodologia utilizada neste método de análise foi a seguinte:

- Escolha da análise mais adequada;
- Definição das variáveis de solicitação e dos seus valores de utilização em condições normais de operação;
- Inserção dos dados obtidos nos ensaios acelerados de vida;
- Seleção da distribuição estatística;
- Seleção do modelo de degradação;
- Escolha do modelo de extrapolação;
- Determinação dos diversos parâmetros característicos do modelo de extrapolação;
- Determinação das diferentes propriedades fiabilísticas para condições normais de operação ou em condições aceleradas.

Nos seguintes pontos será aplicada esta metodologia às duas abordagens que se pretende estudar.

6.4.2. Primeira Abordagem (Modelo da Lei da Potência Inversa)

Nesta primeira abordagem pretende-se implementar a análise de dados de degradação destrutiva acelerada, considerando como variável de aceleração a radiação UV. Como a variável de aceleração é uma solicitação mecânica são aplicadas as expressões características do modelo da Lei da Potência Inversa para extrapolar os dados de vida em condições normais de utilização. Em seguida são descritas todas as etapas de análise no ALTA para obter os dados necessários.

6.4.2.1. Seleção da análise mais adequada

Ao iniciar um novo projeto no ALTA 11 é apresentada uma panóplia de diferentes ensaios acelerados que é possível realizar com este *software* (Figura 74).

Para que seja possível introduzir corretamente os dados é indispensável a personalização do *software* face ao tipo de dados que se pretende analisar. Neste caso estamos perante dados de degradação acelerada pelo que se deve seleccionar a componente correspondente a estes dados, a degradação. Dentro deste campo, relativamente aos ensaios acelerados de vida, temos duas opções:

- Degradação acelerada não destrutiva;
- Degradação acelerada destrutiva

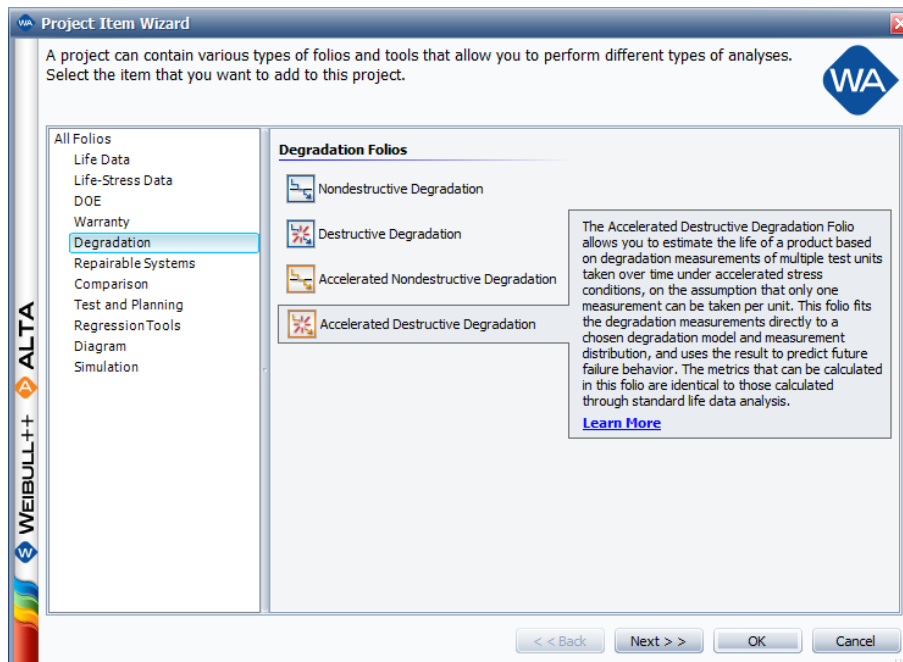


Figura 74 - Seleção do tipo de ensaio de degradação.

Tendo em conta o tipo de dados obtidos com os testes acelerados de vida, a análise correspondente é a análise da degradação acelerada destrutiva. Neste caso não é possível obter as propriedades mecânicas das amostras para os diferentes tempos de exposição com a mesma amostra, pois ao realizar o ensaio de tração para obter as propriedades este destrói a amostra de teste impossibilitando a sua reutilização. Ou seja, esta análise aplica-se aos casos em que a amostra é destruída para obter a sua degradação. Pelo que são necessárias múltiplas amostras para o estudo. Esta análise é muito semelhante à análise dos testes de vida acelerados (ALTA), neste caso a solicitação utilizada no ALTA torna-se o tempo, enquanto que a variável aleatória corresponde à medida de degradação em vez do tempo até à falha (Reliasoft Corporation, 2015).

Após a seleção do tipo de análise, é necessário definir quais as variáveis de solitação que foram consideradas neste ensaio e qual o seu valor em condições normais de utilização como na Figura 75.

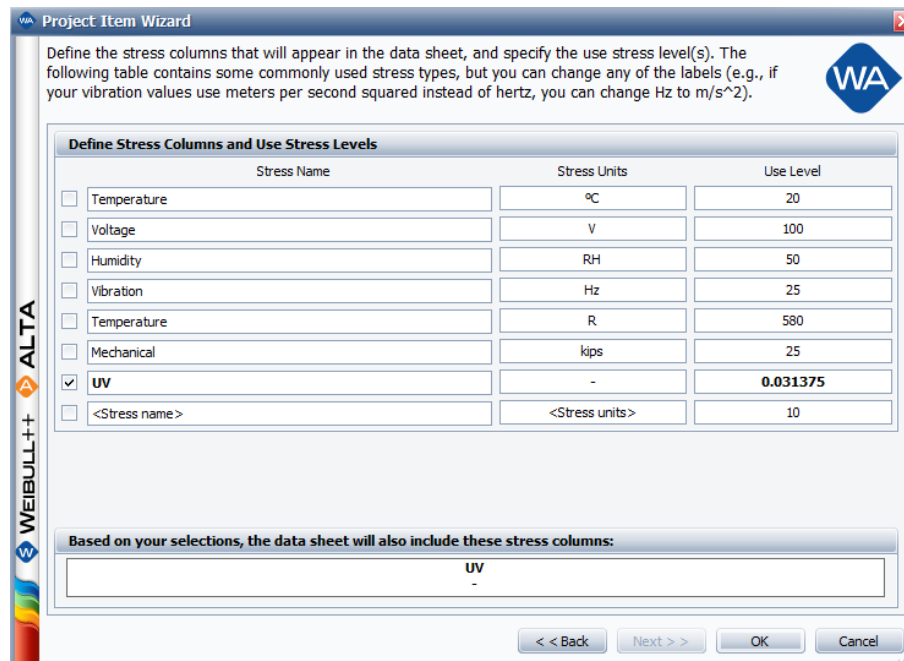


Figura 75 - Definição das variáveis de solitação.

Neste primeiro ensaio estamos na presença de uma variável de solitação, a radiação UV e o seu valor para condições normais de operação assume o valor de $0,03 \text{ W/m}^2$.

6.4.2.2. Inserção dos dados do ensaio acelerado de vida

Após a personalização do *software* para o tipo de dados, o passo seguinte é a inserção dos dados obtidos através dos testes acelerados de vida no *software*.

Os dados a introduzir no ALTA são os resultados apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Dados a inserir no software ALTA.

Tempo de Exposição [h]	Tensão última [MPa]				
32	95,23	124,55	99,76	91,34	85,88
64	94,10	89,44	77,56	91,32	88,91
96	82,11	81,73	86,43	90,21	83,80
128	71,17	70,87	78,76	85,35	74,07

No *software* é apresentado uma tabela que corresponde à janela inicial do *software* onde se deve proceder à inserção dos dados obtidos nos ensaios acelerados tal como esquematizado na Figura 76.

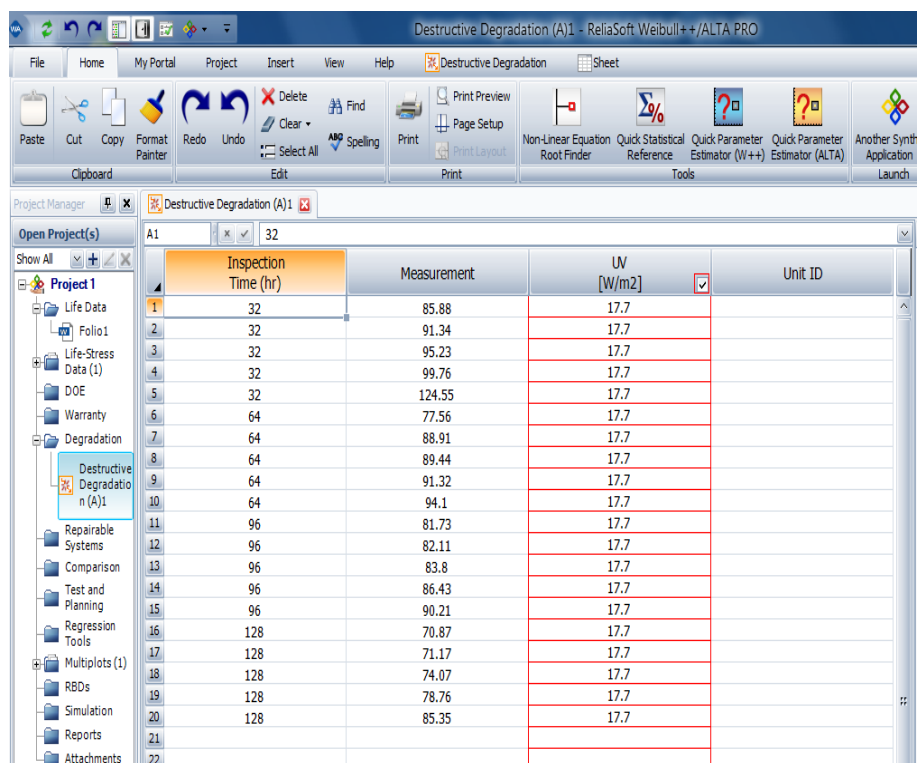


Figura 76 - Inserção dos dados no software.

Na primeira coluna são colocados os tempos em que foram feitas as leituras das propriedades mecânicas das amostras expostas à radiação UV. Na coluna seguinte são introduzidas as propriedades mecânicas das amostras obtidas através dos ensaios de tração. Nas colunas seguintes são inseridos os valores das variáveis de solicitação aplicadas nos ensaios acelerados, neste caso como apenas consideramos a radiação UV apenas temos uma coluna.

6.4.2.3. Seleção da distribuição estatística

O passo seguinte na análise de degradação destrutiva envolve a seleção de uma distribuição estatística para representar a variabilidade de uma medida de degradação num determinado momento, podem ser utilizadas as distribuições referidas na Secção 2.6.

Tal como na análise dos testes acelerados de vida, o pressuposto é que o parâmetro de localização da distribuição das leituras de degradação mude com o tempo enquanto o parâmetro de forma permanecerá constante. Desta forma, para a distribuição de *Weibull* o parâmetro $\ln(\eta)$ é função do tempo enquanto que β se mantém constante ao longo do mesmo. O mesmo acontece para a distribuição Exponencial em que $\ln(MTBF)$ é função do tempo. Para a distribuição Normal o parâmetro μ é função do tempo enquanto que σ mantém-se constante. Para a distribuição Lognormal, o parâmetro μ' é variável com o tempo enquanto que σ' mantém-se constante.

Para determinar qual a distribuição estatística que melhor caracteriza os dados utilizados é necessário recorrer à ferramenta “*Distribution Wizard*” onde o programa realiza vários testes de aderência entre as diversas distribuições existentes para determinar qual a que melhor se adequa ao conjunto de dados inseridos.

O assistente de distribuição realiza três testes de aderência para determinar a classificação para cada distribuição, os testes são:

- Teste de *Kolmogorov-Smirnov* (GOF);
- Teste de coeficiente de correlação (PLOT);
- Teste do valor de probabilidade (LKV).

Em que a define os valores obtidos por (GOF), b os valores obtidos por (PLOT) e $LK Value$ os valores obtidos por LKV.

Ao seleccionar o assistente de distribuição é possível seleccionar as distribuições que se pretende incluir no teste de aderência. As distribuições serão classificadas de 1 a 5 de acordo com a forma como elas se adequam aos dados, sendo a classificação de 1 o modelo que melhor se adapta aos mesmos. Tendo em conta os dados obtidos nos ensaios acelerados, o modelo Lognormal é a distribuição sugerida pelo assistente como aquela que melhor se ajusta aos dados

introduzidos (Figura 77). Ao selecionar “implementar” a distribuição com a classificação de 1 é imediatamente selecionada para o estudo.

