



Estudo experimental do efeito de radiação gama e X nas propriedades mecânicas de adesivos estruturais

RÚBEN ANDRÉ CARVALHO DA SILVA

outubro de 2023

ESTUDO EXPERIMENTAL DO EFEITO DE RADIAÇÃO GAMA E X NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ADESIVOS ESTRUTURAIS

Rúben André Carvalho da Silva

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO EXPERIMENTAL DO EFEITO DE RADIAÇÃO GAMA E X NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ADESIVOS ESTRUTURAIS

Rúben André Carvalho da Silva

1180509

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e coorientação da Doutora Rafaela Carla Barros Casais

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

AGRADECIMENTOS

Ao Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, orientador desta dissertação, pela sua orientação, dedicação, interesse, disponibilidade e ajuda demonstrados desde o primeiro dia para a concretização do presente trabalho.

À Doutora Rafaela Carla Barros Casais, pela sua coorientação e apoio demonstrado.

À engenheira Maria de Fátima Gonçalves da Costa Andrade por toda a ajuda e disponibilidade prestada na realização dos ensaios e na análise das superfícies de rotura.

A toda a direção da empresa QTEC – TÜV Áustria Ibéria, nomeadamente ao Diretor Geral Pedro Pimenta, pela confiança demonstrada, e ao coordenador do laboratório de ensaios do qual faço parte, e amigo Hélder Costa pelo apoio incondicional na realização dos ensaios nas instalações da empresa e pelo tempo despendido para tal. A todos os meus colegas de trabalho pela ajuda e incentivo.

A todos os meus colegas de curso pelas horas de estudo, convívio e trabalhos realizados.

A todos os professores e engenheiros com quem tive o privilégio de aprender.

Aos meus pais por todos os esforços que fizeram ao longo da minha vida para me proporcionarem a melhor educação e formação. Agradeço por se mostrarem disponíveis nos momentos menos bons e por sempre me tentarem alegrar e encorajar.

A toda a minha família e amigos pela privação de tempo e convívio causados.

RESUMO

Os adesivos estruturais são imensamente conhecidos e aceites pela comunidade científica e industrial como sendo materiais de engenharia de alto desempenho e o seu uso tem sido, cada vez mais, generalizado e adotado. Ainda assim, não se deve esquecer o facto de este método de união ser relativamente recente e estar em constante evolução. Porém, nenhuma outra técnica de união de materiais é tão polivalente, o que se deve essencialmente à sua contribuição para a integridade estrutural de componentes, à sua capacidade de unir materiais dissimilares e assim o adesivo se manter de forma permanente na montagem e, também, pela sua facilidade de fabrico e aplicação, redução de custos e tempos de produção. Embora a utilização de adesivos remonte à era pré-histórica, nenhuma outra técnica de união admite e atende as necessidades atuais com tanto êxito. Estes têm sido os principais motivos pelos quais as ligações adesivas são adotadas pelo seio industrial, nomeadamente as indústrias automóveis, aeronáuticas e até mesmo as nucleares e aeroespaciais. Deste modo, e uma vez que os adesivos, tal como qualquer outro material, sofrem degradação devido a fatores externos como a temperatura, humidade e radiação, torna-se fundamental conhecer quais os efeitos que estes fenómenos, nomeadamente a radiação, provocam nas propriedades mecânicas e de fratura dos adesivos.

Neste sentido, esta dissertação visa observar os efeitos que a radiação ionizante provoca nos adesivos, para diferentes períodos de exposição. Para isso, pretende-se fabricar provetes maciços de dois adesivos distintos, submetê-los a essas condições e determinar as suas principais propriedades mecânicas através da análise dos resultados alcançados na realização de ensaios de tração.

A comparação desses dados com os obtidos para os provetes de referência não se verificou conclusiva. De facto, não existiram diferenças suficientes que pudessem aferir que a radiação influencia as propriedades mecânicas de adesivos estruturais, sendo a principal explicação o acontecimento simultâneo (e respetiva anulação) dos efeitos de reticulação e cisão da cadeia molecular dos adesivos.

PALAVRAS-CHAVE

Adesivos estruturais; Ligações adesivas; Propriedades mecânicas; Degradação; Radiação.

ABSTRACT

Structural adhesives are immensely known and accepted by the scientific and industrial community as high-performance engineering materials and their use has been increasingly widespread and adopted. Even so, one should not forget the fact that this joining method is relatively recent and is in constant evolution. However, no other technique for bonding materials is as versatile, which is essentially due to its contribution to the structural integrity of components, its ability to bond dissimilar materials so that the adhesive remains permanently in the assembly and, also, for its ease of manufacture and application, reduction of costs and production times. Although the use of adhesives dates back to prehistoric times, no other joining technique accepts and meets current needs with such success. These have been the main reasons why adhesive bonds are adopted by industry, namely the automotive, aeronautical and even nuclear and aerospace industries. In this way, and since adhesives, like any other material, suffer degradation due to external factors such as temperature, humidity and radiation, it is essential to know what effects these phenomena, namely radiation, have on the mechanical properties. and breakage of adhesives.

To this end, this dissertation aims to observe the effects that ionising radiation has on adhesives for different periods of exposure. The aim is to manufacture solid specimens of two different adhesives, subject them to these conditions and determine their main mechanical properties by analysing the results of tensile tests.

Comparing these data with those obtained for the reference specimens was inconclusive. In fact, there were not enough differences to confirm that radiation influences the mechanical properties of structural adhesives, the main explanation being the simultaneous occurrence (and respective cancellation) of the effects of cross-linking and scission of the adhesive's molecular chain.

KEYWORDS

Structural adhesive; Adhesive bond; Mechanical properties; Degradation; Radiation.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABELAS	XIX
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS E UNIDADES	XXI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Metodologia	2
1.4. Estrutura da dissertação.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Utilização de adesivos em aplicações estruturais	3
2.1.1. Enquadramento da utilização de adesivos estruturais	3
2.1.2. Fundamentos das ligações adesivas	4
2.1.2.1. Comparação com outros métodos de ligação.....	6
2.1.2.2. Etapas de um processo de ligação	8
2.1.3. Adesivos estruturais.....	8
2.1.4. Tipos de esforços e modos de rotura em juntas adesivas	10
2.1.4.1. Modos de rotura	12
2.1.5. Tipos de juntas	13
2.1.6. Aplicações industriais.....	14
2.2. Ensaio a adesivos estruturais.....	16
2.2.1. Ensaio para obtenção de propriedades físicas	16
2.2.2. Ensaio mecânicos	19
2.2.2.1. Ensaio de tração	19
2.2.2.2. Ensaio de corte	20
2.2.3. Ensaio de fratura	23
2.2.3.1. Fratura em modo I.....	23
2.2.3.2. Fratura em modo II.....	25
2.2.3.3. Fratura em modo misto (I+II)	26
2.2.3.4. Estado da arte dos ensaios mais comuns.....	28
2.3. Degradação de adesivos.....	28
2.3.1. Tipos de degradação	28
2.3.1.1. Influência da temperatura.....	29
2.3.1.2. Influência da humidade	30
2.3.1.3. Radiação	31
2.3.2. Estado da arte na degradação de adesivos.....	35
2.4. Técnicas de inspeção de materiais e estruturas	36
2.4.1. Detecção de defeitos	36
2.4.1.1. Defeitos comuns em adesivos.....	37
2.4.2. Técnicas de inspeção destrutivas.....	38

2.4.3. Técnicas de inspeção não destrutivas.....	40
2.5. Análise crítica da revisão bibliográfica	41
3. DESENVOLVIMENTO	43
3.1. Planeamento do trabalho.....	43
3.2. Requisitos e limitações.....	43
3.3. Adesivos utilizados	44
3.3.1. Araldite® AV138	44
3.3.2. Sikaforce® 7818 L7	45
3.4. Fabrico dos provetes	47
3.4.1. Geometria dos provetes e molde utilizado.....	47
3.4.1.1. Preparação do molde	48
3.4.2. Aplicação do adesivo por moldação em molde aberto	49
3.4.2.1. Aplicação do adesivo Araldite® AV138.....	49
3.4.2.2. Aplicação do adesivo Sikaforce® 7818 L7.....	51
3.4.3. Cura e extração dos provetes	52
3.5. Ensaios realizados.....	54
3.5.1. Princípios gerais sobre radiação ionizante.....	54
3.5.2. Fontes de radiação utilizadas.....	56
3.5.2.1. Fontes radioativas seladas	56
3.5.2.2. Equipamentos geradores de raios X.....	58
3.5.3. Exposição dos provetes a radiação ionizante	59
3.5.3.1. Fontes radioativas seladas	60
3.5.3.2. Equipamento gerador de raios X ERESKO 65 MF 4	61
3.5.4. Cálculo das dosagens obtidas	63
3.5.4.1. Provetes irradiados com raios gama.....	64
3.5.4.2. Provetes irradiados com raios X.....	65
3.5.5. Ensaio de tração.....	65
3.5.5.1. Condições de ensaio.....	67
3.5.5.2. Medição de deformações.....	68
3.6. Análise de resultados	68
3.6.1. Análise da superfície de rotura	69
3.6.2. Curvas σ - ϵ	71
3.6.2.1. Araldite® AV138	71
3.6.2.2. Sikaforce® 7818 L7	73
3.6.3. Propriedades mecânicas	76
3.6.3.1. Araldite® AV138	76
3.6.3.2. Sikaforce® 7818 L7	81
3.6.4. Discussão de resultados.....	85
3.6.4.1. Araldite® AV138	85
3.6.4.2. Sikaforce® 7818 L7	86
4. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	87

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
ANEXO A. Adesivo Araldite® AV138.....	97
ANEXO B. Adesivo Sikaforce® 7818 L7	103
ANEXO C. Tabela de decaimento do isótopo ¹⁹² Ir	107
ANEXO D. Tabela de decaimento do isótopo ⁷⁵ Se.....	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Ferramenta manual Neandertal usando alcatrão como adesivo (Rincon, 2019)	3
Figura 2 - Principais constituintes de uma junta adesiva Pinto (2007)	4
Figura 3 - Utilização de adesivos em compósitos de núcleo ninho de abelha, adaptado de Thippyreddy (2018).....	5
Figura 4 - Tipos de esforços presentes numa junta adesiva: (a) compressão; (b) tração; (c) corte; (d) arrancamento; (e) clivagem (Ebnesajjad & Landrock, 2015d).....	10
Figura 5 - Distribuição de tensão de corte (Pinto, 2007)	11
Figura 6 - Efeito do comprimento ou largura de sobreposição na resistência ao corte (Pinto, 2007)	11
Figura 7 - Juntas topo-a-topo modificadas, adaptado de Silva (2011).....	14
Figura 8 - Diferentes constituintes de um Airbus A380 ligados por adesivos (Tserpes, 2020).....	15
Figura 9 - Painéis de proteção térmica colados a cápsula corporal para reentrada na atmosfera, adaptado de Désagulier et al. (2018).....	15
Figura 10 – Utilização de adesivos em pares vidro-metal: (a) silicone e (b) acrílico (Silvestru et al., 2019)	16
Figura 11 - Utilização de adesivo na colagem da sola de um sapato (Loctite, 2022).....	16
Figura 12 - Equipamentos de DSC: (a) DSC de fluxo de calor e (b) DSC de compensação de potência, adaptado de Bernal et al. (2002)	18
Figura 13 - Curva típica obtida para a técnica de DMA que enfatiza a Tg (Lorandi et al., 2016).....	18
Figura 14 - Provetes maciços para ensaio de tração de acordo com a norma EN ISO 527-2 (da Silva et al., 2012)	20
Figura 15 -Geometria de provete JSS segundo a norma ASTM D 1002 (Morais, 2013).....	20
Figura 16 - Ensaio <i>losipescu</i> em: (a) provete maciço; (b) provete com junta adesiva e (c) <i>layout</i> do ensaio (Monteiro, 2020)	21
Figura 17 – Representação de provetes para ensaio <i>Arcan</i> (Silva, 2011).....	21
Figura 18 - Representação de provetes para ensaio de <i>Napkin-ring test</i> , adaptado de Silva (2011)	22
Figura 19 - Representação de provetes para ensaio TAST segundo a norma ISO 11003-2:2019, adaptado de (da Silva et al., 2012).....	22
Figura 20 - Tipos de modos de fratura em juntas adesivas, adaptado de Chaves et al. (2014).....	23
Figura 21 - Representação de um provete DCB segundo a norma ASTM D3433-99, adaptado de da Silva et al. (2012).....	24
Figura 22 - Representação de um provete DCB com blocos de carga, adaptado de Blackman (2011)	24
Figura 23 - Representação de um provete TDCB (Blackman, 2011)	25
Figura 24 – Representação esquemática dos ensaios em modo II: a) ENF; b) ELS e c) 4-ENF, adaptado de Blackman (2011).....	25
Figura 25 – Modificação da interface por meio de moléculas de água, adaptado de (Petrie, 2006)	31
Figura 26 - Processos primários de interação de polímeros com radiação ionizante (P = Polímero, R = Radical), adaptado de (Makuuchi, 2012a)	31
Figura 27 - Efeito da radiação em materiais poliméricos, adaptado de (Makuuchi, 2012b).....	32

Figura 28 - Relação entre a dose de radiação e o peso molecular em polímeros, adaptado de Makuuchi (2012a)	33
Figura 29 - Provetes maciços submetidos a diferentes dosagens de radiação (Zimmermann et al., 2019)	34
Figura 30 - Resistência à tração de vários adesivos depois irradiados, adaptado de Zimmermann et al. (2022)	35
Figura 31 - Defeitos típicos de uma junta adesiva, adaptado de Adams and Cawley (1988)	37
Figura 32 - Princípio de funcionamento do ensaio de impacto Charpy , adaptado de Chandrasekar et al. (2018)	39
Figura 33 - Proвете para execução do ensaio de fadiga a juntas adesivas submetidas a esforços de corte, adaptado de ASTM D3166 - 2012	39
Figura 34 - Curvas σ - ϵ experimentais do adesivo Araldite® AV138 (Campilho et al., 2011).....	44
Figura 35 - Adesivo Araldite® AV138.....	45
Figura 36 - Pistola Sika® com bico de mistura de núcleo helicoidal.....	46
Figura 37 - Dimensões, em mm, dos provetes maciços de adesivo de acordo com a norma NF T 76-142 20 (Monteiro et al., 2015)	47
Figura 38 - Placas constituintes do molde para fabrico de provetes maciços de adesivo	47
Figura 39 - Limpeza da placa intermédia do molde com acetona	48
Figura 40 – Aquecimento, no forno, das placas constituintes do molde.....	48
Figura 41 - Aplicação do desmoldante Loctite Frekote® 770-NC às placas do molde	49
Figura 42 - Fixação da placa intermédia e inferior para aplicação do adesivo	50
Figura 43 - Adesivo Araldite® AV138 aplicado e compactado no molde	50
Figura 44 - Fecho do molde e surgimento de excesso de adesivo.....	51
Figura 45 - Aplicação do adesivo Sikaforce® 7818 L7 ao molde	51
Figura 46 - Adesivo Sikaforce® 7818 L7 aplicado e compactado no molde	52
Figura 47 - Excesso de adesivo expulso no aperto do molde	52
Figura 48 - Remoção do adesivo excedente sobre a placa superior.....	53
Figura 49 – Acabamento superficial dos provetes de adesivo: a) Araldite® AV138 e b) Sikaforce® 7818 L7.....	53
Figura 50 - Remoção da rebarba dos provetes de adesivo: a) Araldite® AV138 e b) Sikaforce® 7818 L7	54
Figura 51 - Constituição de um dispositivo de exposição radiográfica, adaptado de QSA Global (2023)	57
Figura 52 - Equipamento SENTINEL 880 Series Delta (QSA Global, 2023)	58
Figura 53 - Telecomando.....	58
Figura 54 - Tubo guia.....	58
Figura 55 - Colimador	58
Figura 56 - Principais componentes de uma ampola de raios X, adaptado de Curry III et al. (1990)	59
Figura 57 – Gerador de raios X ERESKO 65 MF 4 (General Electric, 2023)	59
Figura 58 - Fixação dos provetes em esferovite.....	60
Figura 59 - Montagem da fonte de selénio para irradiação dos provetes.....	60
Figura 60 - Montagem da fonte de irídio para irradiação dos provetes	61
Figura 61 - Colocação de um colimador na ponteira do tubo guia	61
Figura 62 - Preparação dos provetes e gerador de raios X	62

Figura 63 - Posicionamento dos provetes de acordo com o laser do gerador de raios X.....	62
Figura 64 - Parâmetros utilizados para exposição dos provetes a radiação do tipo X.....	63
Figura 65 - Máquina universal de ensaios Shimadzu Autograph AG-X 100	66
Figura 66 - Provede de adesivo Sikaforce® 7818 L7 do lote 4, número 5.....	66
Figura 67 - Fixação de provede de adesivo Sikaforce® 7818 L7.....	67
Figura 68 – <i>Setup</i> do ensaio de tração a um provede de adesivo Araldite® AV138.....	67
Figura 69 - Extensômetro mecânico utilizado.....	68
Figura 70 - Tensão limite elástico do provede G4_5 de adesivo Sikaforce® 7818 L7, irradiado com raios X durante 60 minutos.....	69
Figura 71 - Microscópio estereoscópio Olympus SZ-PT.....	70
Figura 72 - Defeitos presentes na secção transversal de rotura do provede G3_1 de adesivo Araldite® AV138.....	70
Figura 73 - Medição da área total dos defeitos	70
Figura 74 - Curvas σ - ϵ dos provedes de referência e dos provedes submetidos a raios X	71
Figura 75 - Curvas σ - ϵ dos provedes de referência e dos provedes submetidos a raios gama ^{192}Ir .	72
Figura 76 - Curvas σ - ϵ dos provedes de referência e dos provedes submetidos a radiação gama da fonte ^{75}Se	72
Figura 77 - Comparação das curvas σ - ϵ dos provedes de referência e os provedes inválidos	73
Figura 78 - Provede G3_1 de adesivo Sikaforce® 7818 L7 dado como inválido	74
Figura 79 - Curvas σ - ϵ dos provedes de adesivo Sikaforce® 7818 L7 de referência e dos provedes submetidos a raios X.....	74
Figura 80 - Curvas σ - ϵ dos provedes de adesivo Sikaforce® 7818 L7 de referência e dos provedes submetidos a raios gama da fonte ^{192}Ir	75
Figura 81 – Curvas σ - ϵ dos provedes de adesivo Sikaforce® 7818 L7 de referência e dos provedes submetidos a raios gama da fonte ^{75}Se	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo acerca da estrutura da dissertação	2
Tabela 2 - Desenvolvimento histórico de adesivos estruturais, adaptado de (Ebnesajjad & Landrock, 2015c; Hartshorn, 1986)	4
Tabela 3 - Principais vantagens e desvantagens das ligações adesivas (Ebnesajjad & Landrock, 2015a; Harper, 2002; Hartshorn, 1986).....	6
Tabela 4 - Comparação das principais características dos processos de união mais utilizados, adaptado de (Ebnesajjad & Landrock, 2015a)	7
Tabela 5 - Principais famílias de adesivos estruturais.....	9
Tabela 6 - Modos de rotura em juntas adesivas, adaptado de Pinto (2007)	12
Tabela 7 - Tipos de juntas mais comuns e as suas vantagens, adaptado de Adams and Wake (1984); Pinto (2007).....	13
Tabela 8 - Tipos de ensaios em modo misto I+II	27
Tabela 9 - Resumo dos ensaios à fratura mais utilizados.....	28
Tabela 10 - Coeficientes de permeabilidade e constantes de difusão da água em polímeros, adaptado de (Petrie, 2006)	30
Tabela 11 – Valores de cedência química de radiação para efeitos de reticulação e cisão em polímeros comuns, adaptado de Makuuchi (2012a)	33
Tabela 12 - Quadro resumo dos efeitos da reticulação e cisão da cadeia nas propriedades de um polímero.....	33
Tabela 13 - Quadro resumo das propriedades mecânicas avaliadas de adesivos submetidos a radiação, adaptado de Zimmermann et al. (2022)	34
Tabela 14 - Quadro resumo dos avanços mais recentes na degradação de adesivos	35
Tabela 15 - Plano de intervenções	43
Tabela 16 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138, adaptado de Campilho et al. (2011)	45
Tabela 17 - Ficha técnica do adesivo Sikaforce® 7818 L7, adaptado de (Sika®, 2013)	46
Tabela 18 - Tempos de cura dos adesivos utilizados	52
Tabela 19 - Principais doenças provocadas por agentes físicos: radiação ionizante, adaptado de Governo (2007)	55
Tabela 20 - Tempo de meia vida e tipo de radiação emitida de certos isótopos	57
Tabela 21 - Principais diferenças entre equipamentos de gamagrafia, adaptado de QSA Global (2023)	58
Tabela 22 - Constantes específicas de radionuclídeos, adaptado de Delacroix et al. (2002)	64
Tabela 23 - Dosagens absorvidas pelos provetes submetidos às radiações do tipo gama das fontes de Ir ¹⁹² e Se ⁷⁵	64
Tabela 24 – Valores de Ḋ para os geradores de raios X a 1 metro de distância, adaptado de Stericycle Portugal (2023)	65
Tabela 25 - Dosagens absorvidas pelos provetes submetidos à radiação do tipo X do gerador ERESKO 65 MF4	65
Tabela 26 - Conversão de pixel para milímetro, para uma ampliação da lente da lupa de 2,5x	70
Tabela 27 - Propriedades mecânicas dos provetes de referência do adesivo Araldite® AV138.....	76

Tabela 28 - Propriedades mecânicas dos provetes do adesivo Araldite® AV138 irradiados com raios X	77
Tabela 29 - Área dos defeitos dos provetes submetidos a raios X durante 60min.....	78
Tabela 30 - Propriedades mecânicas dos provetes do adesivo Araldite® AV138 irradiados com raios gama do isótopo ¹⁹² Ir	79
Tabela 31 - Propriedades mecânicas dos provetes do adesivo Araldite® AV138 irradiados com raios gama do isótopo ⁷⁵ Se	80
Tabela 32 - Propriedades mecânicas dos provetes de referência do adesivo Sikaforce® 7818 L7..	81
Tabela 33 - Propriedades mecânicas dos provetes do adesivo Sikaforce® 7818 L7 irradiados com raios X.....	81
Tabela 34 - Propriedades mecânicas dos provetes do adesivo Sikaforce® 7818 L7 irradiados com raios gama do isótopo ¹⁹² Ir.....	83
Tabela 35 - Propriedades mecânicas dos provetes do adesivo Sikaforce® 7818 L7 irradiados com raios gama do isótopo ⁷⁵ Se	84

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS E UNIDADES

Lista de Siglas

^{137}Cs	Césio-137
^{192}Ir	Írídio-192
^{226}Ra	Rádio-226
4-ENF	Four-Point End-Notched Flexure
^{60}Co	Cobalto-60
^{75}Se	Selénio-75
ADCB	Asymmetric Double-Cantilever Beam
AFM	Microscopia de Força Atômica
ASNT	The American Society for Nondestructive Testing
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATDCB	Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam
CNC	Controlo Numérico Computorizado
DCB	Double-Cantilever Beam
DMA	Análise Mecânica Dinâmica
DSC	Calorimetria Diferencial de Varredura
DTG	Termogravimetria Diferencial
ELS	End-Loaded Split
ENF	End-Notched Flexure
FRMM	Fixed-Ratio Mixed-Mode
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
JSS	Junta de sobreposição simples
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica
MMA	Metilmetacrilato
MMB	Mixed-Mode Bending
PEAD	Poliétileno de alta densidade
PEBD	Poliétileno de baixa densidade
PIB	Poliisobutileno
PMMA	Polimetilmetacrilato
PRFC	Polímero Reforçado com Fibra de Carbono
PS	Poliestireno
PTFE	Politetrafluoretileno
PVAc	Acetato de polivinil
SI	Sistema Internacional

SLB	Single-Leg Bending
TAST	Thick Adherend Shear Test
TDCB	Tapered Double-Cantilever Beam
TDMA	Análise Termodinâmica-mecânica
TMA	Análise Termomecânica

Lista de Símbolos

$\bar{\alpha}$	Coeficiente médio de expansão térmica linear	
$\Delta\epsilon$	Variação de deformação	
$\Delta\sigma$	Variação de tensão	
a	Comprimento da fenda	mm
A	Área da secção transversal	mm ²
a_0	Comprimento inicial da fenda	mm
E	Módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de Young	MPa
$F_{m\acute{a}x}$	Força máxima	N
G_c	Taxa crítica de libertação de energia	
G_{Ic}	Taxa crítica de libertação de energia em modo I	
G_{IIc}	Taxa crítica de libertação de energia em modo II	
J_I	Taxa de libertação de energia em modo I (integral-J)	
J_{II}	Taxa de libertação de energia em modo II (integral-J)	
$R_{p0,2}$	Tensão de limite elástico	MPa
T_g	Temperatura de transição vítrea	°C
α	Coeficiente físico de expansão térmica	
γ_{lv}	Energia superficial líquido-vapor	
γ_{sl}	Energia superficial sólido-líquido	
γ_{sv}	Energia superficial sólido-vapor	
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima	MPa
ψ	Ângulo de fase	

Lista de Unidades

Ci	Curies
Bq	Becquerel
eV	Elétron-volt
Gy	Gray
G	Cedência química de radiação
kN	Quilonewton

1. INTRODUÇÃO

A utilização de adesivos em ambientes industriais é uma solução atualmente muito procurada, uma vez que confere variadas vantagens quando se compara com os remanescentes processos de ligação. É frequente encontrar os adesivos em diversas aplicações e, com isto, a degradação destes materiais deverá ser considerada para a prevenção de falhas de estruturas. Posto isto, e atendendo que em certas aplicações estes materiais são incididos por radiação, viu-se a necessidade de estudar os efeitos da radiação em juntas adesivas, no que diz respeito à alteração das suas propriedades mecânicas.

1.1. Contextualização

A tendência, a nível mundial, das indústrias resume-se à simplificação e inovação de processos de forma a cumprir com as especificações e exigências de projeto. Como tal, a evolução dos processos convencionais de ligação de materiais causou significativas melhorias no fabrico de equipamentos e mecanismos. Os adesivos, ainda que recentes no mundo industrial, têm um papel muito importante na união de materiais e possibilitam inúmeras vantagens sobre os outros processos. As suas características singulares e competitivas são usufruídas em diversas indústrias que estão presentes no mundo atual, desde infraestruturas, transportes, aeronáutica e até mesmo no setor aeroespacial.

Isso significa que as ligações adesivas deverão cumprir as suas funções sob rigorosos esforços e condições ambientais, algo que poderá provocar a sua degradação e/ou perda de qualidades. Como tal é importante perceber, quantificar e relacionar essa degradação com as propriedades dos adesivos. De facto, uma das maiores limitações neste campo dá-se a nível da degradação por radiação, algo que carece de maior investigação.

1.2. Objetivos

A literatura científica refere que os adesivos, por se tratarem de materiais de natureza polimérica, onde predominam as ligações covalentes, são mais sensíveis à radiação ionizante. No entanto, na prática verifica-se que este é um tema ainda por explorar. Neste sentido, esta dissertação tem como principal objetivo demonstrar e quantificar os efeitos que diferentes tipos de radiação ionizante, mais concretamente do tipo X e gama, provocam nas propriedades mecânicas de adesivos estruturais vastamente utilizados no seio das indústrias. Para o efeito, foram fabricados provetes de dois adesivos, previamente selecionados, com propriedades e comportamentos mecânicos distintos, nomeadamente o adesivo Araldite® AV138 e Sikaforce® 7818 L7. A realização de ensaios de tração a provetes de referência, isto é, cujas propriedades não se alteraram desde o momento da sua cura, e a provetes irradiados, permite comparar e quantificar a melhoria ou deterioração das propriedades mecânicas nestes adesivos. Com isto será possível verificar a resistência que determinado adesivo possui a radiações ionizantes.

1.3. Metodologia

A metodologia adotada, para o desenvolvimento do presente trabalho, foi a metodologia de investigação experimental. Deste modo, foram definidos os principais objetivos e as condições que lhe estão diretamente relacionadas de forma a ser possível alcançar as conclusões pretendidas. Para tal, foi necessário recorrer a uma pesquisa bibliográfica detalhada e centrada, essencialmente, na degradação de adesivos estruturais devido à radiação. Essa recolha de informação foi obtida, essencialmente, a partir de artigos científicos, livros e outras investigações experimentais sendo a quebra e a formação de ligações moleculares os efeitos mais predominantemente relatados por grande parte dos investigadores. A componente experimental realizou-se tendo por base os conhecimentos adquiridos na revisão bibliográfica e na caracterização de adesivos de outros investigadores sendo possível selecionar os materiais, procedimentos e ensaios necessários.

1.4. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em quatro importantes capítulos que podem ser resumidos pela Tabela 1.

Tabela 1 - Resumo acerca da estrutura da dissertação

Capítulo	Conteúdo
1. Introdução	Capítulo onde se dá a conhecer ao leitor o tema desta dissertação e respetivas dificuldades encontradas, objetivos que se pretende cumprir, qual a metodologia abordada para os mitigar e a estruturação do trabalho.
2. Revisão Bibliográfica	Componente que pretende dar a conhecer, com maior detalhe e com base em estudos recentes, os principais temas e terminologias pelos quais se rege este trabalho. Neste capítulo são ainda reunidas algumas informações presentes na literatura acerca da degradação de adesivos assim como o efeito que esta provoca nas propriedades mecânicas dos mesmos, permitindo assim tirar as conclusões necessárias para que haja um termo de comparação com a componente experimental do trabalho.
3. Desenvolvimento	Capítulo onde se encontram reunidas e explicadas todas as etapas necessárias para a realização da componente experimental. Engloba a escolha dos adesivos utilizados, o fabrico de provetes maciços desse mesmo material e a realização de ensaios mecânicos após a exposição dos provetes a dois tipos de radiação ionizante. Além disso é ainda realizada uma análise e discussão dos resultados obtidos.
4. Conclusão	Capítulo onde são apresentados e explicados os resultados obtidos através da análise das propriedades mecânicas e da comparação com outros trabalhos e onde se encontram as sugestões de trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A utilização de ligações adesivas em aplicações estruturais tem crescido de forma exponencial nos últimos anos, e suscitado o interesse das mais variadas indústrias devido às suas vantagens face a outras técnicas de união de materiais convencionais como a soldadura ou a rebiteagem (Ramalho et al., 2020). Em muitos casos, as juntas adesivas devem ser capazes de suportar grandes solicitações e de resistir a condições ambientais adversas, como por exemplo a radiação. Este capítulo visa descrever, num primeiro momento, os conceitos gerais e fundamentais das ligações adesivas, com destaque para os tipos de esforços e modos de rotura, principais tipos de adesivos estruturais e as suas aplicações industriais. São também abordados os tipos de degradação à qual um adesivo pode estar sujeito e quais os seus efeitos nas propriedades do mesmo, sendo a degradação por radiação o tema com maior destaque. Como último tópico, são descritos os tipos de ensaios realizados para a análise das propriedades mecânicas de um adesivo.

2.1. Utilização de adesivos em aplicações estruturais

2.1.1. Enquadramento da utilização de adesivos estruturais

O uso de adesivos remonta, na história, à Era do Gelo, mais concretamente à Era dos Homens de Neandertal. Na verdade, certos registos e escavações sugerem que a primeira substância adesiva a ser criada foi da autoria desses homens primitivos para o fabrico de ferramentas e armamento (Figura 1). Além destas evidências, foram encontradas e datadas outras tantas em diferentes períodos da nossa história (Adams, 2005).



Figura 1 - Ferramenta manual Neandertal usando alcatrão como adesivo (Rincon, 2019)

Apesar da crescente evolução humana foi apenas a partir do início do século XX que se deu a industrialização de adesivos sintéticos. Até lá eram utilizados, mesmo para aplicações estruturais, vários tipos de adesivos naturais, que eram fabricados tendo por base subprodutos animais, vegetais ou minerais. Nos anos que se seguiram esses adesivos foram sendo substituídos por outros baseados em polímeros sintéticos. O primeiro adesivo sintético a ser formulado foi o Fenol-formaldeído em 1912, no entanto devido aos seus altos custos de fabrico apenas se tornou

devidamente comercializado em 1930 (Adams, 2005). Ainda assim mostrou ser um adesivo muito eficaz e de apreciadas características, por exemplo, na impermeabilização de madeira contraplacada para o fabrico de navios e aeronaves.