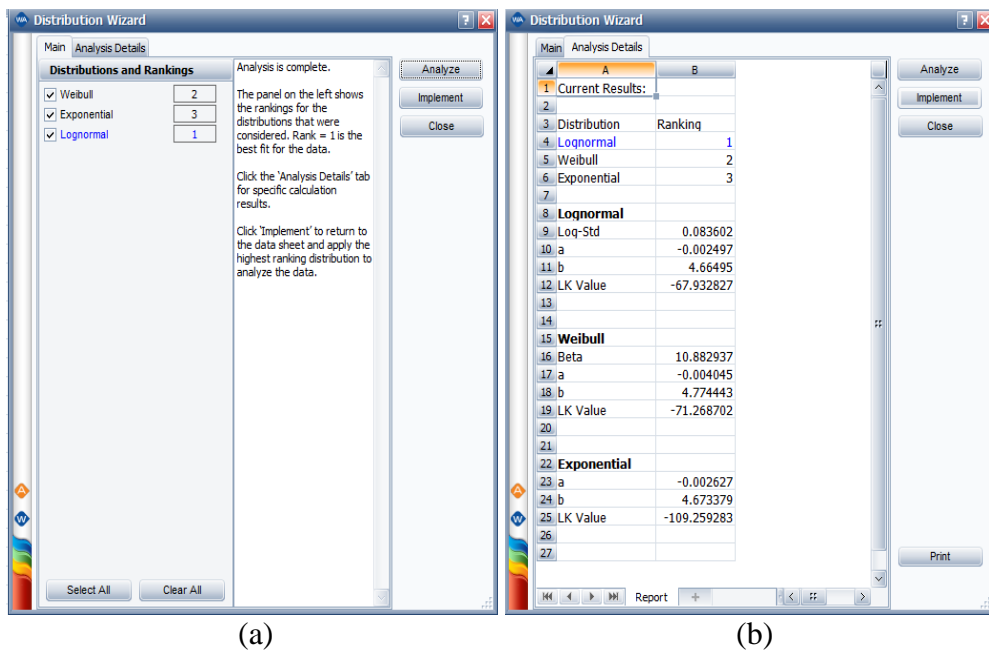


Figura 77 - Assistente de distribuição estatística. (a) Painel principal; (b) Análise detalhada.

6.4.2.4. Seleção do modelo de degradação

Após a escolha da distribuição estatística, é necessário definir o modelo de degradação mais adequado para representar a mudança do parâmetro de localização com o tempo. Podem ser utilizados os seguintes modelos de degradação:

- Linear, que é representado pela Equação (6.7);

$$\mu(t) = b + a \times t \quad (6.7)$$

- Exponencial, que se expressa matematicamente pela seguinte Equação (6.8);

$$\mu(t) = b \times e^{a \times t} \quad (6.8)$$

- Potência, escrito pela Equação (6.9);

$$\mu(t) = b \times t^a \quad (6.9)$$

- Logaritmo, que se expressa pela Equação (6.10);

$$\mu(t) = a \times \ln(t) + b \quad (6.10)$$

- *Lloyd-Lipow*, representado pela Equação (6.11).

$$\mu(t) = a - \frac{b}{t} \quad (6.11)$$

Os parâmetros a e b dos modelos de distribuição de degradação são então calculados utilizando a estimativa de máxima verossimilhança (MLE). Onde t representa o tempo de inspeção e μ a medida de degradação.

Estes modelos podem ser utilizados para prever quando a degradação de uma determinada unidade atinge o nível de falha predefinido.

Para definir qual o modelo de degradação que melhor se ajusta basta selecionar o “*Degration Model Wizard*” e tal como o assistente de distribuição para definir a distribuição de probabilidade que melhor se ajusta, os modelos de degradação são classificados da mesma forma. Para os dados do presente projeto o modelo de degradação que melhor expressa a distribuição inerente aos dados, segundo o assistente do modelo de degradação, é o modelo Linear, como representado na Figura 78.

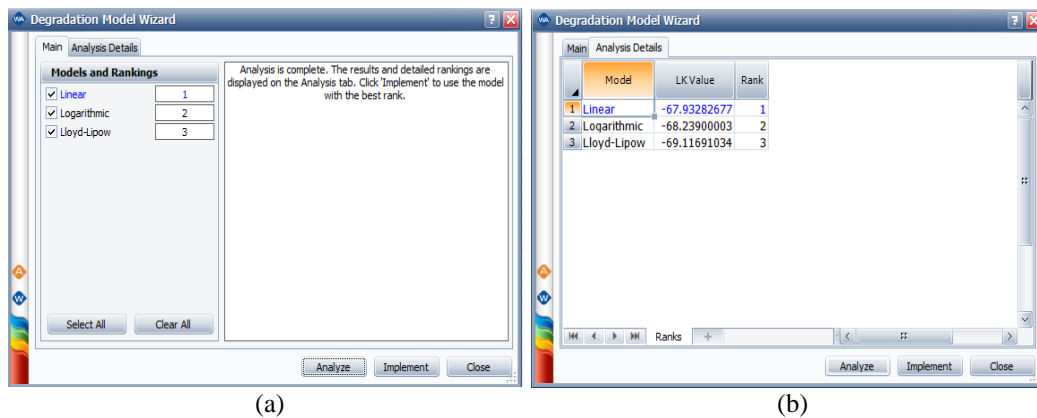


Figura 78 - Assistente do modelo de degradação. (a) Painel principal; (b) Análise detalhada.

6.4.2.5. Seleção do modelo de extrapolação

De seguida, é necessário selecionar o modelo de extrapolação que melhor se adequa ao ensaio acelerado realizado, neste caso é o modelo da Lei da Potência Inversa, que utiliza a distribuição Lognormal, sendo que a aplicação do modelo por parte do *software* ocorre de forma automática.

Na Figura 79 é evidenciado o campo onde o modelo de extrapolação é selecionado.

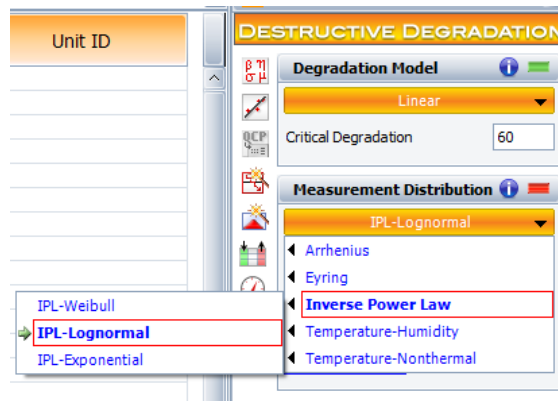


Figura 79 - Seleção do modelo de extrapolação.

Em seguida é possível obter os parâmetros do modelo de extrapolação. O *software* ALTA disponibiliza um painel onde apresenta os parâmetros característicos do modelo. Para que esses parâmetros sejam calculados é necessário que, depois de especificado o modelo utilizado, se prima o botão referente à função “Calcular”, posicionada na barra do menu principal no canto superior esquerdo. Os parâmetros obtidos foram os seguintes:

Analysis Summary	
Parameters	
Log-Std	0.083602
a	-0.002497
b	4.664950
n	-0.010000
LK Value	-67.932827

Figura 80 - Parâmetros obtidos no ALTA.

6.4.2.6. Resultados

O *software* ALTA inclui uma ferramenta denominada por QCP (*Quick Calculation Pad*) que efetua o cálculo de medições úteis. É possível calcular a fiabilidade, probabilidade de falha, fiabilidade condicionada, probabilidade de falha condicionada, *BX% life*, vida média, taxa de avarias e o fator de aceleração. Estes dados podem ser referentes aos dados dos ensaios acelerados utilizados para diferentes condições aceleradas ou também nas condições normais de operação. É

também possível obter gráficos referentes à Fiabilidade, probabilidade de falha, degradação em função do tempo, entre outros.

Com a ferramenta QCP é possível calcular o tempo estimado no qual o valor da Fiabilidade especificado será alcançado para um determinado nível de solitação. Para uma Fiabilidade de 90%, tendo em conta um valor de degradação crítico de 80 MPa em condições normais de operação o tempo correspondente é igual a 72,88 horas, como demonstrado na Figura 81. Ou seja, para 100 unidades idênticas expostas às condições normais de utilização, 90 unidades estarão a operar ao fim de 72,88h.

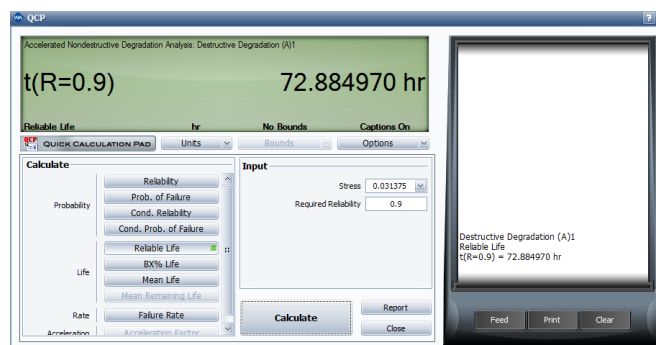


Figura 81 - Tempo no qual o valor de Fiabilidade é igual a 90%.

É também possível obter a vida B10%, que representa o tempo para o qual a probabilidade de falha é igual a 10%, para esta análise o seu valor é de 72,88 horas (Figura 82).

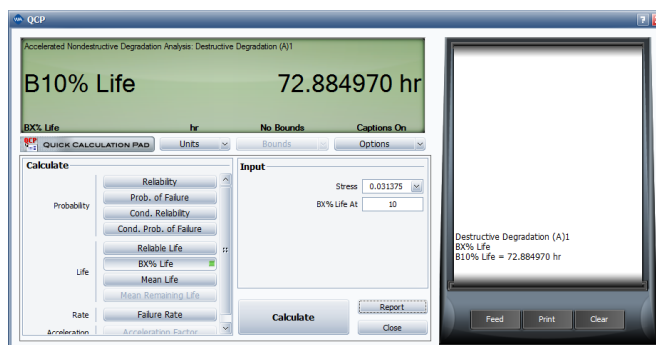


Figura 82 - B10%.

Outro exemplo de dados fiabilísticos que é possível obter com o QCP é a Fiabilidade condicionada, onde é realizado o cálculo da probabilidade de um produto operar com sucesso num intervalo de tempo específico, dado que ele operou com sucesso até ao momento inicial do intervalo. Para um tempo inicial de

missão de sessenta horas e um intervalo de cento e vinte horas a probabilidade de sucesso do bem é de 0,037, como representado na Figura 83.

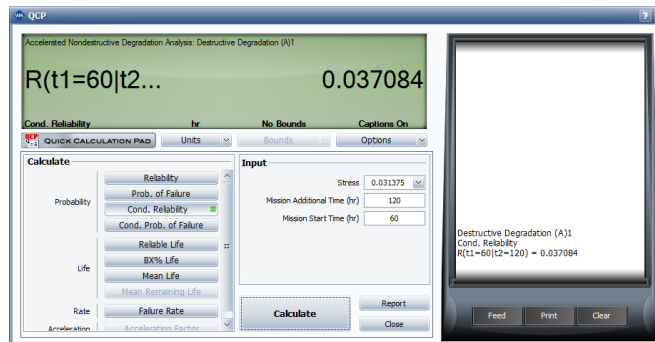


Figura 83 - Fiabilidade condicionada para um tempo inicial de 60h e um tempo de missão de 120h.

Através da ferramenta QCP foi obtida a Tabela 22, foram obtidos os diversos tempos estimados para diferentes valores de percentagem de Fiabilidade, nomeadamente para 90%, 75% e 50% para diferentes níveis de solicitação (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80 MPa).

Tabela 22 - Tempos correspondentes para cada valor de probabilidade de fiabilidade analisado em horas para a primeira abordagem.

	R(t)=0,90	R(t)=0,75	R(t)=0,50
5	1222,5	1243,5	1266,9
10	935,1	956,1	979,5
15	767,0	788,0	811,4
20	647,7	668,7	692,1
25	555,2	576,2	599,6
30	479,6	500,6	524,4
35	415,7	436,7	460,1
40	360,3	381,3	404,7
45	311,4	332,5	355,9
50	267,8	288,8	312,2
55	228,2	249,3	272,7
60	192,2	213,2	236,6
65	159,0	180,0	203,4
70	128,3	149,3	172,7
75	99,6	120,7	144,1
80	72,9	93,9	117,3

Observando a tabela anterior constata-se que os valores correspondentes a uma percentagem de Fiabilidade de 90% são inferiores aos valores correspondentes das outras percentagens de Fiabilidade, valores esperados visto representar o tempo para o qual se estima uma probabilidade de 90% dos bens estarem a funcionar.