Os anos que se seguiram resultaram no desenvolvimento e criação de novos, mais resistentes e versáteis adesivos sintéticos conforme podemos analisar na Tabela 2:

Tabela 2 - Desenvolvimento histórico de adesivos estruturais, adaptado de (Ebnesajjad & Landrock, 2015c; Hartshorn, 1986)

Data aproximada de disponibilidade comercial	Adesivo
1910	Fenol-formaldeído
1930	Ureia-formaldeído
1940	Nitrilo-fenólicos; Vinilo-fenólicos; acrílicos; poliuretanos
1950	Epóxidos; Cianoacrilatos; anaeróbicos
1960	Poliamidas; Polibenzimidazol; <i>Polyquinoxaline</i>
1970	Acrílicos modificados
1980	Endurecedores para resinas termoendurecíveis; Epóxidos à base de água
1990	Epóxidos modificados com poliuretano
2000	Adesivos de uma ou duas partes sem solventes

Atualmente podemos afirmar que existem adesivos para praticamente todo o tipo de aplicações e solicitações que vão desde o seu uso em utensílios do dia-a-dia como componentes eletrônicos, sapatos ou brinquedos até a equipamentos de elevada importância como aeronaves.

2.1.2. Fundamentos das ligações adesivas

Uma junta adesiva define-se, segundo a *American Society for Testing and Materials* (ASTM), como sendo “o estado em que duas superfícies são mantidas juntas por meio de forças interfaciais que podem consistir em forças de valência ou ações de bloqueio ou ambos” (ASTM D 907, 1999; Wegman & Van Twisk, 2013). Assim sendo, é imperativo conhecer quais os constituintes que estão envolvidos numa junta adesiva (Figura 2), a saber: aderente, adesivo, interfase e interface.

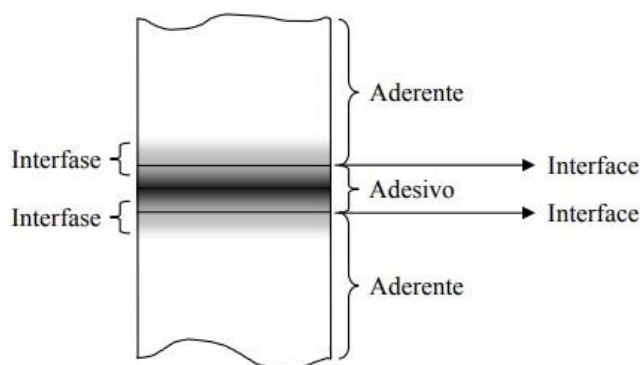


Figura 2 - Principais constituintes de uma junta adesiva Pinto (2007)

O termo aderente refere-se ao material ou componente a ser ligado pelo adesivo. Denomina-se aderente ao componente após colagem, porém o termo substrato (material a ser ligado antes da ligação adesiva) é frequentemente utilizado sem qualquer distinção entre ambos (Petrie, 2006).

O adesivo é definido como sendo a substância capaz de promover a união entre superfícies dos substratos, de forma permanente e resistente devido à ação combinada de forças adesivas e coesivas (Ebnesajjad & Landrock, 2015a; Petrie, 2006).

A área compreendida entre o adesivo e o aderente é denominada como interfase e representa uma fina região que vai desde um ponto do aderente onde as propriedades físicas e químicas se alteram e são diferentes das do *bulk* do aderente até um ponto no adesivo onde as suas propriedades são iguais às do *bulk* do adesivo (ASTM D 907, 1999; Hartshorn, 1986; Petrie, 2006). A interface, que está contida na interfase, é uma camada limite e representa o plano de contacto entre a superfície de um material com a superfície do outro, tal como entre o adesivo e o aderente (Petrie, 2006).

Assim como todos os outros métodos de união, as ligações adesivas apresentam vantagens e desvantagens que dependem sempre de requisitos específicos (Petrie, 2006). A união de dois substratos por adesivo tanto pode ser, dependendo do tipo de aplicação do componente, uma má ou uma boa opção, contudo existem momentos ou cenários em que esse método de união é fundamental e imprescindível. Exemplo disso é a união de objetos cerâmicos ou a junção de núcleos em ninho de abelha com peles de revestimento (Figura 3) (Harper, 2002).

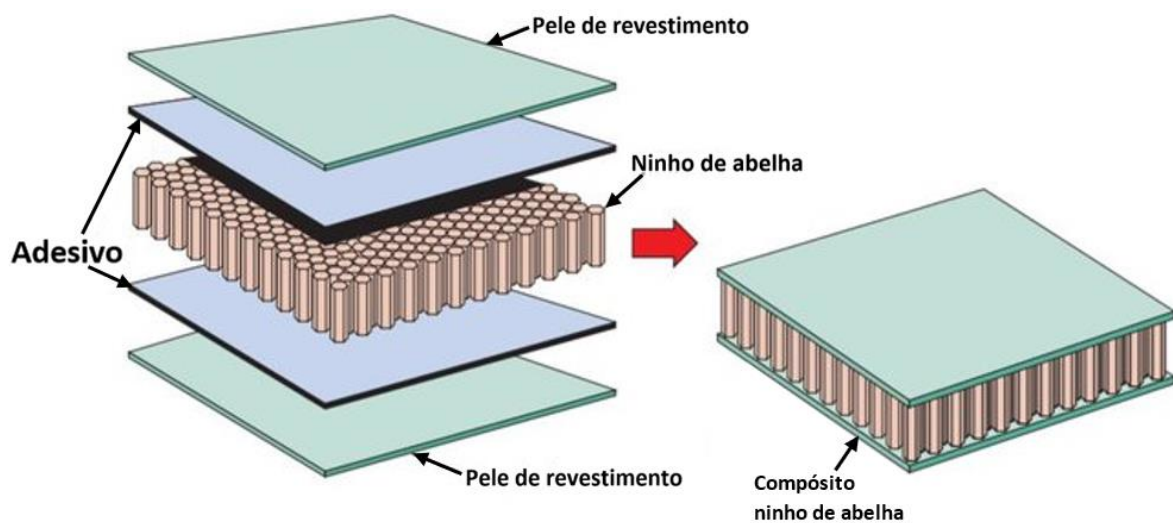


Figura 3 - Utilização de adesivos em compósitos de núcleo ninho de abelha, adaptado de Thippireddy (2018)

Por vezes os adesivos são escolhidos como método de união devido ao seu reduzido custo quando comparado com outros métodos ou ainda pela sua facilidade e ligação quase instantânea, tendo como exemplo a cola de sapateiro, colas para embalagem, entre outras (Hartshorn, 1986). A Tabela 3 resume as principais vantagens e desvantagens inerentes ao método de ligação utilizando adesivos.

Tabela 3 - Principais vantagens e desvantagens das ligações adesivas (Ebnesajjad & Landrock, 2015a; Harper, 2002; Hartshorn, 1986)

Vantagens	Desvantagens
Distribuição uniforme de cargas estáticas e dinâmicas;	Não permitem a inspeção visual da área ligada a não ser que sejam transparentes;
União de materiais de qualquer geometria e espessura;	Necessidade de tratamento prévio das superfícies;
União de materiais similares e dissimilares;	Podem necessitar de elevados tempos de cura, calor e pressão;
Excelente resistência à fadiga;	Limitações em condições extremas de serviço (p. ex.: temperatura);
Obtenção de superfícies e contornos suaves;	Controlo rigoroso das condições de processamento;
Elevada capacidade de amortecimento vibrações e absorção ao choque;	Fraca resistência à clivagem e arrancamento;
Confere a vedação das juntas;	Falta de normas de dimensionamento;
Redução do peso da estrutura;	Desmontagem difícil ou impossível;
Mais barato (usualmente) e rápido que outros processos.	Pode existir a necessidade do uso de ferramenta de alinhamento e posicionamento, tais como gabaritos.

2.1.2.1. Comparação com outros métodos de ligação

O método de união, para um dado conjunto de materiais deve, em primeiro lugar, ser selecionado tendo em consideração todos os outros métodos de ligação existentes e feita a devida comparação entre ambos. Os processos de ligação mais usuais são:

- Ligação por soldadura;
- Ligação por fixação mecânica (recorrendo a parafusos, porcas, rebites, entre outros);
- Ligação por aquecimento induzido ou gerado por fricção;
- Ligação por adesivos;
- Ligação híbrida (combinação de dois tipos de ligação).

A escolha do processo que mais se adequa a uma dada aplicação deve ser feita somente após serem considerados vários fatores como natureza dos substratos, requisitos de processamento, desempenho mecânico, custo total, entre outros. A Tabela 4 enumera as principais características comparativas entre os processos de ligação mais utilizados.

A tabela evidencia que as ligações adesivas subiram, no que à escolha de um método de união diz respeito, para um patamar de excelência na indústria. Este tipo de ligações devem ser (e efetivamente são) consideradas como uma solução prática, atrativa e viável relativamente aos métodos tradicionais de união.

Tabela 4 - Comparação das principais características dos processos de união mais utilizados, adaptado de (Ebnesajjad & Landrock, 2015a)

	Soldadura	Fixação mecânica	Ligações adesivas
Permanência	Juntas tipicamente permanentes	Juntas roscadas permitem desmontagem	Juntas permanentes
Distribuição de tensões	Cria pontos localizados de tensão na estrutura	Cria pontos de elevada tensão no local de fixação	Boa distribuição de tensões na área de colagem (exceto quando submetidos ao arrancamento e clivagem)
Aparência	Aceitável	Cria descontinuidades na superfície	Sem qualquer marca na superfície. Junta praticamente invisível
Materiais a serem ligados	Geralmente limitados a materiais similares	Aplicável à maioria das formas e materiais a serem ligados	Ideal para materiais dissimilares
Resistência à temperatura	Elevada resistência a altas temperaturas	Boa resistência a altas temperaturas	Fraca resistência a altas temperaturas
Resistência mecânica	Necessita de tratamentos para obter boa resistência à fadiga	Pouco resistentes à fadiga. Desaperto das ligações muito comum	Excelente resistência à fadiga e à corrosão. Baixa resistência à fluência
Preparação de junta	Pouca ou nenhuma para chapas finas. Preparação de bordos em chapas mais espessas	Preparação dos furos e roscagem em certos casos	Limpeza prévia ou tratamentos complexos
Pós-processamento	Tratamentos térmicos muitas vezes necessários	Usualmente não necessita. Por vezes é necessário reaperto (em serviço)	Geralmente não é necessário
Equipamentos necessários	Relativamente dispendiosos, em certos casos volumosos e de elevado consumo energético	Relativamente barato e portátil	Apenas certos dispensadores são caros. Geralmente são equipamentos simples e baratos
Consumíveis	Fios, elétrodos, entre outros. Geralmente baratos	Bastante dispendiosos	Certos adesivos (estruturais) são dispendiosos
Taxa de produção	Pode ser rápido	Preparação de junta e apertos manuais lentos. Automatização mais rápida	Dependendo do tipo de adesivos podem ser segundos ou horas
Garantia de qualidade	Os ensaios não destrutivos são aplicáveis à maioria dos processos	Confiança razoável atendendo ao controlo do torque de aperto	A aplicação dos ensaios não destrutivos é limitada

2.1.2.2. Etapas de um processo de ligação

O fabrico de uma junta adesiva deve atender a um conjunto de etapas essenciais para assim evitar eventuais defeitos ou problemas que possam desenvolver-se posteriormente. Na verdade, a falha de uma junta adesiva deve-se, não só a uma má escolha de material ou tipo de junta mas, principalmente, a uma produção defeituosa da mesma (Harper, 2002). Assim, o fabrico de uma junta deve seguir as seguintes etapas (Klingen, 2022; Silva et al., 2007):

1. Planeamento – seleção do adesivo e do projeto da junta;
2. Preparação do adesivo;
3. Preparação da superfície (dos substratos);
4. Fabrico da junta – aplicação e cura do adesivo;
5. Controlo do processo – inspeções destrutivas e não destrutivas.

Na fase de planeamento devem ser considerados todos os requisitos que a junta deverá cumprir atendendo ao seu tipo de aplicação. Assim, é necessário conhecer quais os esforços, temperaturas de serviço e meios envolventes a que a junta, e conseqüentemente o adesivo, irão estar sujeitos e em contacto (Silva et al., 2007).

A correta adesão do adesivo aos substratos depende da preparação prévia da superfície. A remoção de contaminações ou camadas fracas altera a topografia da superfície e auxilia na ligação do adesivo ao material. De facto a preparação da superfície tem uma influência superior, no que à integridade e durabilidade da junta diz respeito, que uma junta sem qualquer preparação (Hutchinson, 2008).

Os tratamentos da superfície dividem-se em duas categorias: processos passivos e ativos. Os primeiros não alteram a natureza química da superfície e podem ser químicos (solventes ou detergentes) ou mecânicos (abrasão ou granalhagem) ou até mesmo uma combinação entre ambos, por exemplo: limpeza por ultrassons. Os processos ativos alteram a natureza química e física da superfície e em certos casos promovem o aumento da rugosidade na mesma. Estes processos subdividem-se em ativos químicos (ataques com banhos ácidos) e ativos físicos (descarga de corona, tratamento por chama ou plasma, entre outros) (Marques et al., 2021; Silva et al., 2007).

O fabrico da junta consiste na mistura do adesivo, quando se trata de um de dois componentes, e respetiva aplicação na junta em questão recorrendo ao uso de seringas, espátulas e outro tipo de equipamentos (Marques et al., 2021).

Por fim, na etapa de controlo de processo, são realizados testes destrutivos e não destrutivos de forma a serem verificadas as propriedades do conjunto e a ausência de defeitos.

2.1.3. Adesivos estruturais

As ligações adesivas podem ser classificadas em dois tipos: estruturais e não estruturais. As ligações adesivas estruturais são aquelas em que os aderentes (materiais a serem ligados) estão sujeitos a tensões próximas do seu ponto de cedência e por esse motivo devem ser capazes de transmitir os esforços sem qualquer perda de integridade dentro dos limites projetados (Ebnesajjad & Landrock, 2015a). Além disso, um adesivo estrutural define-se como sendo um adesivo cuja resistência ao corte é superior a 6,9 MPa (Hartshorn, 1986). Contrariamente, os adesivos não estruturais não

suportam cargas substanciais, mantendo apenas materiais leves no mesmo lugar, sendo um exemplo disso a fita-cola.

Os adesivos, de uma forma geral, podem ser classificados segundo a sua natureza, composição química, função, modo de aplicação ou reação, custo, entre outros (Silva et al., 2007). No entanto, para a classificação de adesivos estruturais a sua distinção é muitas vezes realizada através da composição química, a saber: termoendurecíveis, termoplásticos, elastoméricos e híbridos (Ebnesajjad & Landrock, 2015b; Sancaktar, 2011). Mesmo assim ainda são distinguidas algumas famílias de resinas poliméricas que são utilizadas para formular adesivos estruturais (Petrie, 2006). Essas famílias estão destacadas, na Tabela 5, e descritas de seguida.

Tabela 5 - Principais famílias de adesivos estruturais

Adesivos estruturais				
Fenólicos	Acrílicos	Poliuretanos	Poliaromáticos	Epóxidos
Fenólicos-vinílicos	Anaeróbicos		Poliimidas	Epóxido-nylon
Fenólicos-nitrilo	Cianoacrilatos		Polibenzimidazol	Epóxido-fenólico
				Epóxido-nitrilo

Resinas fenólicas: resultam da condensação de fenol e formaldeído. Apresentam boas propriedades mecânicas, relativo baixo custo e uma boa resistência a fungos. São usadas maioritariamente para a união de madeira, porém quando modificados podem mesmo ser utilizados em discos abrasivos ou moldes para fundição devido à sua alta resistência ao calor e boa estabilidade dimensional (Harper, 2002; Petrie, 2006).

Resinas acrílicas: possuem como monómero principal o metilmetacrilato (MMA), contudo podem também conter ácido metacrílico que auxilia na adesão a metais pela formação de sais de carboxilato e melhora a resistência do adesivo ao calor (Comyn, 2021). São indicadas para ligar metais, compósitos e muitos polímeros sem a necessidade de um prévio tratamento superficial dos substratos. A sua expansão rápida deve-se, essencialmente às suas boas propriedades mecânicas como resistência ao corte, arrancamento e impacto e ao seu baixo ciclo de cura (Aronovich & Boinovich, 2021).

Resinas poliuretano: utilizadas, principalmente, na união de plásticos, que tipicamente são difíceis de ligar, a materiais dissimilares ou metais (Ebnesajjad & Landrock, 2015c). A sua elevada flexibilidade, resistência e durabilidade permite criar ligações resistentes a esforços de corte e arrancamento. Além disso oferecem uma boa tenacidade e mantêm as propriedades mecânicas a baixas temperaturas, mesmo criogénicas. No entanto, apresentam fraca resistência a altas temperaturas sendo a máxima recomendada 150°C (Sastri, 2022). Estes adesivos são utilizados em várias indústrias como mobiliária, automóvel e até mesmo do calçado para o fabrico de espumas (Golling et al., 2019).