Se para uma determinada aplicação a tensão última crítica de degradação for considerada igual a 60 MPa é esperado que ao fim de 192,2 h, 90% dos bens ainda não tenham atingido a tensão última crítica de degradação.

Nas seguintes figuras (Figura 84, Figura 85, Figura 86, Figura 87 e Figura 88) apresentam-se esquematizados os gráficos referentes à Fiabilidade do equipamento em condições normais de aceleração para diferentes valores de degradação crítico.

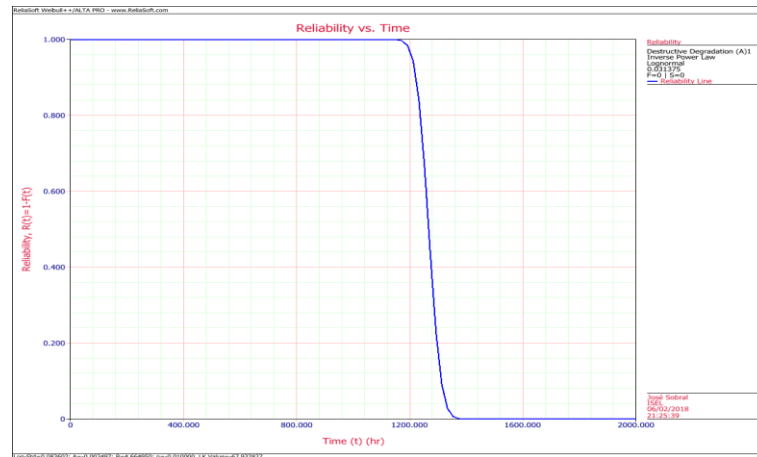


Figura 84 - Fiabilidade para um valor de degradação crítica de 5 MPa.

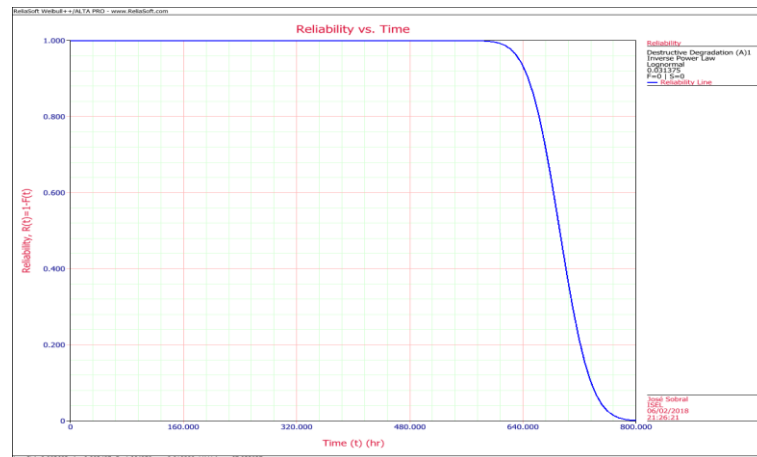


Figura 85 - Fiabilidade para um valor de degradação crítica de 20 MPa.

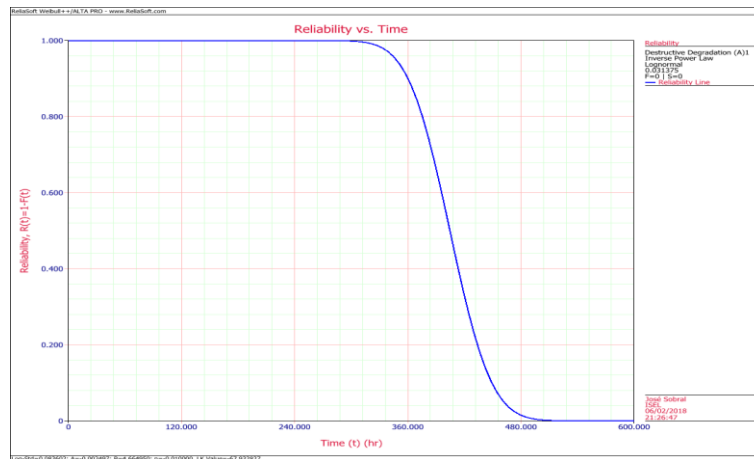


Figura 86 - Fiabilidade para um valor de degradação crítica de 40 MPa.

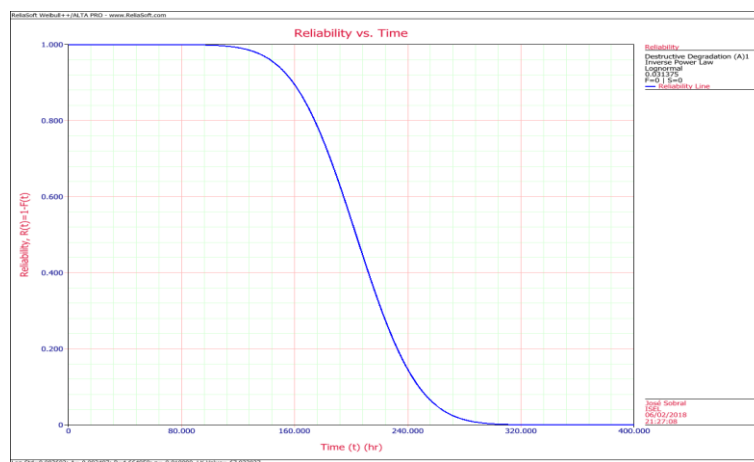


Figura 87 - Fiabilidade para um valor de degradação crítica de 65 MPa.

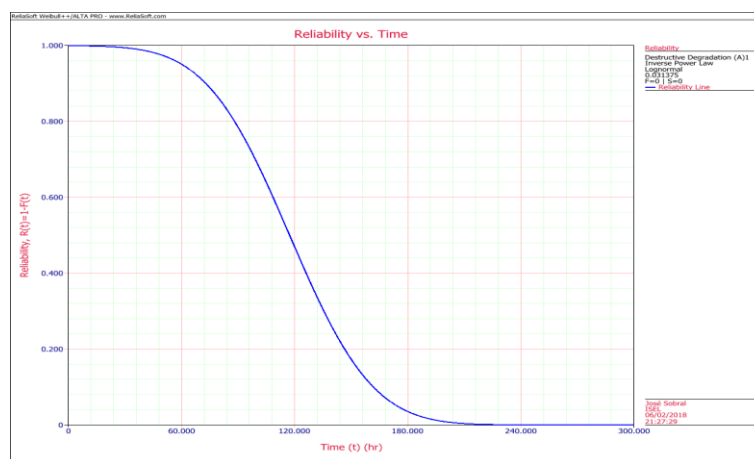


Figura 88 - Fiabilidade para um valor de degradação crítica de 80 MPa.

Constata-se que a curva de Fiabilidade se altera com o valor definido para a degradação crítica. Quando o valor da degradação crítica é reduzido (Figura 84) a Fiabilidade do bem é igual a 100% durante aproximadamente 1100h enquanto que

quando o valor de degradação crítica é igual a 80 MPa (Figura 88) a Fiabilidade é igual a 100% durante apenas 30h.

É ainda possível obter o gráfico que representa a degradação em função do tempo para as condições aceleradas. Para um valor de degradação crítica igual a 80 MPa é possível obter o seguinte gráfico representado na Figura 89.

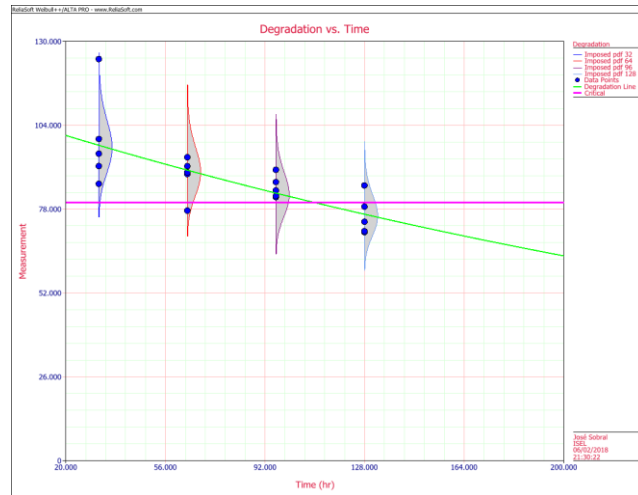


Figura 89 - Degradação vs. tempo para um valor crítico de degradação igual a 80 MPa.

Na Figura 89 é possível verificar as diferentes leituras da tensão última para os diferentes tempos de exposição. A reta a verde é caracterizada pelo modelo de degradação que melhor se ajusta aos dados neste caso o modelo Linear, como já visto anteriormente. A reta cor-de-rosa representa o valor crítico da degradação 80 MPa.

O gráfico da função densidade de probabilidade de falha ($f(t)$) para o valor crítico de degradação a 80 MPa é dado pela Figura 90.

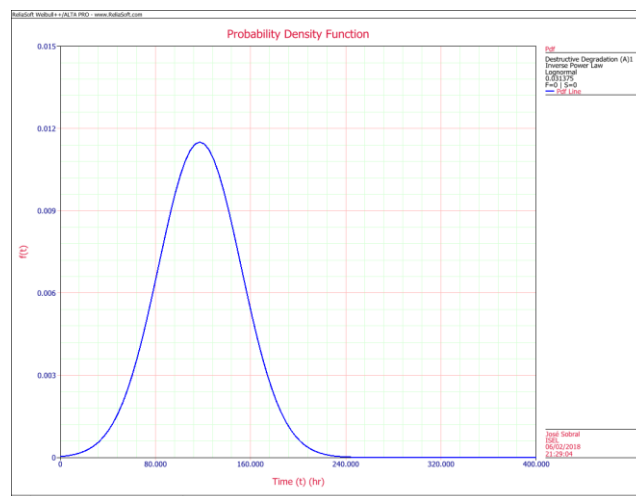


Figura 90 - Função densidade de probabilidade de falha para 80MPa.

6.4.3. Segunda Abordagem (Modelo Térmico Não-Térmico)

Na segunda abordagem é realizada a simulação no *software* ALTA considerando duas variáveis de solicitação a radiação UV e a temperatura pelo que o modelo de extrapolação que contempla estas duas variáveis é o modelo Térmico Não-Térmico. Este modelo considera duas variáveis, sendo uma térmica e outra não térmica, e resulta na combinação do modelo de *Arrhenius* e no modelo da Lei da Potência Inversa.

O procedimento desta segunda simulação é muito semelhante ao realizado na simulação anterior, diferindo na introdução das variáveis de solicitação e na escolha do modelo de extrapolação.

6.4.3.1. Seleção da análise mais adequada

Como os dados dos ensaios acelerados de vida são os mesmos, estamos na presença de uma análise de degradação acelerada destrutiva como na abordagem anterior.

Após a seleção do tipo de análise é necessário definir as variáveis de solicitação que foram consideradas neste ensaio e qual o seu valor em condições normais de utilização. Nesta segunda abordagem considera-se a temperatura e a radiação UV com os valores de condições de normal operação de 20 °C e 0,031375 W/m² respetivamente, como na Figura 91.

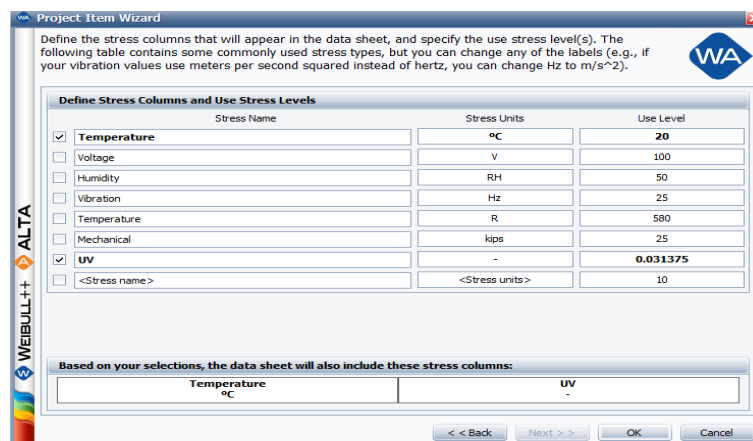


Figura 91 - Seleção das variáveis de solicitação.

6.4.3.2. Inserção dos dados do ensaio acelerado de vida

A inserção dos dados é feita da mesma forma da primeira abordagem.

6.4.3.3. Seleção da distribuição estatística e do modelo de degradação

O passo seguinte é a seleção da distribuição estatística e a seleção do modelo de degradação. Como os dados dos ensaios acelerados de vida são os mesmos a distribuição estatística e o modelo de degradação são exatamente os mesmos para as duas abordagens como evidenciado na Figura 77 e na Figura 78. A distribuição estatística que melhor se ajusta aos dados é a Lognormal e o modelo de degradação é o Linear.