Resinas poliaromáticas: contêm cadeias moleculares de elevada rigidez diminuindo assim a possibilidade da sua rotura devido aos gradientes térmicos libertados pela oscilação de ligações químicas. Apresentam uma elevada temperatura de transição vítrea e estabilidade térmica sendo comumente utilizados na indústria aeroespacial e eletrónica (Ebnesajjad & Landrock, 2015e; McGrail, 1996).

Resinas epóxicas: devido à grande variedade deste tipo de resinas e de endurecedores tornaram-se nos adesivos estruturais mais conhecidos e utilizados para a ligação ou reparação de materiais e estruturas pela comunidade industrial e científica (Carbas et al., 2013; Comyn, 2021). Os adesivos epóxicos endurecem numa vasta gama de temperaturas, que vão desde a temperatura ambiente até outras mais elevadas, aliando sempre o seu relativo baixo nível de contração à boa estabilidade dimensional. Além disso, exibem excelentes propriedades mecânicas como rigidez, resistência e tenacidade para além de não serem afetados pelo contacto com água, solventes ou óleos (Kim et al., 2011; Marques et al., 2021).

2.1.4. Tipos de esforços e modos de rotura em juntas adesivas

Os principais objetivos do projeto de uma junta, para uma respetiva área de colagem, são: obter a máxima resistência possível, minimizar a concentração de tensões e conferir grande durabilidade e fiabilidade (Troughton, 2009). A seleção do tipo de junta pode ser simples quando, por exemplo, são conhecidas as condições de funcionamento do componente. Contudo essa seleção é habitualmente influenciada por vários fatores como as instalações, o custo de produção e a aparência estética final (Ebnesajjad & Landrock, 2015a). A resistência de um dado adesivo é determinada, essencialmente, a partir das propriedades mecânicas dos aderentes e do adesivo, da tensão residual interna, do nível de contacto real na interface, do conhecimento das solicitações e meios ambientais envolventes e do tipo de junta (Hartshorn, 1986). Todos estes fatores irão influenciar o desempenho da junta. Para isso é importante compreender quais os tipos de esforços a que uma junta adesiva poderá estar sujeita, estes são:

- a) Compressão;
- b) Tração;
- c) Corte;
- d) Arrancamento;
- e) Clivagem.

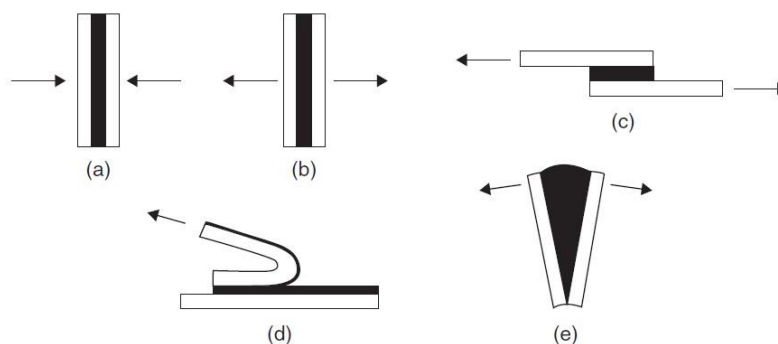


Figura 4 - Tipos de esforços presentes numa junta adesiva: (a) compressão; (b) tração; (c) corte; (d) arrancamento; (e) clivagem (Ebnesajjad & Landrock, 2015d)

Esforços de compressão

Estes tipos de forças tendem a comprimir um aderente contra o outro (Figura 4 (a)). Quando aplicados em pura compressão a distribuição de tensão pelo adesivo é constante e é menos provável que a falha ocorra (Ebnesajjad & Landrock, 2015d). A aplicação deste tipo de esforços é limitada na prática.

Esforços de tração

Os esforços de tração desenvolvem-se quando forças atuam perpendicularmente ao plano da junta (Figura 4 (b)) e são uniformemente distribuídos pela área de colagem. Apesar de as juntas adesivas apresentarem, de uma forma geral, um bom comportamento a este tipo de solicitações, o seu uso é, como nos esforços de compressão, limitado na prática. Caso estes esforços não sejam aplicados de forma correta podem ocorrer fenómenos de arrancamento ou clivagem (Harper, 2002).

Esforços de corte

Quando são aplicadas forças paralelas ao plano do adesivo geram-se esforços de corte que tendem a separar os aderentes (Figura 4 (c)), provocando o escorregamento entre ambos. As juntas devem ser projetadas e fabricadas de forma a admitirem, sobretudo, este tipo de solicitações em serviço, uma vez que toda a área de colagem contribui para a resistência da junta. As tensões presentes nas extremidades da junta são maiores do que as existentes na parte central da ligação (Figura 5). Esta desigualdade na distribuição de tensões deve-se à flexibilidade que os materiais plásticos apresentam, uma vez que tendem a fletir quando uma carga é aplicada (Troughton, 2009). Além disso os aderentes deformam-se longitudinalmente a uma taxa crescente desde uma extremidade até à extremidade oposta da sobreposição, assim, quanto maior o comprimento da sobreposição maior será o nível de tensões presentes nas extremidades (Silva et al., 2007). Por esse motivo a largura da sobreposição é mais importante do que o seu comprimento visto que a área onde os níveis de tensão são mais elevados aumenta, essa relação é demonstrada na Figura 6.

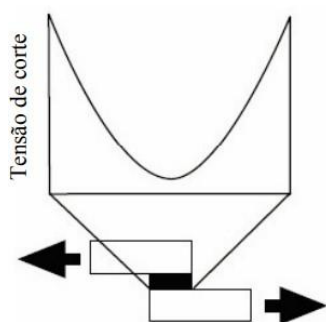


Figura 5 - Distribuição de tensão de corte (Pinto, 2007)

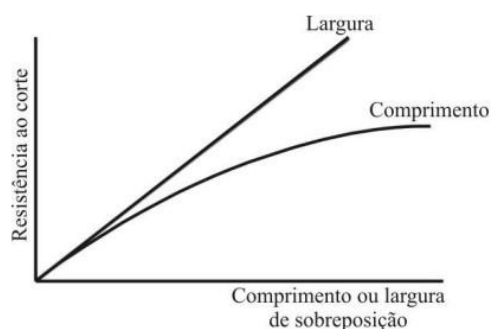


Figura 6 - Efeito do comprimento ou largura de sobreposição na resistência ao corte (Pinto, 2007)

Esforços de arrancamento

Os aderentes (um ou ambos) devem ser flexíveis. As forças são aplicadas na linha de junta, tal como é demonstrado na Figura 4 (d), o que faz com que haja uma concentração localizada de forças trativas e a menos que a junta seja larga ou a carga seja pequena irá ocorrer a falha da ligação (Akhavan-Safar et al., 2021; Ebnesajjad & Landrock, 2015d). Porém, existem vantagens associadas a este tipo de esforços já que é o único método em que falha ocorre de forma controlada e a força de arrancamento, ou de descolagem, é medida de forma direta.

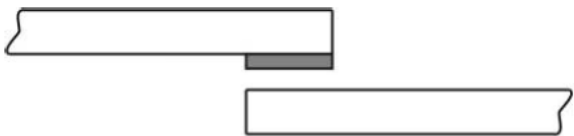
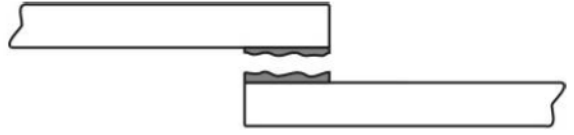
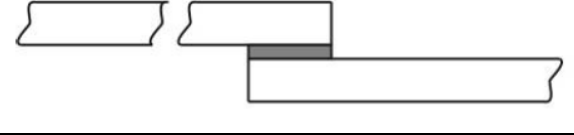
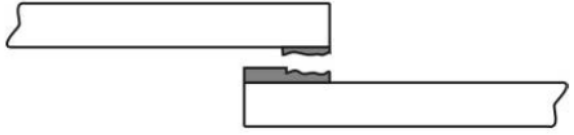
Esforços de clivagem

A clivagem, tal como no arrancamento, caracteriza-se pela aplicação de forças trativas na extremidade de uma junta de forma a separar os aderentes que, neste caso, são rígidos (Figura 4 (e)). As juntas adesivas devem ser projetadas de forma a evitar estes tipos de esforços (Akhavan-Safar et al., 2021).

2.1.4.1. Modos de rotura

As juntas adesivas estão, usualmente, sujeitas a vários tipos de cargas ou esforços que podem provocar a sua rotura. A classificação do modo de rotura é essencial para compreender e identificar as causas de falha de uma junta adesiva. Na verdade, a análise do modo de rotura é uma ferramenta útil para determinar se a falha ocorreu devido à qualidade ou geometria da junta, um tipo de carregamento indevido, uma inadequada preparação de superfície, entre outros. Os modos de rotura mais comuns são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Modos de rotura em juntas adesivas, adaptado de Pinto (2007)

Tipo de rotura	Esquemas representativos
Adesiva	
Coesiva	
Pelo aderente	
Mista	

Rotura adesiva: também apelidada de rotura interfacial, ocorre na interface entre o adesivo e um dos aderentes (ASTM D 5573, 1999). É possível constatar que, após a rotura, a superfície de um dos aderentes estará livre de quaisquer resíduos de adesivo ao passo que a outra se encontra coberta pelo mesmo (Ebnesajjad, 2014);

Rotura coesiva: ocorre quando ambas as superfícies aderentes se encontram cobertas pelo adesivo. Isto acontece quando a resistência interna do adesivo é mais fraca que aquela que mantém o adesivo e o substrato ligados;

Rotura pelo aderente: ocorre quando a rotura se dá no aderente. Isto significa que o adesivo foi bem escolhido, a superfície do substrato bem limpa e, portanto, a junta adesiva foi devidamente projetada;

Rotura mista: é a combinação da rotura adesiva e coesiva. É possível notar, nas superfícies dos aderentes, locais com e sem adesivo.

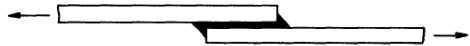
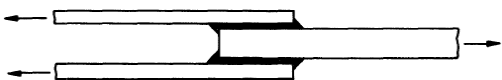



2.1.5. Tipos de juntas

No projeto de uma junta, para que estas possam posteriormente apresentar elevada resistência e eficácia, devem ser tidos em consideração os seguintes fatores (Chaffin et al., 2013; Ebnesajjad & Landrock, 2015d):

- A área de colagem deve ser o mais larga possível, dentro dos limites geométricos e requisitos técnicos permitidos;
- Toda a área de colagem, quanto possível, deve contribuir para a resistência da junta e para a uniforme distribuição de tensões;
- O adesivo deverá ser solicitado na direção de máxima resistência;
- Evitar o uso do adesivo em aplicações onde este estará sujeito a solicitações na direção de menor resistência, como por exemplo, submeter o adesivo a esforços de arrancamento ou clivagem.

Desta forma, e devido à rápida expansão e uso generalizado que os adesivos alcançaram nos últimos tempos, é importante existirem formas e técnicas de previsão que auxiliem o projeto de juntas adesivas (Ramalho et al., 2020). Por essas razões existem, atualmente, juntas adesivas com os mais diversos formatos. A Tabela 7 reúne os tipos de juntas mais comuns e as respetivas vantagens inerentes a cada uma.

Tabela 7 - Tipos de juntas mais comuns e as suas vantagens, adaptado de Adams and Wake (1984); Pinto (2007)

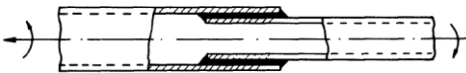
Tipo de Junta	Vantagens
Sobreposição simples 	Fabrico simples; Aplicável a aderentes finos; Adesivo essencialmente ao corte; Mais utilizada em aplicações industriais.
Sobreposição dupla 	Fabrico simples; Reduz os esforços de flexão.
Com chanfro exterior 	Reduz o efeito dos esforços de arrancamento.
Com chanfro interior 	Diminui o gradiente de esforços no adesivo; Mantém a junta centrada com a carga.
Em degrau 	Reduz o efeito dos esforços de arrancamento.

Cobre-junta

Maior resistência que as juntas de sobreposição simples.

Topo-a-topo

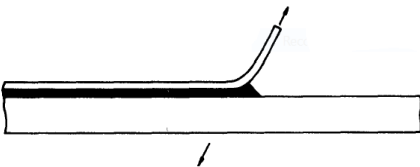
Fabrico simples;

Tubular

Apresentam maior resistência a esforços de arrancamento e clivagem;

Área de colagem maior;

Útil na ligação de tubos.

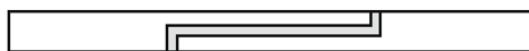
Arrancamento

Útil na ligação de materiais mais finos a outros com maior espessura;

O projeto de juntas adesivas tem por base os fatores anteriormente abordados e além disso baseia-se sempre na aplicabilidade que a junta irá ter. Apesar de os formatos de junta presentes na Tabela 7 serem os mais utilizados existe uma enorme variedade de configurações que visa aperfeiçoar e eliminar as eventuais restrições existentes. A Figura 7 demonstra duas modificações feitas a juntas topo-a-topo de forma a melhorarem a capacidade em suportar forças de flexão e assim evitar esforços de clivagem que prejudicam a sua eficiência.



Junta macho-fêmea (*tongue and groove*)



Junta de topo dupla com sobreposição

Figura 7 - Juntas topo-a-topo modificadas, adaptado de Silva (2011)

2.1.6. Aplicações industriais

As ligações adesivas fazem, cada vez mais, parte do nosso dia-a-dia e têm vindo a mostrar-se essenciais para a indústria. Esta técnica de união de materiais possui um vasto leque de vantagens, conforme foi referido anteriormente, possibilitando assim, a substituição de técnicas tradicionais como o aparafusamento, rebiteagem ou soldadura (Alves et al., 2018). O uso de adesivos está presente em vários setores da indústria, tornando-se essencial e em certos casos imprescindível, como é o caso das indústrias aeronáutica, aeroespacial, construção civil e do calçado (Tran et al., 2022).

- Indústria aeronáutica e aeroespacial

Na indústria aeronáutica a rebiteagem continua a ser utilizada como processo de união de materiais, no entanto, existem certos obstáculos como a aerodinâmica, estanquicidade e concentrações de tensão que não são resolvidos por esse método (Marques et al., 2021). Uma alternativa segura a esse método é o uso de adesivos, aliás, a fixação das longarinas à fuselagem e o fabrico de aviões ultraleves deve-se à sua aplicação (Bishopp, 2011; Higgins, 2000). A Figura 8 comprova a utilização extensiva de juntas adesivas em partes estruturais de um Airbus A380.

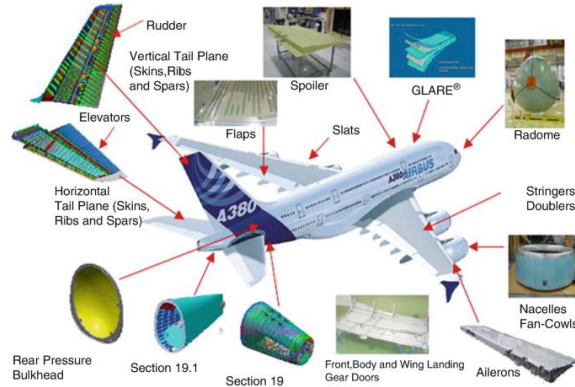


Figura 8 - Diferentes constituintes de um Airbus A380 ligados por adesivos (Tserpes, 2020)

De igual forma a indústria aeroespacial tira proveito do uso de adesivos de forma extensiva uma vez que, para escapar à atração provocada pela gravidade é necessária energia e já que esta é diretamente proporcional ao peso da estrutura, uma redução do peso iria diminuir a energia necessária para colocar as naves espaciais ou satélites em órbita (Désagulier et al., 2018). Além disso os adesivos são utilizados não só na montagem de estruturas como na colagem de painéis de proteção térmica (Figura 9).



Figura 9 - Painéis de proteção térmica colados a cápsula corporal para reentrada na atmosfera, adaptado de Désagulier et al. (2018)

- Indústria da construção civil

De forma talvez mais discreta as ligações adesivas na construção civil são fundamentais e temos exemplos disso em qualquer casa, prédio e até mesmo na via pública. A reparação de fendas em estruturas cimentadas é muitas vezes realizada recorrendo a cimentos ou resinas epóxicas que impedem o crescimento dessas fissuras e garantem uma boa adesão entre o material de base e o adesivo (Shaw, 1990). Outro exemplo muito comum é visível nos edifícios com fachadas em vidro. A diferente expansão térmica entre o vidro e o metal que o sustenta e as variadas solicitações ambientais a que está sujeito pode levar à rotura do mesmo, para tal são utilizados adesivos que permitem suportar essas oscilações e cargas (Marques et al., 2021; Silvestru et al., 2019).