6.4.3.4. Seleção do modelo de extrapolação

Para esta abordagem, é necessário definir qual a variável de solitação térmica e não térmica. Ao selecionar “*Select Stress Columns*” (Figura 92) é possível definir estas variáveis.

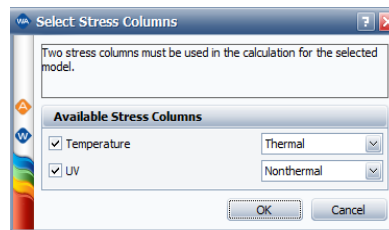


Figura 92 - Seleção da variável de solitação térmica e não térmica.

O último passo é a seleção do modelo de extrapolação que melhor se adequa ao ensaio acelerado realizado, neste caso é o modelo Térmico Não-Térmico, que utiliza a distribuição Lognormal, sendo que a aplicação do modelo por parte do *software* ocorre de forma automática. Os parâmetros obtidos são os seguintes:

Analysis Summary	
Parameters	
Log-Std	0.083602
a	-0.002611
b	4.664950
c	-0.007750
n	0.005500
LK Value	-67.932827

Figura 93 - Parâmetros obtidos no ALTA.

6.4.3.5. Resultados

Nesta secção, faz-se a descrição da obtenção dos resultados, tal como na primeira abordagem. Na obtenção dos resultados foram analisados os mesmos parâmetros de modo a que seja possível comparar os resultados entre ambas as abordagens.

Para uma Fiabilidade de 90%, tendo em conta um valor de degradação crítico de 80 MPa em condições normais de operação o tempo correspondente é igual a sessenta e seis horas, como demonstrado na Figura 94. Ou seja, para cem unidades idênticas expostas às condições normais de utilização noventa unidades estarão a operar ao fim de sessenta e seis horas.

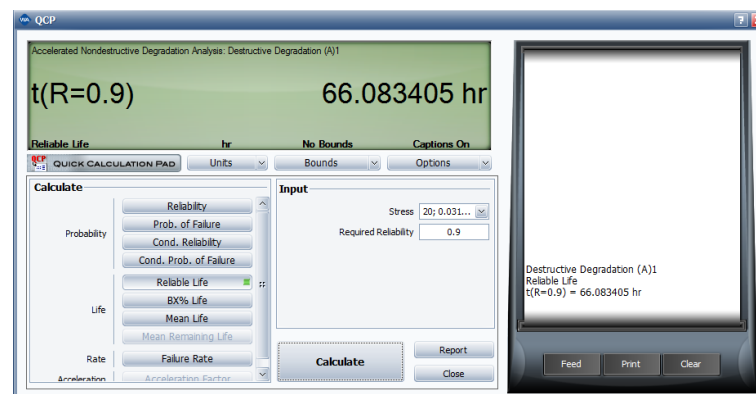


Figura 94 - Tempo no qual o valor de Fiabilidade é igual a 90%.

A vida B10% para esta análise apresenta um valor de sessenta horas (Figura 95).

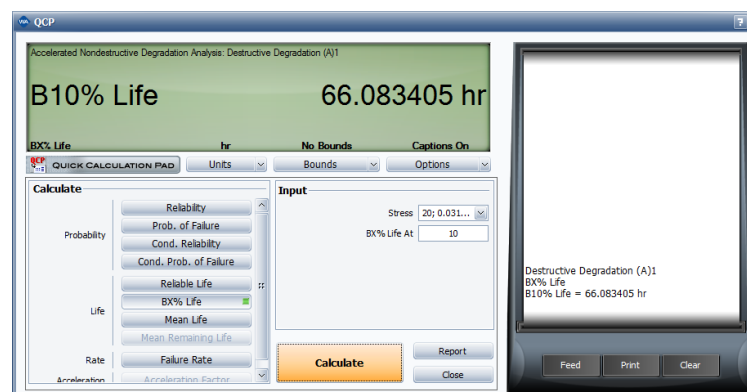


Figura 95 - B10%.

A Fiabilidade condicionada para um tempo inicial de missão de sessenta horas e um intervalo de cento e vinte horas, a probabilidade de sucesso do bem é de 0,010, como representado na Figura 96.

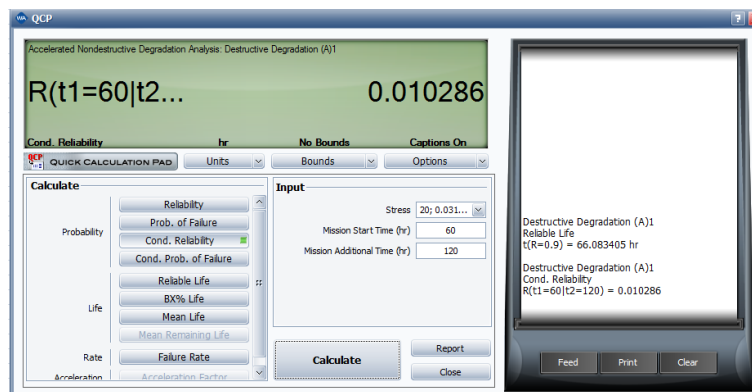


Figura 96 - Fiabilidade condicionada para um tempo inicial de 60h e um tempo de missão de 120h.

Na Tabela 23 encontram-se os diversos tempos estimados para diferentes valores de percentagem de Fiabilidade, nomeadamente para 90%, 75% e 50% para diferentes níveis de solicitação (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80 MPa) obtidos através da ferramenta QCP.

Tabela 23 - Tempos correspondentes para cada valor de probabilidade de fiabilidade analisado em horas para a segunda abordagem.

	R(t)=0,90	R(t)=0,75	R(t)=0,50
5	1108,4	1127,5	1148,7
10	847,8	866,9	888,1
15	695,4	714,5	735,7
20	587,2	606,3	627,5
25	503,4	522,4	543,6
30	434,8	453,9	475,1
35	376,9	395,9	417,1
40	326,7	345,7	366,9
45	282,4	301,5	322,7
50	242,8	261,9	283,1
55	206,9	226,0	247,2
60	174,2	193,3	214,5
65	144,1	163,2	184,4
70	116,3	135,4	156,6
75	90,3	109,4	130,6
80	66,1	85,2	106,4

Tal como acontece na abordagem anterior, na Tabela 23 constata-se que os valores correspondentes a uma percentagem de Fiabilidade de 90% são inferiores aos valores correspondentes das outras percentagens de Fiabilidade, valores esperados visto representar o tempo para o qual se estima uma probabilidade de 90% dos bens estarem a funcionar. Se para uma determinada aplicação a tensão última crítica de degradação for considerada igual a 60 MPa é esperado que ao fim

de 174,2 horas, 90% dos bens ainda não tenham atingido a tensão última crítica de degradação.

Nas seguintes figuras (Figura 97, Figura 98, Figura 99, Figura 100 e Figura 101) apresentam-se esquematizados os gráficos referentes à Fiabilidade do equipamento em condições normais de aceleração para diferentes valores de degradação crítico (5, 20, 40, 65, 80 MPa).

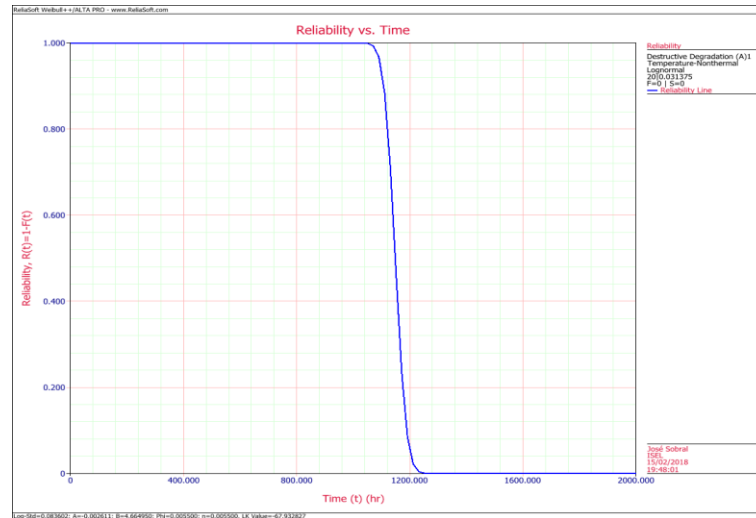


Figura 97 - Fiabilidade para um valor de degradação crítica de 5 MPa.

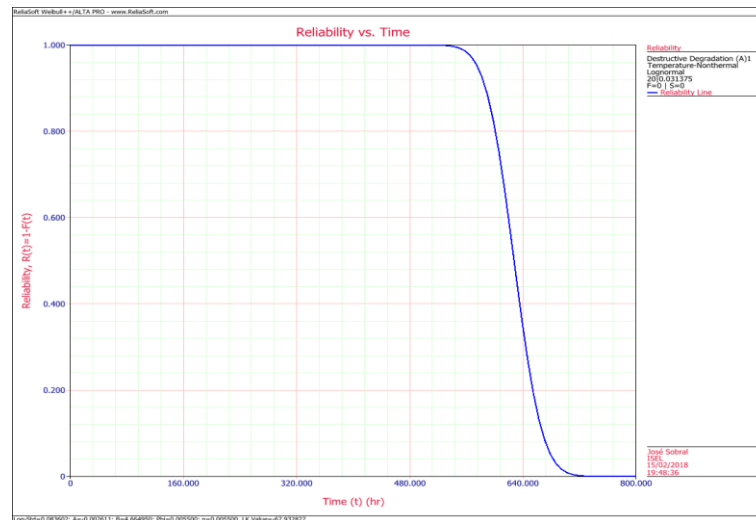


Figura 98 - Fiabilidade para um valor de degradação crítica de 20 MPa.

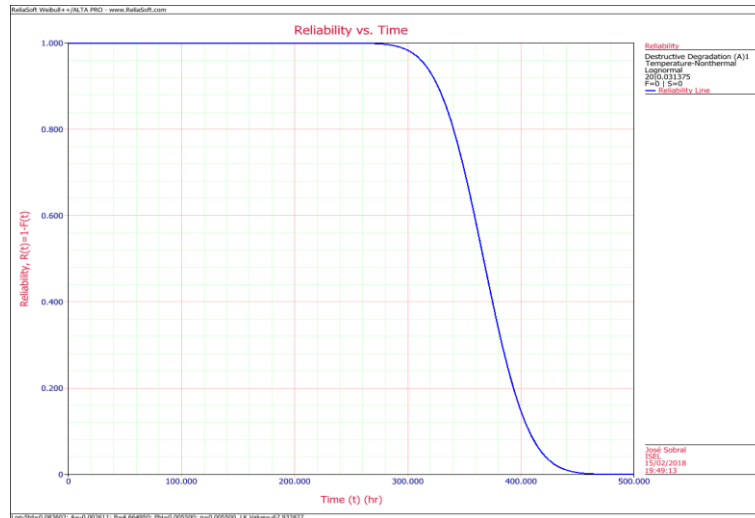


Figura 99 - Fiabilidade para um valor de degradação crítica de 40 MPa.

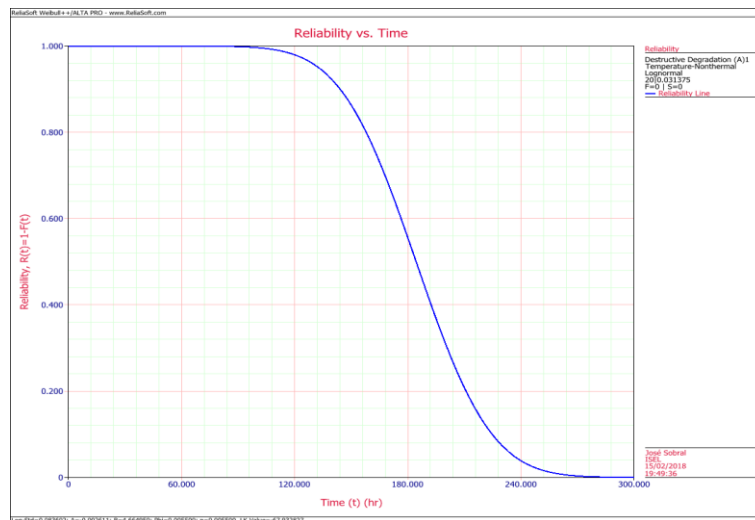


Figura 100 - Fiabilidade para um valor de degradação crítica de 65 MPa.

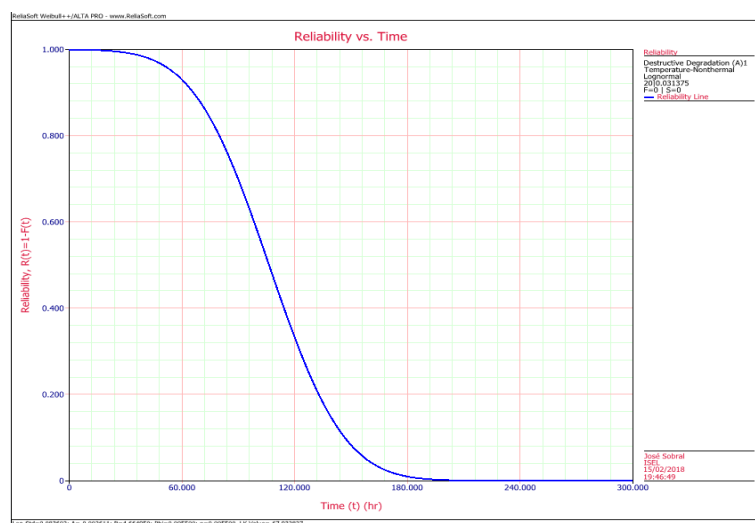


Figura 101 - Fiabilidade para um valor de degradação crítica de 80 MPa.

É ainda possível obter o gráfico que representa a degradação em função do tempo para as condições aceleradas. Para um valor de degradação crítica igual a 80 MPa, é possível obter o seguinte gráfico representado na Figura 102.



Figura 102 - Degradação vs. tempo para um valor crítico de degradação igual a 80 MPa.

O gráfico da função densidade de probabilidade de falha ($f(t)$) para o valor crítico de degradação a 80 MPa é representado na Figura 103.

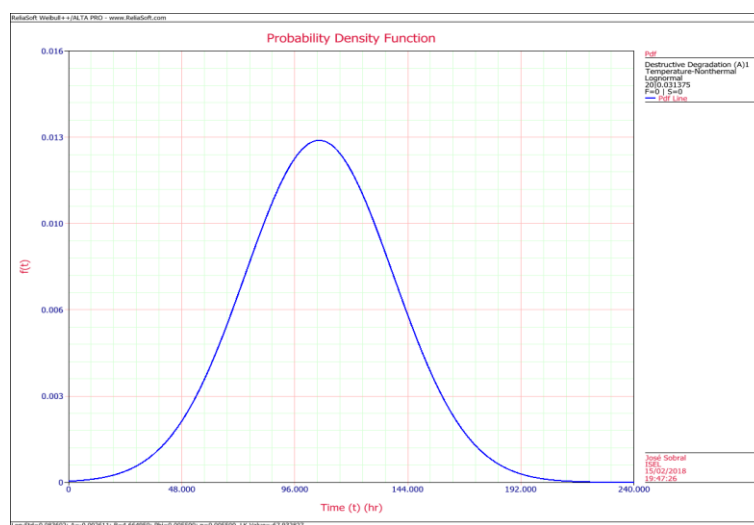


Figura 103 - Função densidade de probabilidade de falha para 80MPa.

6.4.4. Comparação de Resultados

Analisando os resultados das duas abordagens, verifica-se que tanto na primeira abordagem como na segunda os resultados obtidos apresentam uma fiabilidade muito reduzida ao esperado para cada valor de tensão crítica de degradação. Uma vez que a aceleração conseguida na câmara de ensaio foi cerca

de 99,83% vezes superior à radiação UV média ao longo do ano, era esperado obter resultados de fiabilidade em condições normais de operação bastante superiores ao obtido nestes ensaios.

Realizando uma comparação entre as duas simulações dos capítulos anteriores verifica-se que os resultados obtidos são muito idênticos. Não era este o resultado esperado visto que nas duas simulações são utilizados modelos de extrapolação divergentes.

Tabela 24 - Comparação entre as duas abordagens para uma degradação crítica de 80 MPa.

	1º Abordagem (Modelo Lei da Potência Inversa) [horas]	2º Abordagem (Modelo Térmico Não-Térmico) [horas]	Desvio [%]
R(t)=0,90	72,9	66,1	10,3
R(t)=0,75	93,9	85,2	10,2
R(t)=0,50	117,3	106,4	10,2

Através da Tabela 24, verifica-se que o desvio entre as duas metodologias é cerca de 10%, e é muito idêntico para os três casos. Constata-se que a esperança de vida para a primeira abordagem é superior à segunda simulação. Pois na segunda abordagem estamos na presença de duas solicitações sobre o material.

Assim, pode-se afirmar que a temperatura apresenta uma influência pouco significativa na vida do material.

Estes valores encontram-se muito abaixo do esperado para condições normais de utilização colocando em causa os resultados obtidos através do ALTA e da sua extrapolação.

Apesar do ALTA ser um *software* fiável e é pressuposto que os resultados vão de encontro à realidade, é de salientar que a análise realizada pelo mesmo é uma mera simulação teórica. Pelo que os resultados obtidos através deste *software* são validos até prova em contrário, pois era necessário expor as amostras a condições normais de utilização durante o tempo estipulado e analisar a sua degradação para poder comprovar os resultados obtidos com o ALTA.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

A utilização dos testes acelerados de vida é muito importante para o desenvolvimento de novos materiais e de novas soluções para a engenharia pois desta forma é possível realizar previsões da vida dos materiais num curto espaço de tempo. Mas se a sua implementação não for a correta, poderá invalidar o estudo. Pelo que na realização dos testes acelerados de vida é necessário certificar-se que as solicitações induzidas nos bens em estudo não provocam modos de falha diferentes daqueles que aconteceriam em condições normais de utilização.

O caso de estudo executado para a realização deste TFM tem como principal objetivo obter dados de degradação das propriedades mecânicas de amostras de fibra de vidro e matriz epoxídica expostas à radiação UV. Esta degradação foi conseguida através de uma pequena câmara construída em placas de madeira e de duas lâmpadas de radiação UV que simulam o efeito da radiação solar de forma acelerada. A degradação dos materiais é conseguida através de ensaios de tração.

Com os ensaios de tração foi possível comprovar a degradação das propriedades mecânicas das amostras quando expostas à radiação UV. Estamos na presença de amostras produzidas com manta de fibra de vidro e resina *epoxy* pelo que as propriedades mecânicas no sentido longitudinal e transversal são muito semelhantes. Verificou-se que as propriedades analisadas (tensão última e o módulo de elasticidade) degradaram com o tempo de exposição à radiação UV. A radiação UV degrada diretamente a resina *epoxy* que se encontra presente nas amostras provocando a foto-oxidação. Apesar das propriedades em análise não dependerem diretamente da resina, verifica-se que a foto-oxidação degrada a ligação entre a resina-fibras tornando o material menos resistente aos esforços de tração. A radiação UV ainda é responsável pela alteração da cor dos materiais nas amostras em análise. Constatou-se uma grande alteração da cor nas primeiras 32 horas de exposição. Assim, conclui-se que a radiação UV tem um grande efeito

nas propriedades mecânicas do material, causando uma deterioração das propriedades dominadas pelas fibras.

Após a obtenção dos dados de degradação adquiridos nos ensaios de tração, o seguinte passo foi o tratamento dos mesmos através do *software* ALTA. Foi realizada uma demonstração da utilização do ALTA para obtenção dos dados fiabilísticos em condições normais de utilização, pelo que este estudo se centra mais neste ponto e menos na justificação dos resultados obtidos pelos ensaios de tração.

O *software* ALTA é uma ferramenta muito útil para o seu efeito pois de uma forma muito simples e rápida é possível realizar análise quantitativa de dados obtidos nos ensaios acelerados de vida. É de salientar que esta é uma ferramenta que utiliza modelos teóricos e que os seus resultados são apenas uma simulação e não dispensa os ensaios em condições reais ou a experiência adquirida.

Após a definição da distribuição que melhor se ajusta, do modelo de degradação e do modelo matemático através do procedimento de extrapolação foi possível obter dados fiabilísticos para condições normais de utilização. Os resultados obtidos no *software* ALTA, para os dados conseguidos através dos ensaios acelerados, foram distintos daqueles que se esperava. Verificou-se que a Fiabilidade para as amostras em condições normais de utilização é muito reduzida, valores estes que se esperava que fossem mais elevados tendo em conta que a radiação UV conseguida na câmara por duas lâmpadas de UV foi cerca de 99,83 vezes superior à radiação que uma amostra estaria exposta em condições normais de utilização. Para validar estes resultados obtidos com o *software* ALTA é necessário expor as amostras a condições normais de utilização durante o tempo estipulado e analisar a sua degradação para poder comprovar os resultados obtidos no ALTA.

No decorrer deste, projeto foram detetadas diversas dificuldades principalmente a nível técnico. A principal dificuldade foi a falta de apoio de entidades externas para colaboração neste projeto. Foram consultadas organizações que desenvolvem e implementam os testes acelerados de vida, quanto à disponibilização de dados relativos aos mesmos, do qual não ouve qualquer colaboração. Devido à inexistência de meios técnicos para a realização dos ensaios acelerados de vida e obtenção dos respetivos resultados na Área

Departamental de Engenharia Mecânica do ISEL, incentivou a construção do próprio material de ensaio para a obtenção de resultados.

Numa perspetiva de melhoria e continuação do trabalho realizado até ao momento, os desenvolvimentos futuros deverão estar relacionados com os seguintes tópicos:

- Aumentar o tempo de exposição das amostras à radiação ultravioleta;
- Analisar diferentes tipos de materiais (fibra de carbono, fibra de aramida, entre outros) para comparação entre materiais e posterior verificação do seu comportamento quando expostas à radiação ultravioleta de forma acelerada;
- Implementação de um sistema onde seja possível simular o efeito da humidade como chuva e orvalho, simulando de forma mais precisa as condições ambientais a que um material estaria exposto em condições normais de utilização;
- Conseguir controlar a variação da temperatura e intensidade da radiação ultravioleta no interior da câmara para conseguir simular diversas situações;
- Estudo de outras propriedades e defeitos nas amostras causadas pelas condições atmosféricas nos materiais;
- Validação dos resultados obtidos com o *software* ALTA.

Referências

- Adams, R. . and Advani, S. (2001) ‘ASM Handbook Composites’, 21.
- Allen, H. G. (1969) *Analysis and design of structural sandwich panels*. Oxford: Pergamon Press.
- Assis, R. (1997) *Manutenção Centrada na Fiabilidade*. Edited by LIDEL.
- ASTM D 3039/D 3039 M - Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials
- ASTM D 3878 (2015) - Standard Terminology for Composite Materials
- ASTM D 4329-99 - Standard Practice for Fluorescent UV Exposure of Plastics
- ASTM G 154 - Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Non-metallic Materials
- ASTM G 151 - Standard Practice for Exposing Non-metallic Materials in Accelerated Test Devices that Use Laboratory Light Sources
- B.S., D. and Ph., D. (2002) *Engineering Maintenance A Modern Approach*, CRC PRESS.
- Chaki, S. and Harizi, W. (2015) ‘Multi-technique approach for non destructive diagnostic of structural composite materials using bulk ultrasonic waves, guided waves, acoustic emission and infrared thermography’, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Elsevier Ltd, 78, pp. 358–361.
- Correia da Cruz, A. and Carreira, J. (1992) *Ensaio Mecânicos*.
- Cysne Barbosa, A. P. and Ana, A. P. (2017) ‘Accelerated aging effects on carbon fiber/epoxy composites’, *Composites Part B: Engineering*, 110, pp. 298–306.
- Dhillon, B. S. (2006) *Maintenance , and Reliability and Reliability*.
- Elsayed, E. A. (1996) *Reliability Engineering*.

Escobar, L. a. and Meeker, W. Q. (2007) ‘A Review of Accelerated Test Models’, *Statistical Science*, 21(4), pp. 552–577.

Fioletov, V. and Kerr, J. B. (2010) ‘The UV index: Definition, distribution and factors affecting it’, *Canadian Journal of Public Health*, 101(4), pp. 15–19.

Fragata, F. and Amorin, C. (2010) ‘Desempenho de Tintas de Acabamento Frente às Radiações Ultravioleta , Radiation , UVA and UVB , Under Humidity Condensation’, 29, pp. 91–98.

Fridrichová, M. and Dvorák, K. (2016) ‘Method for the Accelerated Testing of the Durability of a Construction Binder Using the Arrhenius Approach’, 24(1), pp. 24–33.

Gay, D. and Hoa, S. V (2003) *Composite Materials*.

Hietala, J. and Ojala, P. (2017) ‘Development of process for adaptive lifetime estimation of mechanical assemblies using accelerated testing methods’.

IPMA (2017). Available at: <http://www.ipma.pt/pt/> (Accessed: 10 December 2017).

ISO 21348 (2007) - Definitions of Solar Irradiance Spectral Categories

ISO 527-1 (1993) - Plastics Determination of Tensile Properties

J.N.Reddy (2004) ‘Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells Theory and Analysis’.