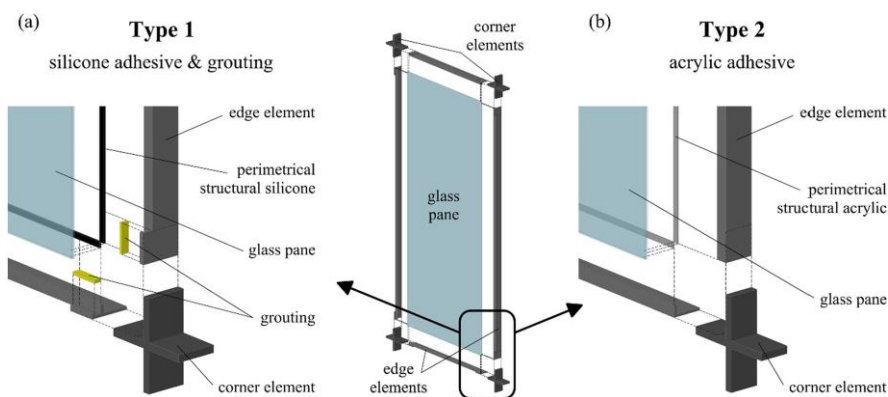


Figura 10 – Utilização de adesivos em pares vidro-metal: (a) silicone e (b) acrílico (Silvestru et al., 2019)

- Indústria do calçado

Desde o início do século XXI, e até mesmo atualmente, a indústria do calçado encontra-se em franca expansão e modernização. Os métodos e materiais artesanais foram substituídos por métodos mais modernos, maquinaria automática e por matérias-primas cada vez mais diversificadas como espumas e têxteis (Marques et al., 2021). A união da sola do sapato ou sapatilha ao forro tem vindo a ser substituída, ao invés da costura, por adesivos (Figura 11) ou então uma junção entre ambos. Para tal, os fabricantes de calçado, de forma a garantir uma boa aderência suportam-se em normas como a EN 1392:2006 e EN ISO 17708:2018 que estabelecem os requisitos e testes a realizar a uma sola ligada por adesivos (Paiva et al., 2016).



Figura 11 - Utilização de adesivo na colagem da sola de um sapato (Loctite, 2022)

2.2. Ensaio a adesivos estruturais

2.2.1. Ensaio para obtenção de propriedades físicas

As propriedades físicas representam um conjunto de características específicas dos adesivos, podendo condicionar a sua preparação e aplicação. Além disso possuem elevada importância sobre o seu comportamento (Silva et al., 2007). Portanto, analisar e caracterizar essas propriedades permite recolher informações essenciais para o correto controlo da qualidade e desempenho da junta adesiva em serviço (Dillard, 2011). Dos métodos mais utilizados para a determinação das propriedades físicas dos adesivos destacam-se os ensaios de densidade, ensaios de temperatura de transição vítrea, ensaios de molhabilidade e coeficiente de expansão térmica.

Densidade: a densidade pode ser medida de diferentes modos, por métodos diretos ou indiretos. Nos métodos diretos a densidade é obtida através da massa e volume real do material. Por sua vez, nos métodos indiretos, são utilizadas técnicas de deslocamento de volume e massa, tal como

demonstra o princípio de Arquimedes. A medição da densidade é algo simples mas de grande importância, devendo ser levada com uma elevada precisão, uma vez que mudanças na formulação, processamento, morfologia, degradação e envelhecimento físico, que normalmente são de grande interesse, geram pequenas alterações nesta propriedade (Dillard, 2011).

A picnometria é uma técnica que pode ser utilizada para a determinação da densidade de polímeros no estado líquido, ou sólidos, sendo que estes últimos devem ser dissolvidos antes do ensaio. Segundo a norma ASTM D1875-03, utilizada para a medição da densidade em polímeros líquidos, estes devem ser colocados num recipiente a uma temperatura inferior a 25°C e removido o excesso após a tampa ser pressionada até ao final do seu curso. De seguida a amostra deve ser aquecida até atingir os 25°C e o excesso, proveniente do aumento da temperatura e consequente expansão do polímero ou adesivo, de novo removido. A amostra é finalmente pesada, permitindo assim obter-se a densidade do polímero.

Existem ainda alguns fatores que afetam a densidade de polímeros e, portanto, de adesivos estruturais, entre eles, a rigidez relativa das moléculas, tamanho e flexibilidade das cadeias laterais, as quais se relacionam com as conformações da cadeia e a eficiência do empacotamento. A cristalinidade, as cargas de enchimento, a viscosidade, a temperatura e a pressão são fatores que devem ser tidos em consideração quando se pretende obter a densidade de um adesivo estrutural. Num polímero semicristalino, devido ao empacotamento efetivo, a densidade na região cristalina pode ser até 15% maior do que a verificada na região amorfa (Kholodovych & Welsh, 2007). Quanto às cargas de enchimento, algumas resinas são formuladas com a presença de cargas, geralmente materiais inorgânicos mais pesados, como sílica, carbonato de cálcio, alumínio ou mesmo a prata, o que por sua vez, influencia a densidade do adesivo. Além disso, a presença de vazios reduz a densidade aparente de um polímero, independentemente se adicionado intencionalmente ou introduzido involuntariamente. Assim, podem ser adicionados agentes espumantes na formulação de adesivos e com isso obterem-se propriedades úteis, como menor peso, rigidez, condutividade térmica, e coeficiente de expansão térmica. Assim, percebe-se a importância da determinação da densidade de um adesivo estrutural, visto que a mesma pode estar relacionada com outras propriedades físicas (Gibson & Ashby, 1999).

Temperatura de transição vítrea (T_g): indica uma faixa de valores pela qual a fase amorfa de um polímero semicristalino adquiriu mobilidade, sendo dependente de vários fatores: massa molecular, ligações cruzadas, grupos polares e humidade. Dessa forma, existem alguns métodos para determinação da T_g , entre eles a calorimetria diferencial de varredura (DSC), análise mecânica dinâmica (DMA) e análise termodinâmica-mecânica (TDMA). No DSC podem obter-se medidas quantitativas e qualitativas a respeito do material a ser analisado, que envolvem processos endotérmicos ou exotérmicos. Com isso, é medida a diferença entre o fluxo de calor de uma amostra e de uma referência ao serem submetidos a um aquecimento ou arrefecimento. Assim, com esta técnica, observam-se os eventos térmicos que ocorrem com alterações físicas ou químicas, como transições de fase, reações de desidratação e óxido-redução, ou seja, eventos que causam uma diferença de temperatura entre a amostra e a referência (Ionashiro, 2004).

Existem dois equipamentos de DSC que podem ser utilizados para a determinação da T_g : DSC de compensação de potência e DSC de fluxo de calor. No caso do DSC de compensação de potência, a amostra e a referência devem ser mantidas de forma isotérmica, sendo que a cada variação de temperatura verificada entre as duas, ocorre uma alteração no aquecimento, de forma que essa

variação seja anulada. Isso é conseguido devido ao uso de aquecedores individuais, ou seja, a amostra e a referência são dispostas em fornos separados. No DSC de fluxo de calor, a amostra e a referência são colocadas em cadinhos, e o fluxo de calor diferencial é controlado para elevar a temperatura de ambas, ou seja, a diferença gerada na temperatura da amostra e da referência é proporcional ao fluxo de calor (Bernal et al., 2002). A Figura 12 ilustra a diferença entre esses equipamentos.

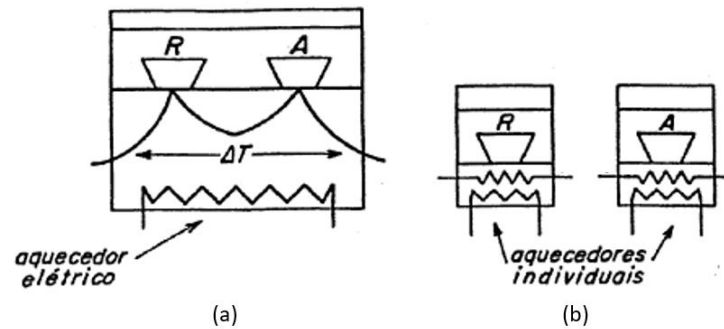


Figura 12 - Equipamentos de DSC: (a) DSC de fluxo de calor e (b) DSC de compensação de potência, adaptado de Bernal et al. (2002)

Por sua vez, na técnica de DMA, também conhecida por TDMA verifica-se o quanto o material é deformado como resposta à tensão que lhe foi aplicada (Fried, 2014). Assim, analisam-se as propriedades de materiais como adesivos estruturais, com base na temperatura, tempo e frequência de uma deformação, ou ainda com a combinação dos parâmetros. Dessa maneira, os dados obtidos através desta técnica são utilizados para verificar tanto o comportamento mecânico do adesivo estrutural como a sua morfologia e comportamento viscoelástico (Lorandi et al., 2016).

A técnica consiste na aplicação de uma tensão oscilante senoidal na amostra, gerando-se, por conseguinte, uma série de curvas tensão-deformação numa determinada frequência e num período específico. Com base na deformação e amplitude resultantes são calculados os módulos elástico e viscoso do material, e consequentemente as suas propriedades físicas (Sakaguchi et al., 2002). Neste contexto, enquadra-se a temperatura de transição vítrea. A obtenção da T_g de um material viscoelástico por DMA é muito utilizada, pois os dados obtidos são fiáveis e o equipamento possui alta sensibilidade, embora seja necessária uma maior quantidade de material a ser analisado do que na técnica DSC. A Figura 13 ilustra uma curva típica obtida pela técnica de DMA, onde é indicada a faixa onde ocorre a transição vítrea.

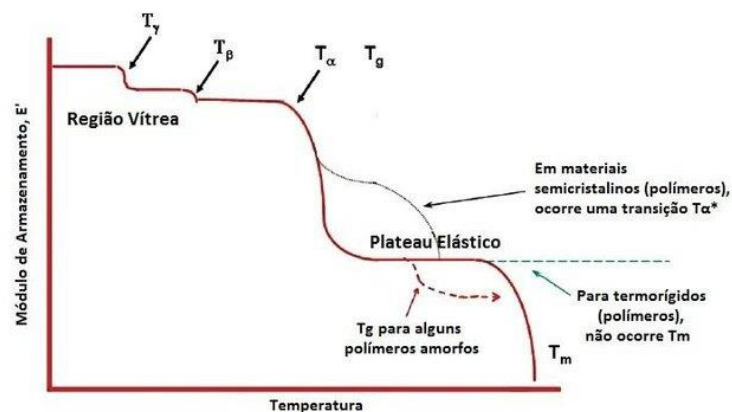


Figura 13 - Curva típica obtida para a técnica de DMA que enfatiza a T_g (Lorandi et al., 2016)

Molhabilidade: o ensaio de molhabilidade determina o grau de difusão de um adesivo sobre uma superfície sólida (substrato), criando assim o contacto entre ambos. Uma boa molhabilidade é um requisito básico para um adesivo ser considerado de alto nível. Além disso, o ângulo de contacto está relacionado com a molhabilidade, sendo que quanto menor o seu valor melhor é tendência do líquido em molhar o sólido. A sua determinação é um método importante e sensível no que diz respeito à obtenção das energias superficiais de materiais sólidos, uma vez que um adesivo só irá molhar o aderente caso a sua energia superficial seja menor que a desse aderente (Borsellino et al., 2009). A Equação (1), intitulada por Equação de Young, representa essa correlação.

$$\gamma_{lv} \cos \theta = \gamma_{sv} - \gamma_{sl} \quad (1)$$

Em que θ é o ângulo de contacto, γ_{lv} é a energia superficial líquido-vapor, γ_{sv} é a energia superficial sólido-vapor e γ_{sl} é a energia superficial sólido-líquido.

Coefficiente de expansão térmica: o coeficiente de expansão térmica indica a variação de volume de um dado material em função da temperatura. Neste caso, é conhecido como coeficiente médio de expansão térmica linear, $\bar{\alpha}$, e é definido como a inclinação de uma secante por meio de dois pontos da curva de expansão térmica. Este valor pode ser determinado através da análise termomecânica (TMA) ou pela dilatométrie (Silva et al., 2007). Por outro lado, o coeficiente físico de expansão térmica, α , é definido como a inclinação da curva de expansão numa temperatura específica (Netzsch, 2023).

2.2.2. Ensaio mecânicos

Os ensaios mecânicos são utilizados com o propósito de determinar as propriedades mecânicas dos adesivos. Geralmente são utilizados os ensaios de tração com provetes *bulk* e ensaios de corte com provetes *Thick-Adherend Shear Test* (TAST).

2.2.2.1. Ensaio de tração

O ensaio de tração é um dos ensaios mais utilizados no que diz respeito à determinação de propriedades mecânicas. No caso de adesivos estruturais, este pode ser realizado de duas formas: com provetes maciços (*bulk*) e com juntas de topo a topo (*butt-joint*) (da Silva et al., 2012).

Ensaio de tração em provetes maciços: neste ensaio aplica-se uma força longitudinal ao provete até que ocorra a sua rotura, registando-se uma curva tensão-deformação. As propriedades determinadas são intrínsecas do material como por exemplo, tensão de rotura, tensão de cedência, módulo de elasticidade, coeficiente de *Poisson* e ductilidade. A vantagem deste tipo de ensaio é que pode ser realizado em qualquer máquina universal de ensaios, no entanto, a transição elasto-plástica pode nem sempre ser perceptível. Para o fabrico dos provetes deve utilizar-se a norma a EN ISO 527-2 (2012). Segundo esta norma, a geometria com o provete mais longo deve ser utilizada para adesivos com maior rigidez pois a deformação resultante do ensaio será menor. A Figura 14 ilustra a geometria dos provetes.

Ensaio de tração em juntas topo a topo: do mesmo modo que no ensaio com provetes maciços, também é aplicada uma força longitudinal até à rotura do provete, sendo depois traçada a curva tensão-deformação. Todavia, nesta situação o estado uniaxial de tensão uniforme não é observado sendo necessária uma elevada precisão no fabrico dos provetes, pois caso exista algum

desalinhamento podem gerar-se esforços de flexão e surgirem, assim, resultados incorretos ou imprecisos. Contudo é um ensaio económico e pode ser realizado em qualquer máquina universal de ensaios possibilitando ainda a reutilização dos substratos.

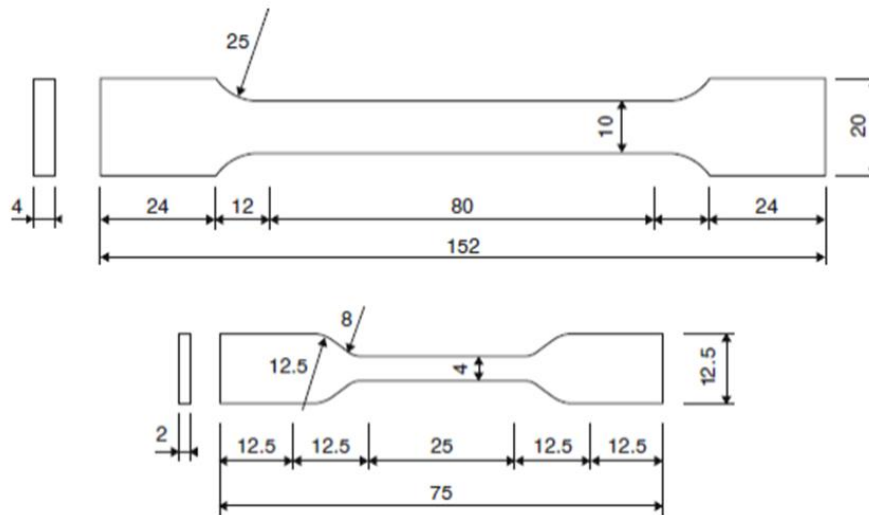


Figura 14 - Provetes maciços para ensaio de tração de acordo com a norma EN ISO 527-2 (da Silva et al., 2012)

2.2.2.2. Ensaio de corte

Os esforços de corte são das principais solicitações presentes numa junta adesiva em serviço. Assim como nos ensaios de tração, nestes ensaios também é possível gerar uma curva tensão-deformação, a qual permite determinar a tensão de corte máxima, a deformação de corte máxima e o módulo de corte. A determinação das propriedades de corte é feita recorrendo aos seguintes ensaios:

- Ensaio em Junta de Sobreposição Simples (JSS);
- Ensaio *Iosipescu* ou *V-Notched beam*;
- Ensaio de borboleta ou *Notched plate shear method (Arcan)*;
- Ensaio de junta topo a topo em torção ou *Napkin-ring test*;
- Ensaio TAST.