Kececioglu, D. (2002a) *Reliability & life testing handbook, volumen 1*.

Kececioglu, D. (2002b) *Reliability & life testing handbook, volumen 2*.

Kececioglu, D. (2002c) ‘Reliability Engineering Handbook-Volume1’.

Kumar, B. G. and Singh, R. P. (2002) ‘Degradation of Carbon Fiber-reinforced’, *Journal of Composite Materials*, 36(24), pp. 2713–2733.

Montagna, L. S. and Marlene, R. (2012) ‘Influência da radiação solar na degradação do polipropileno’.

Müller, A. and Hinz, M. (2017) ‘Optimization of the dental implant testing based on FEM simulation of fatigue and accelerated life’, pp. 16–22.

Orte, F. and Wolfram, E. (2017) ‘Attenuation by clouds of UV radiation for

low stratospheric ozone conditions', *AIP Conference Proceedings*, 1810.

Pallerosi, C. A. (2007) *Confiabilidade, a Quarta Dimensão da Qualidade Ensaios Acelerados*. 1st edn.

Reliasoft Corporation (2015) 'Accelerated Life Testing Reference'.

Reliasoft ALTA 11

Schmalwieser, A. W. and Gröbner, J. (2017) 'UV Index monitoring in Europe', *Photochem. Photobiol. Sci.*, 16(9), pp. 1349–1370.

Testing, T. (2004) 'Introduction to Tensile Testing', pp. 1–13.

Turner, E. C. and Manners, J. (2017) 'Toward a New UV Index Diagnostic in the Met Office's Forecast Model', *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8, pp. 764–785.

Vanicek, K. and Frei, T. (2005) 'UV- Index for the Public', *Publication of the European Communities, Brussels, Belgium*, (28), p. 1.

Zhang, C. and Chuckpaiwong, I. (2002) '*Mechanical component lifetime estimation based on accelerated life testing with singularity extrapolation', *Mechanical Systems and Signal Processing*, 16(4), pp. 705–718.

Anexos

Anexo A

Sensor Temperatura e Humidade

A1. PROGRAMAÇÃO PARA O SENSOR DE TEMPERATURA HUMIDADE

(Código Sistema ARDUINO)

```
#include <SparkFunHTU21D.h>
//#include "SparkFun_Si7021_Breakout_Library.h"
#include <Wire.h>
float humidity = 0;
float tempf = 0;
int power = A3;
int GND = A2;

//Create Instance of HTU21D or SI7021 temp and humidity sensor and
MPL3115A2 barometric sensor
Weather sensor;
//-----
void setup()
{
  Serial.begin(9600); // open serial over USB at 9600 baud
  pinMode(power, OUTPUT);
  pinMode(GND, OUTPUT);
  digitalWrite(power, HIGH);
  digitalWrite(GND, LOW);
  //Initialize the I2C sensors and ping them
  sensor.begin();
}
//-----
void loop()
{
  //Get readings from all sensors
  getWeather();
  printInfo();
  delay(1000);
}
//-----
```

```

void getWeather()
{
// Measure Relative Humidity from the HTU21D or Si7021
  humidity = sensor.getRH();
// Measure Temperature from the HTU21D or Si7021
  tempf = sensor.getTempF();
// Temperature is measured every time RH is requested.
// It is faster, therefore, to read it from previous RH
// measurement with getTemp() instead with readTemp()
}
//-----
void printInfo()
{
//This function prints the weather data out to the default Serial Port
  Serial.print("Temp:");
  Serial.print(tempf);
  Serial.print("F, ");
  Serial.print("Humidity:");
  Serial.print(humidity);
  Serial.println("%");
}

```

A2. PROGRAMAÇÃO PARA O SENSOR DE RADIAÇÃO ULTRA-VIOLETA

(Código Sistema ARDUINO)

```
//Hardware pin definitions
int UVOUT = A0; //Output from the sensor
int REF_3V3 = A1; //3.3V power on the Arduino board
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(UVOUT, INPUT);
  pinMode(REF_3V3, INPUT);
  Serial.println("ML8511 example");
}
void loop()
{
  int uvLevel = averageAnalogRead(UVOUT);
  int refLevel = averageAnalogRead(REF_3V3); //Use the 3.3V power pin
as a reference to get a very accurate output value from sensor
  float outputVoltage = 3.3 / refLevel * uvLevel;
  float uvIntensity = mapfloat(outputVoltage, 0.99, 2.8, 0.0, 15.0); //Convert
the voltage to a UV intensity level
  Serial.print("output: ");
  Serial.print(refLevel);
  Serial.print("ML8511 output: ");
  Serial.print(uvLevel);
  Serial.print(" / ML8511 voltage: ");
  Serial.print(outputVoltage);
  Serial.print(" / UV Intensity (mW/cm^2): ");
  Serial.print(uvIntensity);
  Serial.println();
  delay(1000);
}
//Takes an average of readings on a given pin
```

```

//Returns the average
int averageAnalogRead(int pinToRead)
{
  byte numberOfReadings = 8;
  unsigned int runningValue = 0;
  for(int x = 0 ; x < numberOfReadings ; x++)
    runningValue += analogRead(pinToRead);
  runningValue /= numberOfReadings;
  return(runningValue);
}

//The Arduino Map function but for floats
//From: http://forum.arduino.cc/index.php?topic=3922.0
float mapfloat(float x, float in_min, float in_max, float out_min, float
out_max)
{
  return (x - in_min) * (out_max - out_min) / (in_max - in_min) + out_min;
}

```

Anexo B

Dimensões das amostras

B1. Propriedades das Amostras

Legenda	
L1	Largura 1
L2	Largura 2
L3	Largura 3
C	Comprimento
e1	Espessura 1
e2	Espessura 2
e3	Espessura 3
As	Area secção



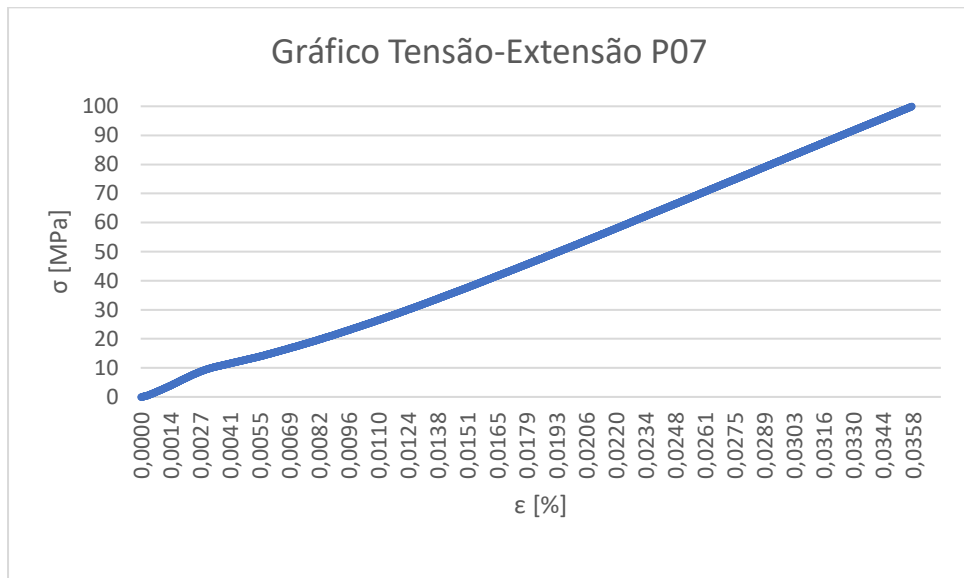
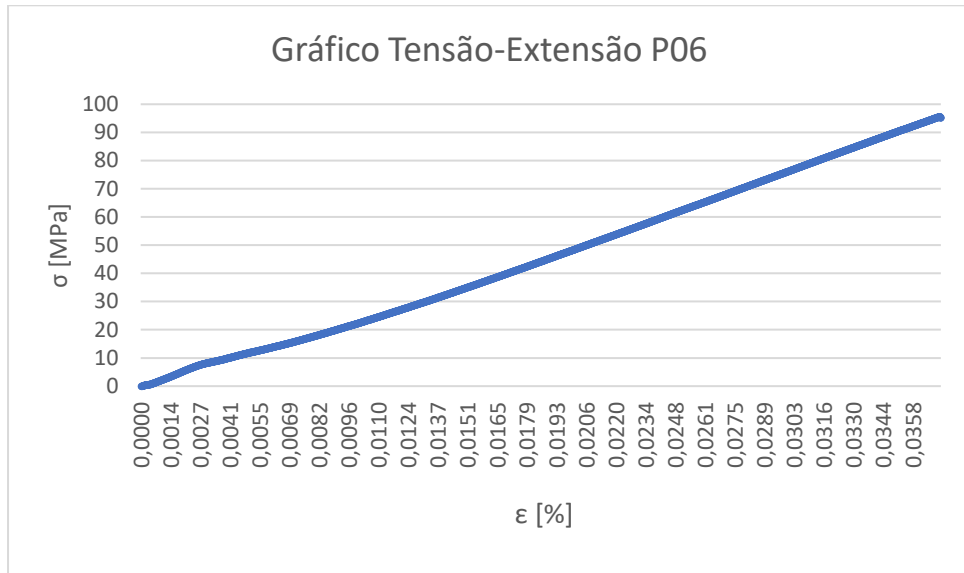
Ref	Data Inicio	Data Fim	Amostras		Tempo Total(horas)	Descrição	Fibra	Camadas	Dimensões Iniciais										
			Tempo Total(dias)	Tempo Total(horas)					L1(cm)	L2(cm)	L3(cm)	L(cm)	C (cm)	e1 (mm)	e2 (mm)	e3 (mm)	e (mm)	e (cm)	As (cm²)
09	-	-	-	-	-	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	2,70	2,70	2,60	2,67	26,00	1,90	1,65	1,60	1,72	0,17	0,46
10	-	-	-	-	-	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	3,30	3,10	3,20	3,20	25,60	1,90	2,00	1,90	1,93	0,19	0,62
11	-	-	-	-	-	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	2,80	2,90	2,90	2,87	26,10	1,60	1,75	1,60	1,65	0,17	0,47
12	-	-	-	-	-	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	3,00	3,10	3,10	3,07	26,00	2,00	1,85	1,85	1,90	0,19	0,58
13	-	-	-	-	-	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	3,00	3,10	3,10	3,07	25,80	2,00	2,00	2,10	2,03	0,20	0,62
01	25/07/2017	10/08/2017	16	128	128	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	3,00	2,90	3,10	3,00	26,00	2,00	1,65	1,90	1,85	0,19	0,56
02	25/07/2017	10/08/2017	16	128	128	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	3,10	3,10	3,00	3,07	26,00	1,95	1,75	1,60	1,77	0,18	0,54
03	25/07/2017	10/08/2017	16	128	128	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	3,00	2,90	2,90	2,93	26,00	1,50	1,75	1,80	1,68	0,17	0,49
04	25/07/2017	10/08/2017	16	128	128	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	3,10	3,00	3,20	3,10	26,00	2,00	2,00	1,75	1,92	0,19	0,59
05	25/07/2017	10/08/2017	16	128	128	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	3,10	3,30	3,10	3,17	26,00	1,65	1,80	1,90	1,78	0,18	0,56
06	22/07/2017	25/07/2017	4	32	32	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	3,00	3,00	3,20	3,07	25,90	1,95	1,85	1,75	1,85	0,19	0,57
07	22/07/2017	25/07/2017	4	32	32	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	3,00	3,00	3,00	3,00	26,00	1,70	1,85	2,00	1,85	0,19	0,56
08	22/07/2017	25/07/2017	4	32	32	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	2,90	3,00	3,10	3,00	25,90	1,95	1,80	1,60	1,78	0,18	0,54
14	22/07/2017	25/07/2017	4	32	32	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	2,80	2,70	2,80	2,77	25,40	1,40	1,60	1,50	1,50	0,15	0,42
15	22/07/2017	25/07/2017	4	32	32	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	2,80	2,80	2,80	2,80	25,30	1,60	1,75	1,90	1,75	0,18	0,49
16	22/07/2017	29/07/2017	8	64	64	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	2,70	2,70	2,70	2,70	25,40	1,50	1,70	1,30	1,50	0,15	0,41
17	22/07/2017	29/07/2017	8	64	64	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	2,70	2,80	2,85	2,78	25,30	1,60	1,60	1,35	1,52	0,15	0,42
18	22/07/2017	29/07/2017	8	64	64	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	2,70	2,70	2,70	2,70	25,30	1,65	1,65	1,50	1,60	0,16	0,43
19	22/07/2017	29/07/2017	8	64	64	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	2,70	2,80	2,60	2,70	25,30	1,65	1,55	1,40	1,53	0,15	0,41
20	22/07/2017	29/07/2017	8	64	64	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	2,75	2,80	2,80	2,78	25,40	1,60	1,65	1,50	1,58	0,16	0,44
21	22/07/2017	03/08/2017	12	96	96	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	2,80	2,90	2,75	2,82	25,30	1,50	1,60	1,65	1,58	0,16	0,45
22	22/07/2017	03/08/2017	12	96	96	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	2,80	2,70	2,80	2,77	25,40	1,80	1,55	1,50	1,62	0,16	0,45
23	22/07/2017	03/08/2017	12	96	96	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	2,50	2,60	2,70	2,60	25,40	1,70	1,50	1,65	1,62	0,16	0,42
24	22/07/2017	03/08/2017	12	96	96	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	2,70	2,75	2,70	2,72	25,50	1,70	1,60	1,85	1,72	0,17	0,47
25	22/07/2017	03/08/2017	12	96	96	Ensaio Tracção INICIAL	Manta	2	2,90	2,90	2,90	2,90	25,40	2,00	1,70	1,65	1,78	0,18	0,52

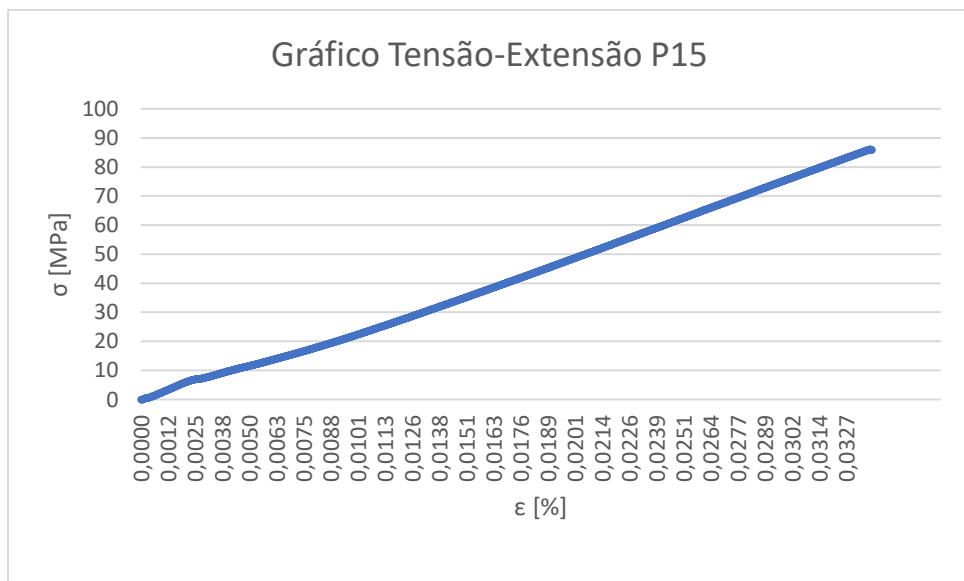
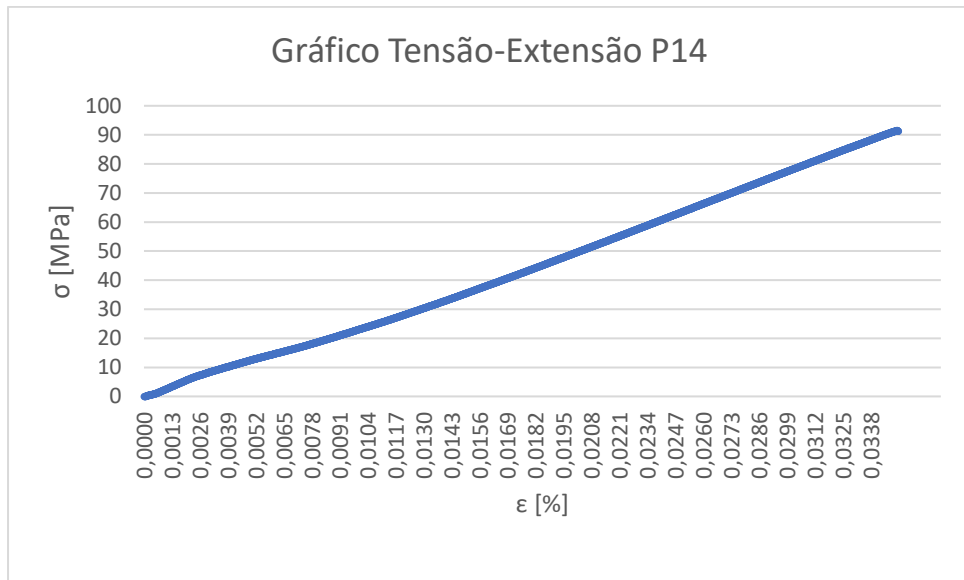
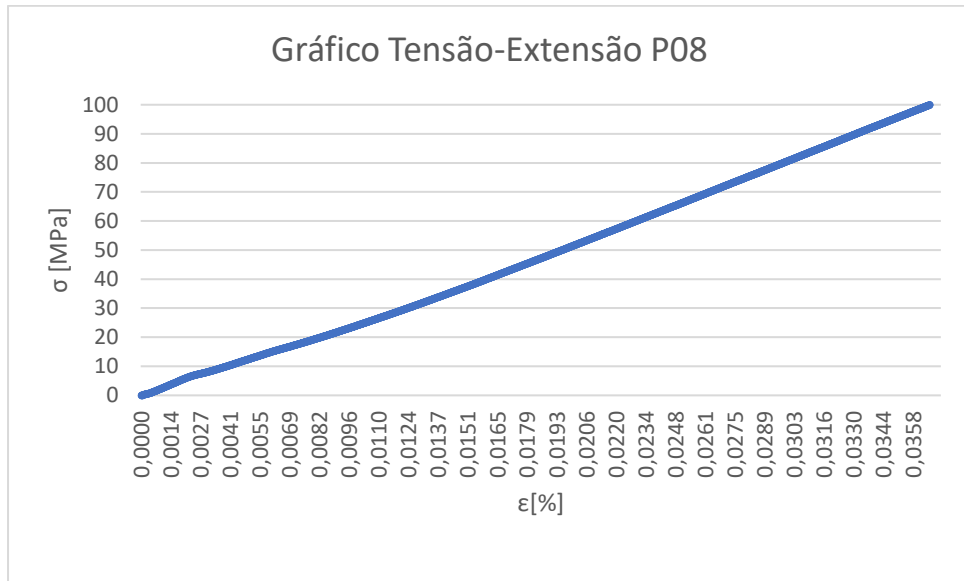
Anexo C

Gráficos tensão-extensão resultantes dos ensaios de tração

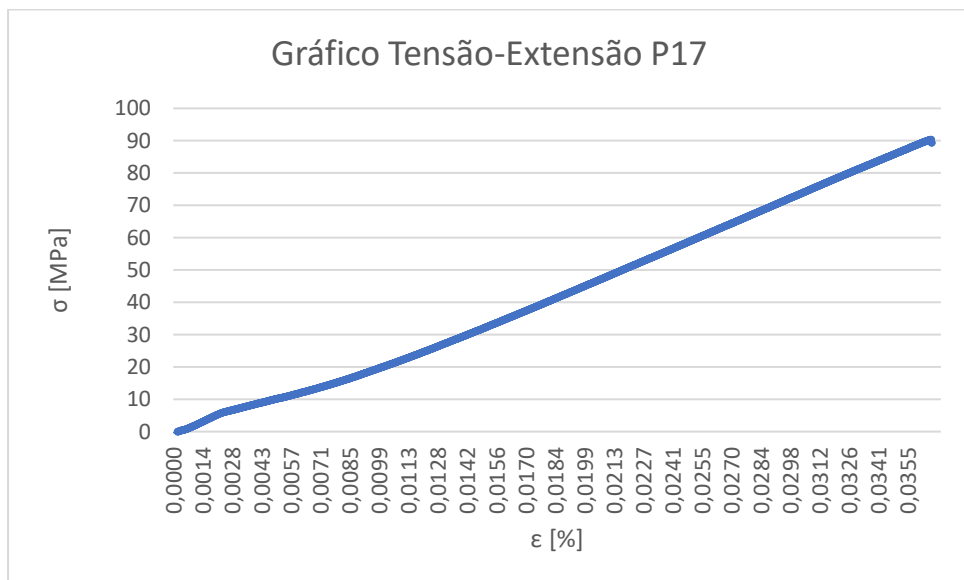
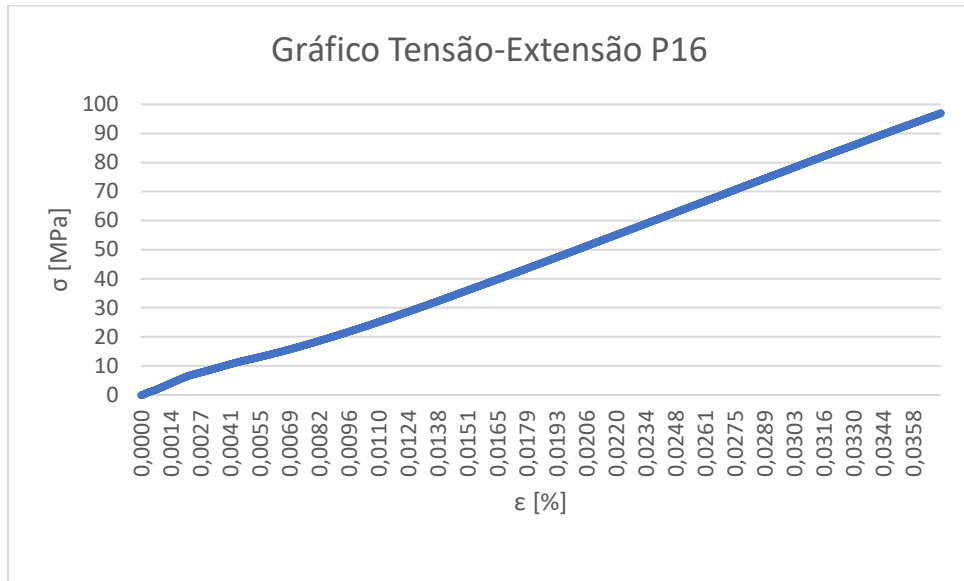
C1. ENSAIO DE TRAÇÃO-GRAFICOS TENSÃO-EXTENSÃO