Ensaio em JSS: este é o método mais comum para caracterizar uma junta adesiva, visto que pode ser realizado em máquinas universais de ensaio, é económico, e os provetes são de fácil fabrico. Este ensaio deve ser efetuado segundo as normas ASTM D 1002 e ISO 4587. A Figura 15 ilustra a geometria do provete segundo a norma ASTM D 1002 (2019).

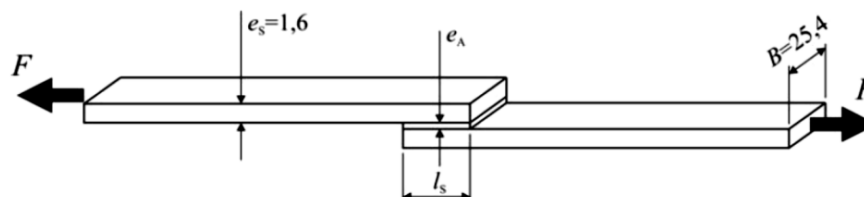


Figura 15 -Geometria de provete JSS segundo a norma ASTM D 1002 (Morais, 2013)

Ensaio *Iosipescu* ou *V-Notched beam*: neste método utilizam-se provetes retangulares, com dois entalhes em V no centro e a carga é solicitada em quatro pontos distintos do provete. Isso faz com que os momentos fletores gerados dos dois lados do provete se anulem, gerando, conseqüentemente, uma área de corte linear. Nesta região devem-se fixar extensômetros a 45° e a -45° em relação ao eixo do provete e com isso medir-se a deformação resultante. A norma utilizada neste ensaio é a ASTM D5379, geralmente aplicada para a caracterização em materiais compósitos. A Figura 16 ilustra os provetes maciços ou em juntas adesivas e o *layout* do ensaio.

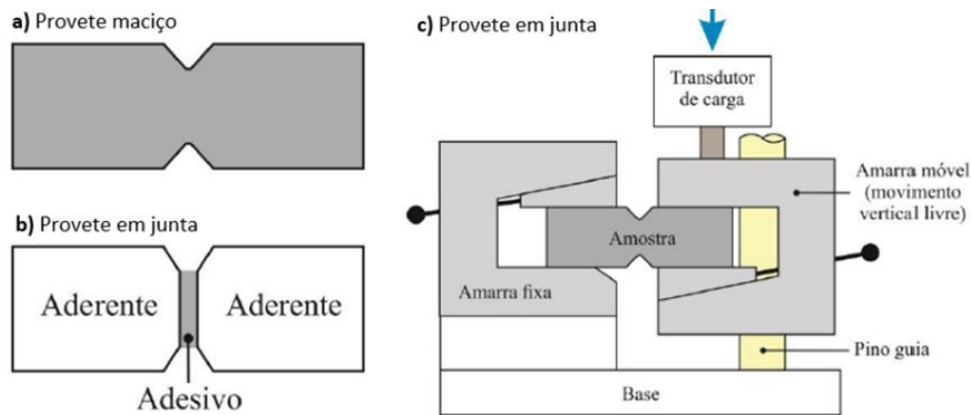


Figura 16 - Ensaio *Iosipescu* em: (a) provete maciço; (b) provete com junta adesiva e (c) *layout* do ensaio (Monteiro, 2020)

Ensaio *Arcan*: este ensaio pode ser realizado a todo o tipo de adesivos. Neste método utilizam-se provetes maciços ou em juntas adesivas, com a geometria semelhante à de uma borboleta. O provete (Figura 17) possui dois entalhes simétricos, com ângulos de 90° e raio de concordância da ponta do entalhe de 1,5 mm. A sua fixação é feita em quatro pontos provocando assim uma concentração de tensões na geometria do raio de concordância. Ao contrário do método anterior, este ensaio é realizado para pequenas espessuras (Silva et al., 2007)

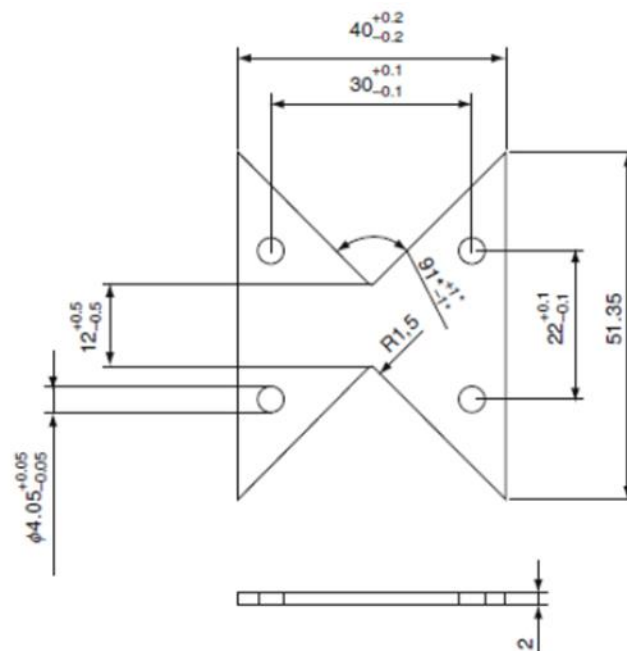


Figura 17 – Representação de provetes para ensaio *Arcan* (Silva, 2011)

Ensaio de junta topo a topo em torção ou *Napkin-ring test*: entre todos os métodos para caracterizar os esforços de corte, este é o mais preciso, principalmente quando se trata de baixas deformações. Neste método utilizam-se juntas topo a topo entre dois cilindros de paredes finas (Figura 18), o que origina uma redução da variação das tensões de corte, fazendo com que o ensaio seja mais uniforme para todo o adesivo, ou seja, resulta num estado de tensão de corte puro ao longo do adesivo (Broughton & Mera, 1997).

Embora seja um ensaio de elevada precisão possui alguns entraves, nomeadamente o facto de o fabrico dos provetes ser dispendioso, a sua execução e medição das deformações ser difícil e a elevada complexidade do equipamento de ensaio. Além disso, o alinhamento dos cilindros é crucial para que se obtenha um estado de tensão de corte puro (Silva et al., 2007).

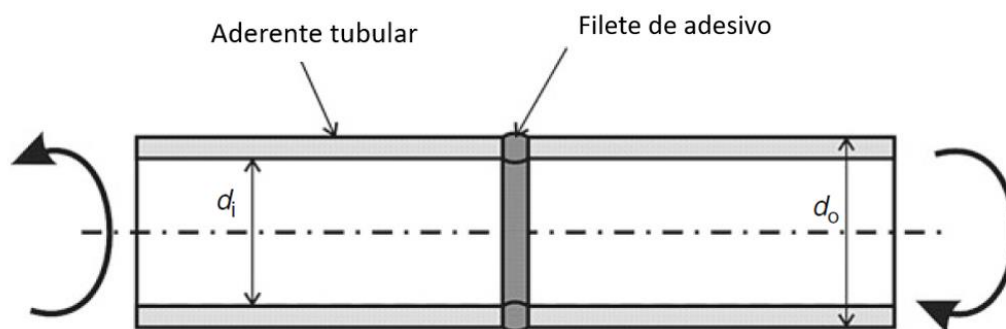


Figura 18 - Representação de provetes para ensaio de *Napkin-ring test*, adaptado de Silva (2011)

Ensaio *Thick-Adherend Shear Test (TAST)*: este é o ensaio mais utilizado devido à sua simplicidade e facilidade de fabrico dos provetes. Além disso, este ensaio é normalizado pelas normas ISO 11003-2:2019 e ASTM D3983. A Figura 19 ilustra os provetes de acordo com a ISO 11003-2:2019.

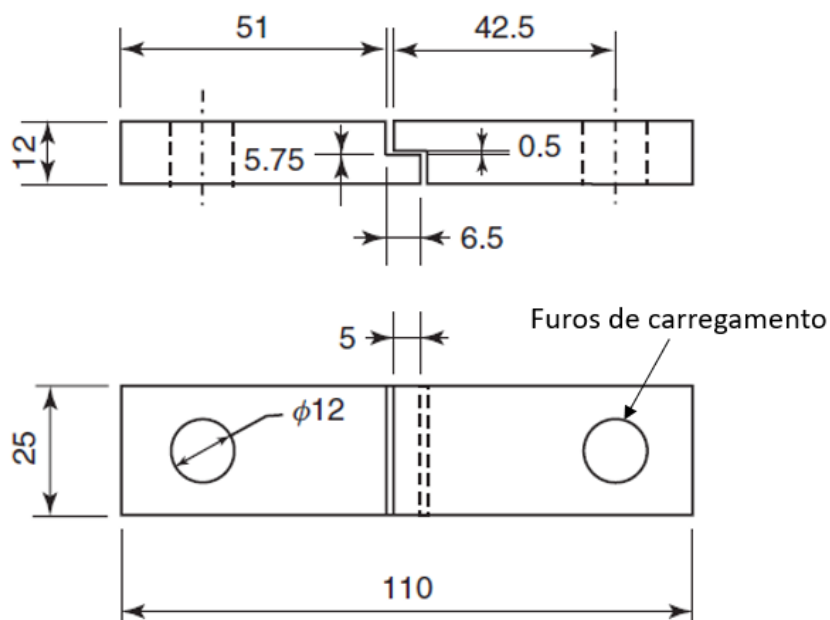


Figura 19 - Representação de provetes para ensaio TAST segundo a norma ISO 11003-2:2019, adaptado de (da Silva et al., 2012)

Através deste método é possível obter determinadas propriedades como a tensão de corte máxima, $\tau_{\text{máx}}$, e a deformação máxima de corte, $\gamma_{\text{máx}}$. Os substratos devem possuir uma elevada rigidez, sendo

preferencialmente utilizados substratos de aço carbono, o que faz com que seja possível gerar um estado de tensão de corte puro. A geometria do provete segundo as normas acima descritas deve ser cumprida uma vez que quanto menor o comprimento da ligação e maior a espessura dos substratos, menor será a probabilidade da ocorrência de arrancamento nas extremidades da junta adesiva (Silva et al., 2007).

2.2.3. Ensaios de fratura

O estudo das tensões envolvidas numa estrutura ou componente pode ser realizado através do método de *von Mises*, no entanto esse método não contempla os eventuais defeitos existentes num dado material como fissuras, delaminações ou outras imperfeições. A mecânica da fratura, embora seja uma temática recente, revela ser uma alternativa interessante para o estudo e avaliação de estruturas, sendo inclusive utilizada no projeto de juntas adesivas. Neste tipo de materiais os conceitos estabelecidos na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) são bem evidentes e determinam que se forma uma pequena região plástica localizada logo após a extremidade da fenda, mantendo-se a linearidade elástica nas restantes zonas mais afastadas do local onde ocorreu a fratura (Dillard, 2021).

A caracterização de juntas adesivas recorrendo a ensaios de mecânica da fratura torna-se essencial na determinação da energia necessária para que a extremidade da fenda se propague, ou seja, a taxa crítica de libertação de energia (G_c). Isto permite que numa primeira fase sejam utilizadas ferramentas e ensaios que visem aprimorar o projeto de junta, o seu desempenho e os custos associados. Os ensaios de mecânica da fratura mais utilizados em juntas adesivas dividem-se essencialmente em três modos: modo I, modo II e modo III (Figura 20). Além destes pode ainda ocorrer o modo misto que conjuga os dois primeiros ensaios (I+II) (Dillard, 2021). Uma vez que o uso do carregamento em modo III não é tão comum por se basear em esforços de corte fora do plano do adesivo não será explicitado neste capítulo.

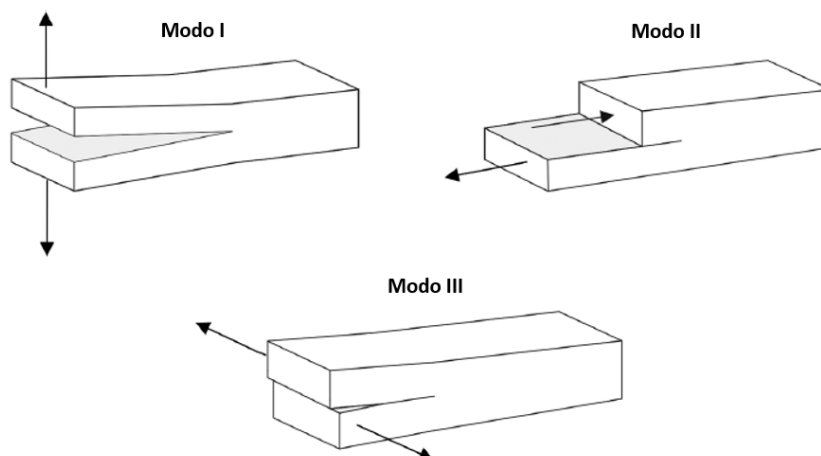


Figura 20 - Tipos de modos de fratura em juntas adesivas, adaptado de Chaves et al. (2014)

2.2.3.1. Fratura em modo I

O ensaio de fratura em modo I caracteriza-se pela aplicação de esforços trativos, ou seja, de abertura da fenda na junta adesiva, o que permite obter a taxa crítica de libertação de energia em

modo I (G_{Ic}). Para tal recorrem-se aos ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) e *Tapered Double-Cantilever Beam* (TDCB) uma vez que apresentam uma geometria simples e de fácil fabrico.

O teste DCB terá sido primeiramente descrito na norma ASTM D3433-99 e posteriormente atualizado e aperfeiçoado segundo a norma ISO 25217:2009 (Blackman, 2011). Este é composto por dois substratos ligados entre si por meio de uma fina camada de adesivo. Segundo a norma ASTM e de modo a formar uma pré-fenda, na fase de fabrico a colagem dos substratos deve compreender uma região isenta de adesivo, conforme demonstra a Figura 21, de comprimento a_0 (ASTM D 3433, 1999).



Figura 21 - Representação de um provete DCB segundo a norma ASTM D3433-99, adaptado de da Silva et al. (2012)

A norma ISO difere na colagem dos substratos, permitindo assim que a camada de adesivo se espalhe por toda a sua extensão. No entanto, conforme refere da Silva et al. (2012) e de modo a formar a pré-fenda, deve ser colocado um filme devidamente centrado com os substratos, usualmente de um material polimérico, com uma espessura entre 12 e 14 μm . Para que o teste à junta seja mais eficaz são realizados furos nos substratos ou em blocos de carga ligados aos mesmos, tal como demonstra a Figura 22 (Blackman, 2011).

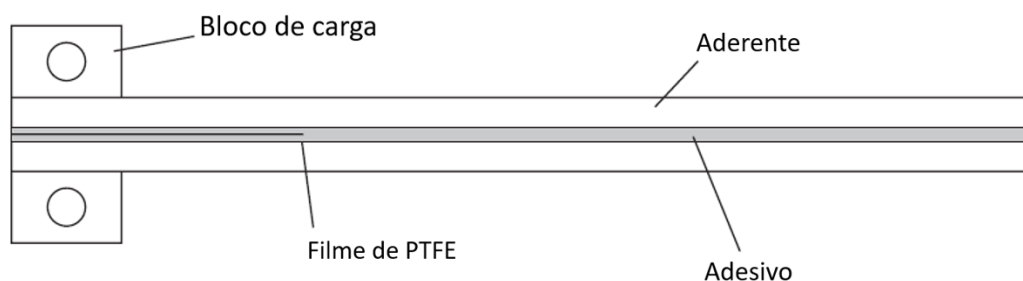


Figura 22 - Representação de um provete DCB com blocos de carga, adaptado de Blackman (2011)

Após o fabrico e devida cura da junta adesiva os provetes são submetidos a esforços de tração nos aderentes por meio de uma máquina com um sistema de fixação auto-alinhante, de forma a garantir o correto posicionamento da junta. Segundo a norma, a velocidade de ensaio deverá ser constante logo após o início de propagação da pré-fenda, ou seja, aproximadamente um minuto. As velocidades adotadas neste ensaio devem estar compreendidas entre 0,5 e 3,0 mm/min (Silva et al., 2007). Este ensaio permite recolher dados como o comprimento da fenda, definido por a , e as tensões envolvidas no começo e término da expansão da fenda (da Silva et al., 2012).