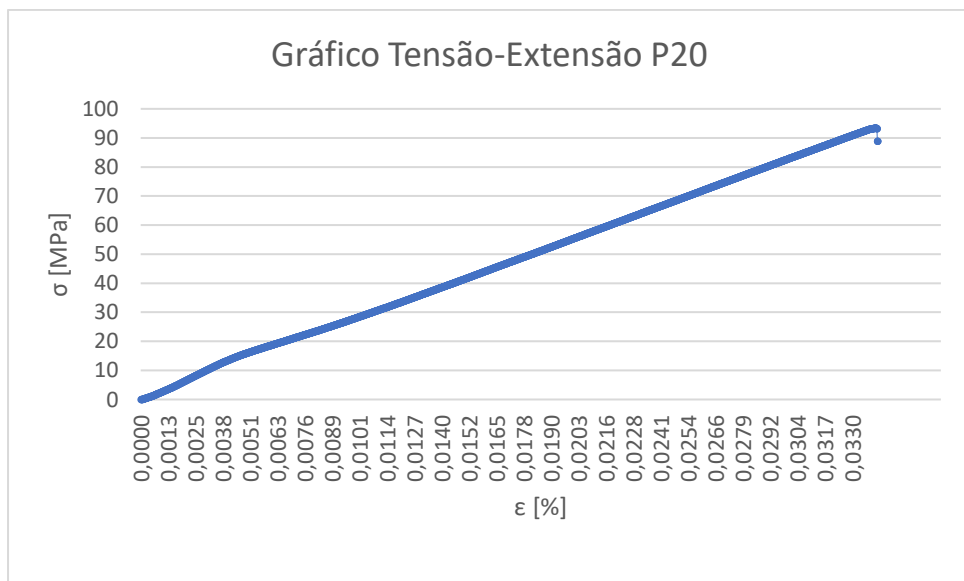
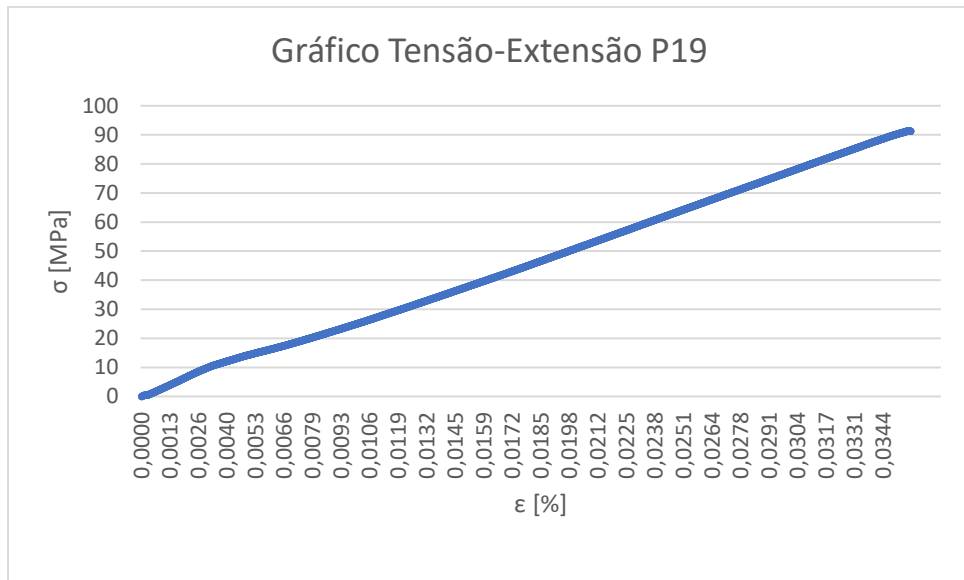
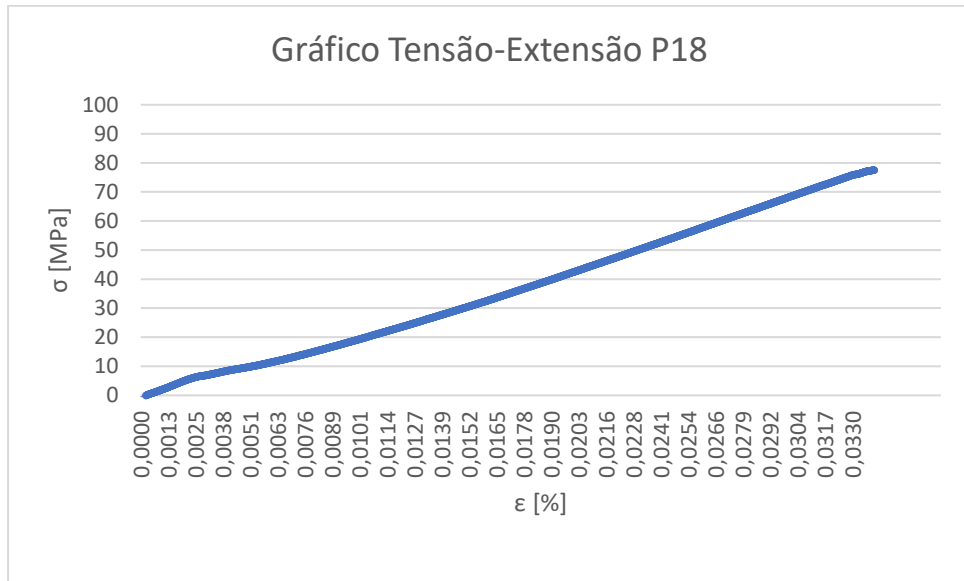
C1.1. Ensaio de tração a amostras sujeitas às condições de teste durante 32 horas.



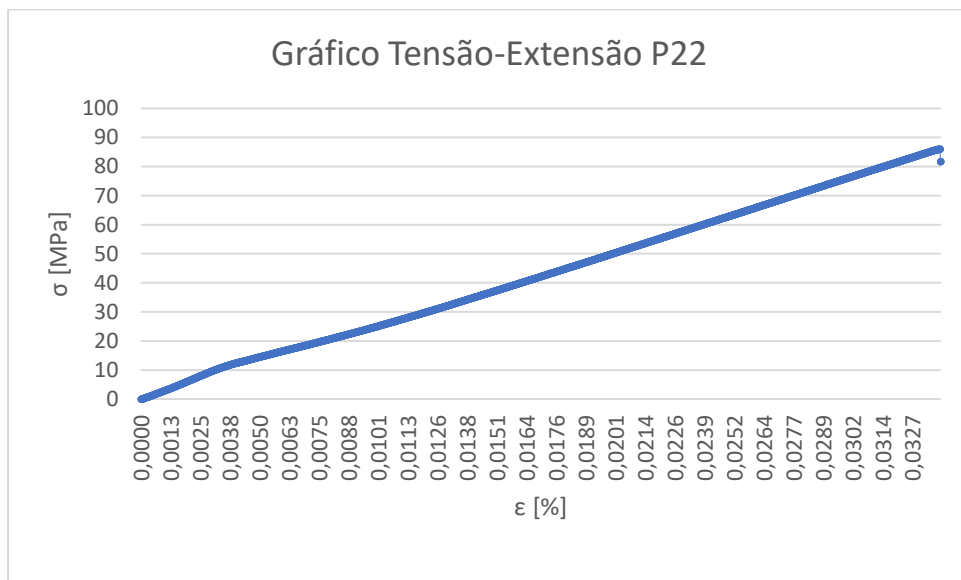
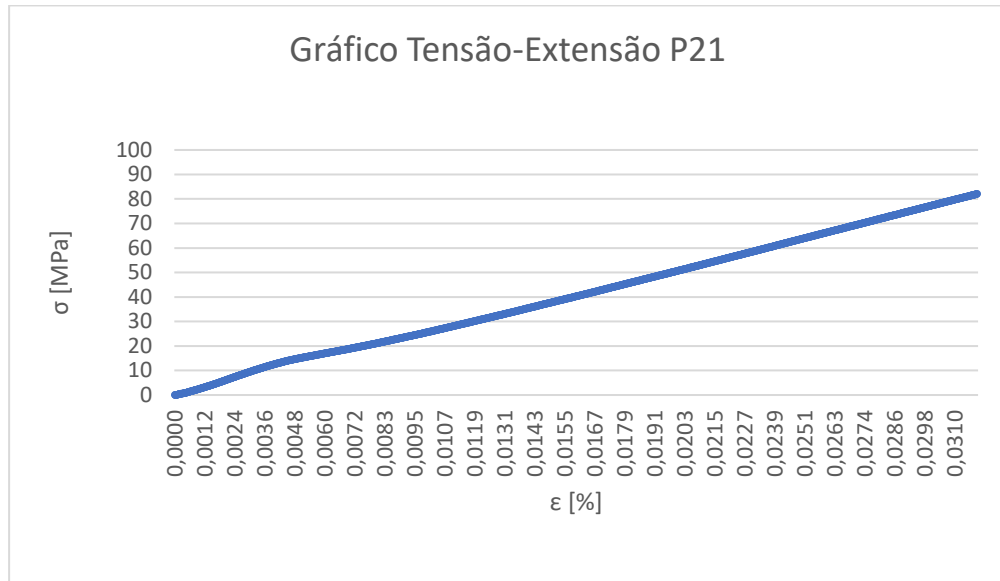


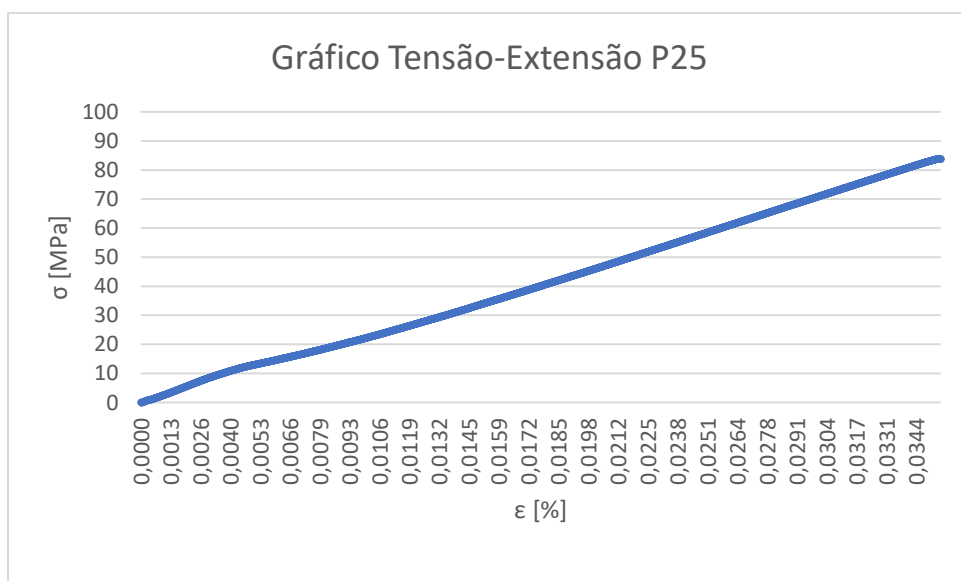
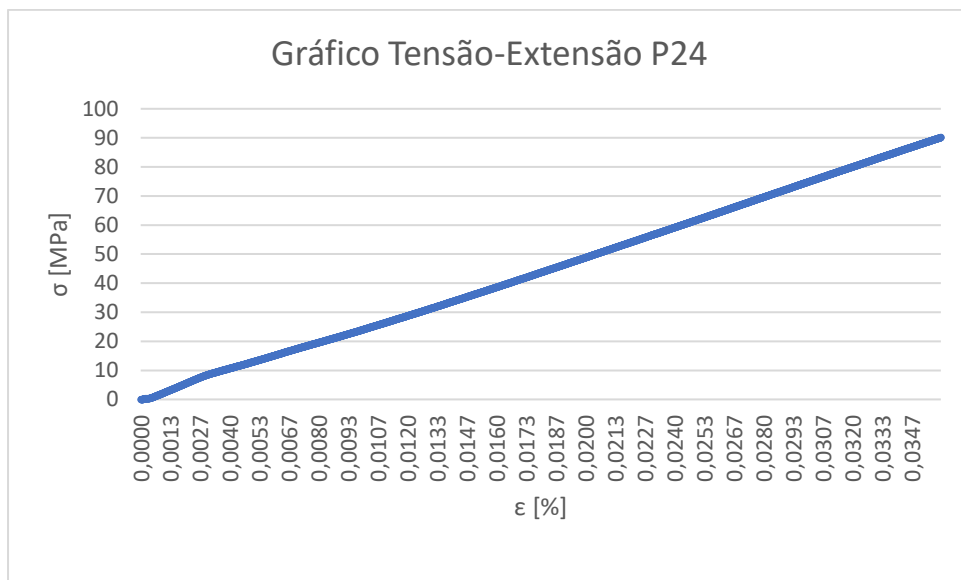
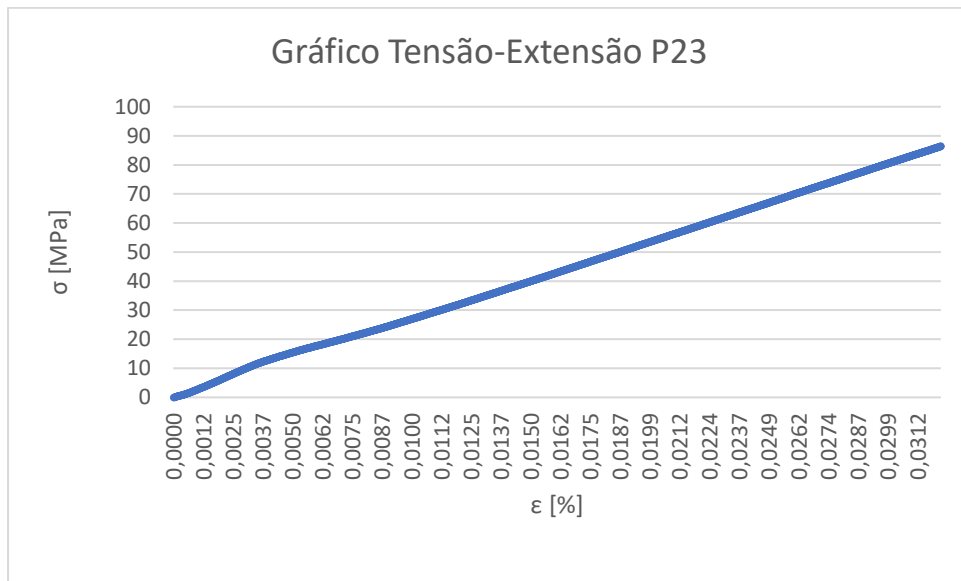
C1.2. Ensaio de tração a amostras sujeitas às condições de teste durante 64 horas.





C1.3. Ensaio de tração a amostras sujeitas às condições de teste durante 96 horas.





C1.4. Ensaio de tração a amostras sujeitas às condições de teste durante 128 horas.