Além deste o ensaio TDCB permite, também, obter o G_{Ic} e assim caracterizar a junta adesiva. Uma vez que a norma ASTM D3433-99 também se aplica a este método, a maior diferença entre ambos deve-se aos substratos, que pelas suas características geométricas são de difícil fabrico (Figura 23), no entanto permite obter a taxa crítica, G_{Ic} independentemente do comprimento da fenda, a .

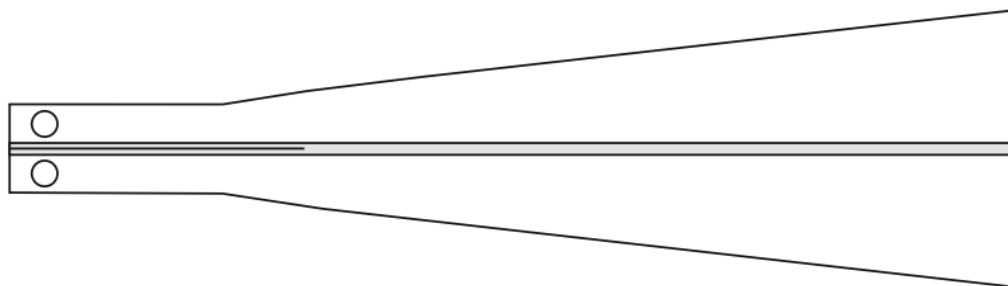


Figura 23 - Representação de um provete TDCB (Blackman, 2011)

2.2.3.2. Fratura em modo II

A fratura em modo II consiste na aplicação de cargas capazes de submeter a junta adesiva a esforços de corte. Embora vários investigadores tenham realizado diferentes experiências, de modo a obter dados concretos da fratura em modo II nenhum desses resultados foi suficientemente satisfatório (Blackman, 2011). Devido à sua complexidade é um ensaio de caracterização da fratura ainda não normalizado apesar de existirem ensaios como o *End-Notched Flexure* (ENF), o *End-Loaded Split* (ELS) e o *Four-Point End-Notched Flexure* (4-ENF) que se encontram em processos de normalização para a sua determinação em materiais compósitos. Chaves et al. (2014) refere ainda que estes ensaios podem ser adaptados de forma a compreender a fratura das juntas adesivas, tal como demonstra a Figura 24.

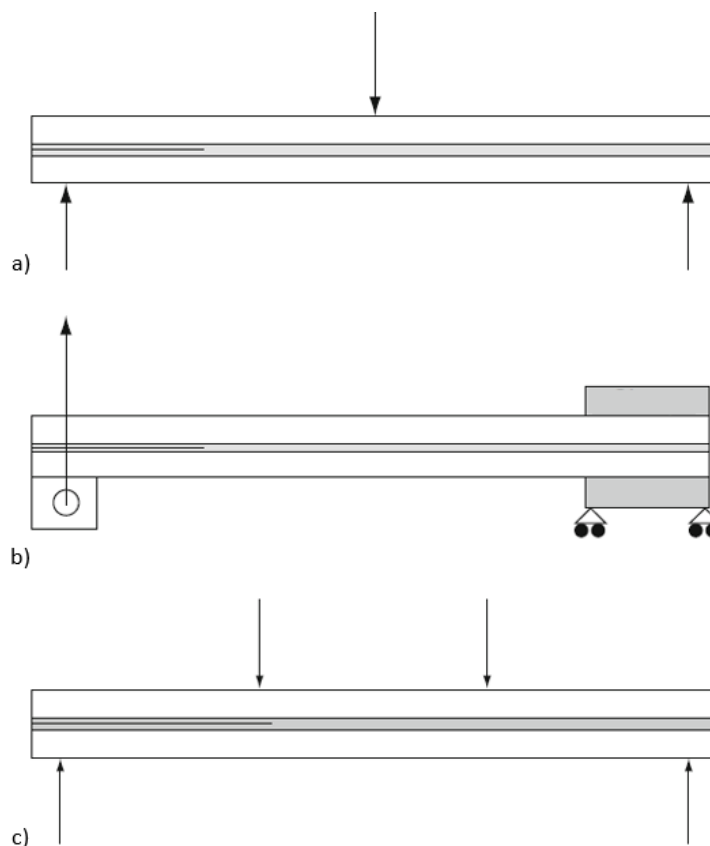


Figura 24 – Representação esquemática dos ensaios em modo II: a) ENF; b) ELS e c) 4-ENF, adaptado de Blackman (2011)

Os provetes fabricados para estes testes são de geometria simples e assim como acontece nos ensaios em modo I, de maneira que se forme uma pré-fenda deve existir uma área nos provetes isenta de adesivo ou então pode ser colocado um filme não adesivo, devidamente centrado, na colagem dos substratos. O ensaio mais utilizado para a determinação da taxa crítica de libertação de energia em modo II (G_{IIc}) é o ENF e baseia-se na aplicação de uma solitação centrada num provete simplesmente apoiado, tal como demonstrado na Figura 24 a). Contudo, este ensaio provoca uma propagação instável da fenda levando a que apenas seja possível obter o valor inicial de G_{IIc} (Blackman, 2011; da Silva et al., 2012).

Embora a propagação da fenda seja mais estável no ensaio ELS, este apresenta grandes deslocamentos e requer uma maior precisão no seu aperto, demonstrando uma grande sensibilidade nesse aspeto (da Silva et al., 2010). Este sistema, evidenciado pela Figura 24 b), consiste na fixação de uma das extremidades do provete numa plataforma suportada por rolamentos capazes de se movimentar horizontalmente, eliminando assim, as forças que iriam surgir assim que, na extremidade livre, fosse aplicada uma carga. Durante a realização do ensaio é possível obter o deslocamento do provete e o comprimento da fenda (da Silva et al., 2012).

O ensaio 4-ENF introduz um maior grau de complexidade na obtenção dos resultados (Figura 24 c)), uma vez que são necessários equipamentos mais sofisticados, no entanto e tal como Martin and Davidson (1999) observaram, obtém-se uma fratura mais estável. Constataram ainda que as forças necessárias eram superiores às utilizadas no método ENF e como tal ocorria a fricção entre as superfícies internas da fenda, o que provocava um aumento das forças de atrito entre ambas e consequentemente um aumento aparente de G_{IIc} .

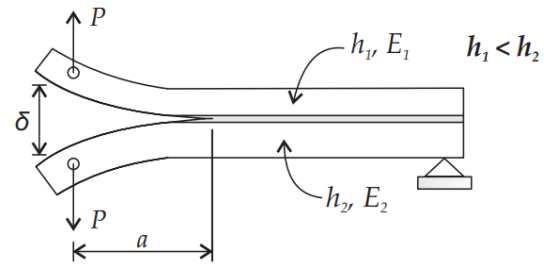
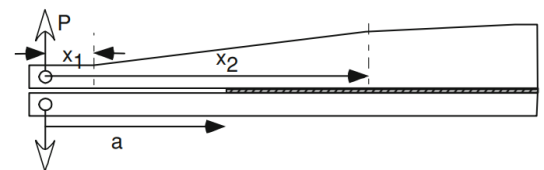
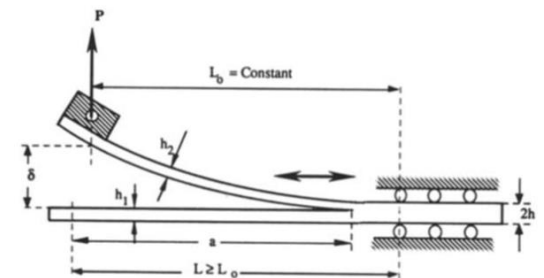
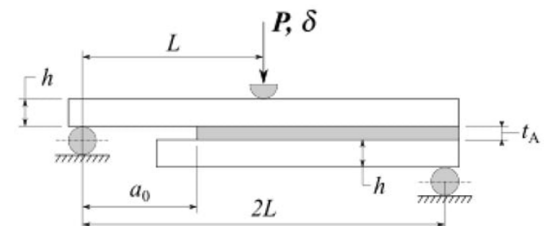
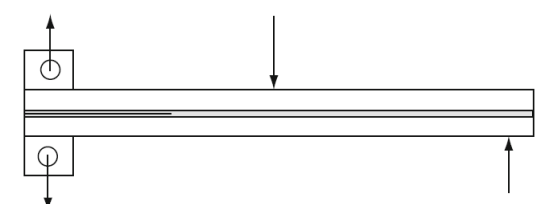
2.2.3.3. Fratura em modo misto (I+II)

Os ensaios de fratura em modo misto tornaram-se particularmente relevantes no seio das juntas adesivas, sendo pertinente saber qual o resultado a esperar das mais diversas solitações uma vez que uma junta adesiva, em serviço, estará submetida mais frequentemente a condições em modo misto. A resistência à fratura em modo misto baseia-se nas quantidades relativas de esforços de abertura da fenda (modo I) e de esforços de corte (modo II) e são usualmente expressos em ângulo de fase, ψ (da Silva et al., 2012).

Os provetes utilizados para a determinação da taxa crítica de libertação de energia são idênticos aos do modo I e modo II diferindo apenas na aplicação dos esforços. É ainda importante referir que nos ensaios à fratura em modo misto I+II, tal como acontece nos ensaios em modo II a propagação da fenda é instável podendo não se verificar pelo meio do adesivo mas sim mais próxima aos substratos (Blackman, 2011).

Xiao et al. (1993) e Park and Dillard (2007) foram pioneiros no desenvolvimento de ensaios em modo misto I+II tendo adaptado os modelos DCB e TDCB (modo I) originando assim os ensaios *Asymmetric Double-Cantilever Beam* (ADCB) e *Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam* (ATDCB). Além destes foram ainda gerados ensaios como o *Fixed-Ratio Mixed-Mode* (FRMM), o *Single-Leg Bending* (SLB) e o *Mixed-Mode Bending* (MMB) que permitem estudar e avaliar o comportamento das juntas submetidas a diferentes tipos de solitações (Aliha et al., 2021). A Tabela 8 ilustra e resume os ensaios em modo misto I+II.

Tabela 8 - Tipos de ensaios em modo misto I+II

Tipo de ensaio	Descrição
<p data-bbox="229 282 738 315">Asymmetric Double-Cantilever Beam (ADCB)</p>  <p data-bbox="229 600 411 633">(Esteves, 2010)</p>	<p data-bbox="866 282 1396 640">Este tipo de ensaio é testado com os mesmos parâmetros do ensaio DCB, no entanto utilizam-se diferentes espessuras de substratos ou diferentes materiais. A assimetria do provete garante o modo misto. De modo a garantir que toda a energia libertada durante a fratura resulta da flexão dos substratos dos provetes Xiao et al. (1993) sugere que o ensaio seja realizado com substratos elásticos (Chaves et al., 2014).</p>
<p data-bbox="229 651 847 685">Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam (ATDCB)</p>  <p data-bbox="229 875 480 909">(Park & Dillard, 2007)</p>	<p data-bbox="866 651 1396 981">O ensaio ATDCB caracteriza-se, essencialmente, pela diferente geometria dos seus substratos, sendo um de secção constante e o outro com secção em cunha. Este tipo de geometria proposto por Park and Dillard (2007) permite a obtenção do modo misto uma vez que. Devido à diferente rigidez dos aderentes obtêm-se os esforços de corte de modo II induzindo assim o modo misto (Nunes & Campilho, 2018).</p>
<p data-bbox="229 992 616 1025">Fixed-Ratio Mixed-Mode (FRMM)</p>  <p data-bbox="229 1323 472 1357">(Kinloch et al., 1993)</p>	<p data-bbox="866 992 1396 1368">O ensaio FRMM é similar ao ensaio ELS, porém a carga só é aplicada num dos substratos, usualmente o superior enquanto o substrato inferior se deforma livremente. Por se tratar de um ensaio tão semelhante, todos os laboratórios que testam a junta adesiva pelo método ELS também podem também testar a junta através deste ensaio (da Silva et al., 2012).</p>
<p data-bbox="229 1379 512 1413">Single-Leg Bending (SLB)</p>  <p data-bbox="229 1664 456 1697">(Neves et al., 2022)</p>	<p data-bbox="866 1379 1396 1709">Aplicação de um carregamento de flexão em três pontos, sendo a carga P aplicada a meio vão. Uma vez que a maioria dos laboratórios dispõe dispositivos de flexão em três pontos, torna-se mais simples testar a junta adesiva através deste método. Para evitar fricção, o que provocaria incertezas nos resultados, é recomendada a utilização de rolos ao invés de suportes fixos (Fernández et al., 2013).</p>
<p data-bbox="229 1720 568 1753">Mixed-Mode Bending (MMB)</p>  <p data-bbox="229 1977 435 2011">(Blackman, 2011)</p>	<p data-bbox="866 1720 1396 2024">Este é o único ensaio em modo misto normalizado (ASTM D6671/ASTM D6671M-22). Apesar da sua complexidade, é bastante utilizado na determinação de G_c, uma vez que permite a variação da razão de modo misto, através da alteração do posicionamento da carga P, sem qualquer limitação (da Silva et al., 2012; Soares et al., 2022).</p>

2.2.3.4. Estado da arte dos ensaios mais comuns

A Tabela 9 sumariza alguns trabalhos referentes aos ensaios à fratura descritos nas secções anteriores.

Tabela 9 - Resumo dos ensaios à fratura mais utilizados

Autores	Descrição do trabalho
(Fernández et al., 2013)	Neste trabalho foi feita a caracterização da fratura de juntas coladas de compósitos através do método SLB, em modo misto I + II com uma mistura de modo fixo. Foram utilizados provetes de epóxi reforçado com fibra de carbono colados com um adesivo dúctil de epóxi. Além disso foram utilizados dois níveis de carga, sendo que o menor nível de carga resultou em resultados mais satisfatórios e consistentes, ou seja, o crescimento da fenda foi mais estável a 50% da carga estática. Com 70% da carga, a propagação da fenda foi instável, o que não permitiu que fosse aplicada a lei de Paris. Os autores verificaram ainda uma baixa dispersão dos resultados em relação ao parâmetro da lei de Paris, sendo que este parâmetro é semelhante para o modo II e inferior ao modo I, podendo assim ser possível concluir que a presença de um modo II é benéfica e traz vantagens na vida útil das juntas adesivas.
(Loureiro et al., 2020)	No trabalho em questão, os autores utilizaram provetes de Araldite® 2015 para analisar a fratura em modo misto, utilizando o método SLB. O método da integral J foi aplicado para estimar a taxa de libertação de energia de fratura por tração (J_I) e por corte (J_{II}), o que mostrou resultados consistentes e confirmou a natureza dúctil do adesivo analisado. Com isso, os autores selecionaram o critério de falha da lei de potência que era mais adequado a este adesivo. Também foram obtidas as leis do modelo de zona coesiva de tração e corte (CZM) através do método direto. Os autores concluíram que o adesivo Araldite® 2015 pode ser traduzido por um critério de falha de lei de potência em modo misto com $\alpha=1/2$.
(Chen et al., 1999)	Os autores modificaram, neste trabalho, o equipamento do sistema do método MMB, com o objetivo de reduzir a influência do peso da alavanca na tenacidade à fratura em modo misto. Para isso, utilizaram um laminado de compósito de poliamida 12 reforçado com fibra de vidro e mediram a razão G_I/G_{II} de 3/1 e 1/1. Ao fazer a comparação dos resultados com o equipamento original, verificou-se que o equipamento modificado pode evitar a influência de pré-carga causada pelo peso da alavanca nas amostras, fazendo com que a tenacidade à fratura possa ser calculada diretamente, sem que haja a necessidade de uma correção do peso da alavanca.

2.3. Degradação de adesivos

2.3.1. Tipos de degradação

Os adesivos, tal como todo o tipo de materiais, estão sujeitos à degradação, seja temporal ou provocada por fatores externos como condições ambientais, fluidos, temperaturas excessivas, entre outros. Dessa forma é necessário conhecer quais os principais efeitos e repercussões que esses fatores irão ter nas propriedades dos adesivos, conforme descrito nos subcapítulos seguintes.

2.3.1.1. Influência da temperatura

A temperatura à qual o adesivo irá estar submetido revela-se um importante fator a considerar para o correto projeto de junta (Banea & da Silva, 2010). Aliás, qualquer mau dimensionamento ou escolha incorreta do adesivo pode ser crucial para o bom e seguro funcionamento do conjunto. De facto, as propriedades mecânicas do adesivo estão intrinsecamente relacionadas com a temperatura à qual ele se encontra ou irá estar submetido quando em serviço. De uma forma geral, quando expostos a baixas temperaturas, os adesivos apresentam uma maior rigidez e resistência mecânica, porém, exibem uma ductilidade menor (Jahani et al., 2022; Viana et al., 2017).

Uma vez que os adesivos operam, na maior parte dos casos, numa gama alargada de temperaturas, existem certos fatores que são determinantes para a resistência de uma junta quando submetida a essa variedade de temperaturas. Os fatores a considerar são (Petrie, 2006):

- Coeficiente de expansão térmica: o adesivo e os aderentes devem possuir coeficientes semelhantes de forma a evitar a acumulação de tensões e a contração do adesivo durante o processo de cura e respetivo arrefecimento;
- Módulo de elasticidade à temperatura de serviço;
- Condutividade térmica do adesivo.

A temperaturas mais elevadas, os adesivos tendem a exibir uma redução da sua tensão de cedência e módulo de elasticidade, embora tenha lugar um aumento da sua ductilidade. Por outro lado, uma exposição prolongada a temperaturas elevadas pode não só provocar oxidação e/ou pirólise do adesivo, alterando as suas qualidades, como também promover um aumento da mobilidade molecular, algo que, dependendo do adesivo e da sua aplicação, pode ser benéfico (Petrie, 2006; Viana et al., 2017).

Em adesivos cuja estrutura molecular já existe a reticulação, como é o caso dos adesivos termoendurecíveis, a exposição ou aquecimento prolongado a altas temperaturas pode provocar os seguintes efeitos (Petrie, 2006):

Cisão da cadeia molecular: implica a diminuição do seu peso molecular e força coesiva;

Reticulação contínua: origina a fragilização da ligação e a contração do adesivo;

Evaporação de plastificante: a ligação é enfraquecida;

Oxidação: ocorre apenas na presença de oxigénio e resulta na diminuição da força coesiva e na existência de camadas limite fracas.

Dada a sua natureza polimérica, os adesivos não são capazes de suportar temperaturas muito elevadas. De facto, até os adesivos formulados para resistir a tais temperaturas apresentam algum tipo de degradação acima de 200°C. Como tal, a temperatura de transição vítrea (T_g) deve ser sempre considerada no projeto de junta e na aplicação que se pretende dar ao adesivo. A T_g corresponde à temperatura à qual as cadeias moleculares do adesivo aumentam a sua mobilidade de forma significativa, o que corresponde à transição do adesivo de um estado vítreo para um estado com comportamentos semelhantes ao de uma borracha (Comyn, 2021).

Acima de T_g o adesivo apresenta fraca resistência e tem uma flexibilidade maior, o que se deve ao facto de moléculas se encontrarem com maior grau de liberdade para se movimentarem ou

deslizarem umas sobre as outras. De forma contrária, abaixo de T_g o adesivo ainda se encontra no estado vítreo e, como tal, exibe maior rigidez e resistência, porém com ductilidade moderada (Carbas et al., 2014; Viana et al., 2017).

2.3.1.2. Influência da humidade

O efeito da humidade nas propriedades mecânicas e físicas dos adesivos revela ser um grande problema pelo facto de a água ser uma substância muito polar e com tendência em permeabilizar este tipo de materiais. A humidade pode afetar a ligação adesiva de várias formas, entre as quais as propriedades do adesivo maciço, as propriedades da adesão na interface e ainda a variação dimensional dos aderentes caso estes sejam permeáveis (Petrie, 2011).

Efeito no interior do adesivo: tal como acontece com todos os materiais de cadeia polimérica, os adesivos, devido à sua alta mobilidade molecular, são facilmente permeáveis a todos os gases e líquidos (Viana et al., 2017). A absorção de humidade resulta na captação de moléculas de água pela cadeia polimérica principal, o que conduz a uma diminuição da T_g que reduz a força entre moléculas e pode dar origem ao aparecimento de fissuras. Além disso, a absorção de moléculas de água pode fazer com que estas reajam quimicamente com o adesivo e provoquem a hidrólise, diminuindo assim o seu peso molecular e as suas propriedades mecânicas. A partir do coeficiente de permeabilidade, P , e da constante de difusão de água, D , é possível prever quais serão as propriedades do polímero após a humidade ser incorporada (Petrie, 2011). A Tabela 10 apresenta os coeficientes de permeabilidade e as constantes de difusão da água de alguns polímeros industriais.

Tabela 10 - Coeficientes de permeabilidade e constantes de difusão da água em polímeros, adaptado de (Petrie, 2006)

Polímero	Temperatura [°C]	$P \times 10^{-9}$	$D \times 10^{-9}$
Poliisobutileno (PIB)	30	7 – 22	0,32
Fenólico	25	166	0,2 – 10
Epóxido	25	10 – 40	2 – 8
Polimetilmetacrilato (PMMA)	50	250	130
Acetato de polivinil (PVAc)	40	600	150

Efeito na interface: a humidade pode também afetar as propriedades de adesão entre o adesivo e o substrato. As moléculas de água tendem a ficar concentradas no substrato, usualmente em metal, e provocar a deslocação do adesivo, algo que promove uma diminuição da sua resistência (Figura 25). Porém, esta perda de resistência tende a diminuir de forma significativa ou mesmo a desaparecer, o que se torna mais evidente quando se inicia o processo de envelhecimento. Este efeito não é linear, mas sim dependente do tipo de adesivo e material dos substratos.

Efeito dimensional nos aderentes: dependendo da permeabilidade que o substrato possui, as suas dimensões podem ser alteradas quando submetidos a ambientes húmidos, tal é o exemplo da madeira. Estas alterações podem provocar tensões internas e em certos casos deformações

permanentes. A humidade pode também provocar uma diminuição das propriedades mecânicas do substrato através da corrosão do óxido do metal (Petrie, 2011). Desta forma, a interface é alterada e a sua resistência diminui. Sendo assim, o adesivo a selecionar deve ser capaz de concretizar a ideia.

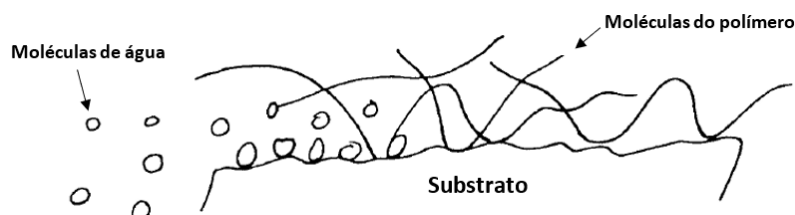


Figura 25 – Modificação da interface por meio de moléculas de água, adaptado de (Petrie, 2006)

2.3.1.3. Radiação

A polivalência dos adesivos estruturais permite que estes sejam utilizados em condições exigentes, tais como em ambientes que operam com radiações ionizantes. Este tipo de radiação provém de isótopos de raios gama, γ , (como ^{60}Co , ^{192}Ir ou ^{75}Se), feixes de eletrões e raios X, e está maioritariamente presente em reatores nucleares (tanto de fissão como de fusão), aceleradores de partículas de elevada energia e em certas instalações industriais (Zimmermann et al., 2022). Como tal, e uma vez que as ligações covalentes são as principais ligações químicas presentes num polímero, é necessário conhecer o efeito que a radiação irá ter, já que estas ligações são bastante sensíveis a radiação ionizante. A exposição de polímeros a esse tipo de radiação, de forma contínua, resulta na modificação das suas propriedades físicas, químicas, mecânicas e visuais (Guarino et al., 2001). Os principais processos primários que ocorrem quando um polímero é exposto a radiação ionizante são visíveis na Figura 26. De notar que a formação de radicais livres se deve, principalmente, à cisão da cadeia principal do polímero (Makuuchi, 2012a).

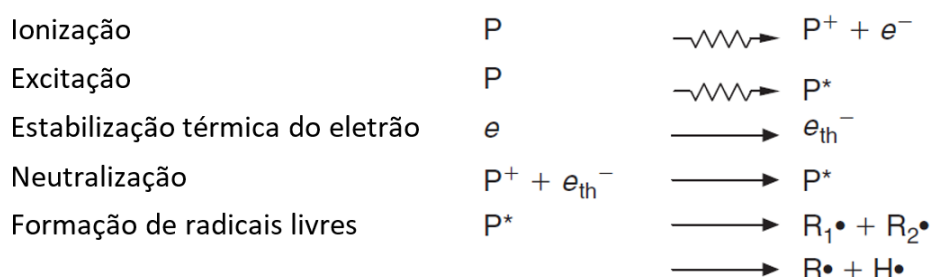


Figura 26 - Processos primários de interação de polímeros com radiação ionizante (P = Polímero, R = Radical), adaptado de (Makuuchi, 2012a)

Apesar das várias transformações que podem ocorrer, e atendendo a que polímeros diferentes possuem respostas distintas à radiação, os principais efeitos químicos que ocorrem em adesivos são essencialmente a ionização e a formação de radicais livres. A ionização, conforme é visível na Figura 26, baseia-se na remoção ou ganho de um ou vários eletrões do átomo da molécula. Por outro lado, os radicais livres formam-se a partir de moléculas devido à quebra de ligações covalentes após a excitação inicial. Uma vez que os materiais poliméricos tendem a absorver a energia provocada por essa excitação, a radiação ionizante provoca várias alterações químicas nestes materiais, algumas das quais (Makuuchi, 2012a):

Reticulação: formação de uma rede estrutural tridimensional onde as cadeias moleculares se interligam;

Cisão da cadeia molecular: quebra das ligações macromoleculares, o que resulta numa diminuição do seu peso molecular e conseqüente amolecimento;

Ramificações de cadeias longas: formação de uma rede estrutural, embora sem contornos tridimensionais;

Formação de cadeias de inserção (*Grafting*): permitem a inserção de monómeros na cadeia do polímero.

Ainda assim, segundo a literatura científica internacional, que se baseia nos efeitos da ionização e formação de radicais livres, as modificações que se verificam nos adesivos são, essencialmente, a reticulação, a cisão da cadeia molecular ou a combinação de ambos (Zimmermann et al., 2022). A reticulação tende a tornar os adesivos mais rígidos e aumenta a sua fragilidade, enquanto a cisão promove um amolecimento dos mesmos (Zimmermann et al., 2020). Na realidade, em adesivos, ocorre a combinação de ambos os efeitos de reticulação e cisão da cadeia (Figura 27). Porém, o tipo de estrutura molecular formada, a presença e tipo de aditivos, e o ambiente em que os adesivos estão inseridos, tendem a provocar o domínio de um desses efeitos (Guarino et al., 2001).

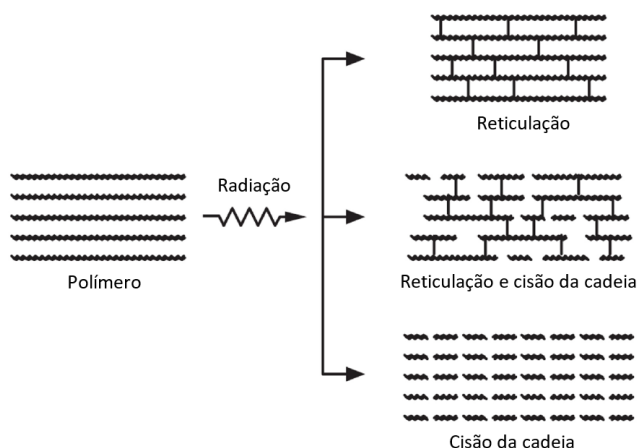


Figura 27 - Efeito da radiação em materiais poliméricos, adaptado de (Makuuchi, 2012b)

É ainda importante notar que o ambiente no qual o adesivo se encontra, ou está a ser estudado, influencia os resultados relativos ao seu comportamento mecânico, uma vez que a presença de ar amplifica os efeitos da radiação no adesivo (Zimmermann et al., 2022). De facto, um adesivo que se encontre numa atmosfera que possua oxigénio está sujeito a efeitos de oxidação, uma vez que o oxigénio molecular reage com os radicais livres que são formados, o que pode provocar a degradação do adesivo (Makuuchi, 2012a). O efeito da oxidação pode ser minimizado, ou até mesmo evitado, basta submeter o adesivo a doses maiores de radiação e/ou através da diminuição do tempo de exposição à radiação (Zimmermann et al., 2022).

O parâmetro que quantifica a produção ou quebra das ligações químicas por meio da radiação é denominado de valor “G”. Segundo Schnabel (2014), este valor é definido como sendo a cedência química de radiação das moléculas ou átomos que reagem por 100 eV de energia absorvida. Os valores de cedência química de radiação para efeitos de reticulação, $G(X)$, e cisão da cadeia, $G(S)$, são intrínsecos a cada material ou polímero, e a sua razão é determinante para efeitos de avaliação das suas propriedades mecânicas quando submetidos a radiação. De acordo com Makuuchi

(2012a), materiais cuja razão $G(S):G(X) < 1,00$ são mais suscetíveis a efeitos de reticulação, enquanto para razões $G(S):G(X) > 1,00$ os materiais tendem a degradar-se mais facilmente. No entanto, materiais que apresentam valores menores de $G(X)$ e $G(S)$ oferecem e exibem maior resistência à radiação. A Tabela 11 demonstra os valores de cedência química de radiação de alguns polímeros, assim como a sua razão.

Tabela 11 – Valores de cedência química de radiação para efeitos de reticulação e cisão em polímeros comuns, adaptado de Makuuchi (2012a)

Polímero	$G(X)$ - Reticulação	$G(S)$ - Cisão da cadeia	$G(S):G(X)$
PEBD	1,42	0,48	0,34
PEAD	0,96	0,19	0,20
PMMA	< 0,5	1,1 - 1,7	> 2
PTFE	0,1 - 0,3	3,0 - 5,0	10
Borracha natural	1,3 - 3,5	0,1 - 0,2	0,14
Nylon 6,6	0,5 - 0,9	0,7 - 2,4	1,4
Borracha butílica	< 0,5	2,9 - 3,7	> 6

Usualmente, com o aumento da dose da radiação, ou seja, do tempo ao qual o provete está submetido à radiação, o valor de $G(S)$ aumenta mais rapidamente que $G(X)$. Assim, com o aumento da dose existem três cenários possíveis de ocorrer, tal como se apresenta na Figura 28. Além disso, Makuuchi (2012a) resume os principais impactos que tanto a reticulação como a cisão da cadeia provocam em materiais de cadeia polimérica (Tabela 12).

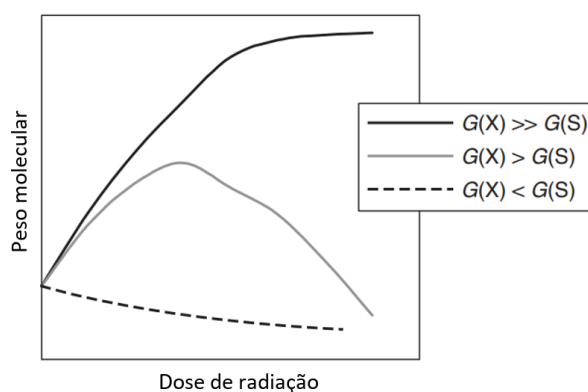


Figura 28 - Relação entre a dose de radiação e o peso molecular em polímeros, adaptado de Makuuchi (2012a)

Tabela 12 - Quadro resumo dos efeitos da reticulação e cisão da cadeia nas propriedades de um polímero

Reticulação	Cisão da cadeia
Aumento das propriedades mecânicas	Deterioração das propriedades mecânicas
Aumento da estabilidade térmica	Diminuição da estabilidade térmica
Aumento da viscosidade	Diminuição da viscosidade

Estes efeitos, na maior parte dos casos, ocorrem simultaneamente e equilibram-se, e podem inclusivamente não conduzir a nenhuma alteração aparente nas propriedades mecânicas do adesivo ou polímero. No entanto, é habitual ocorrer a oxidação do adesivo, o que poderá originar um aumento da sua fragilidade e a sua descoloração (Figura 29).

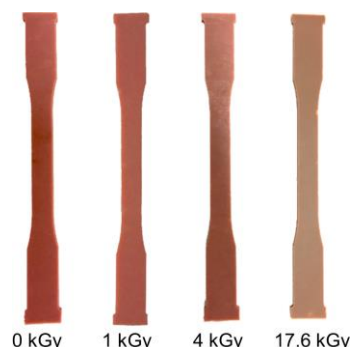


Figura 29 - Provetes maciços submetidos a diferentes dosagens de radiação (Zimmermann et al., 2019)

Ainda assim, vários cientistas e investigadores mostraram-se interessados em descobrir quais os efeitos que a radiação provoca nas propriedades mecânicas, físicas e químicas, em adesivos. A Tabela 13 sumariza alguns dos dados obtidos pelos mesmos e exhibe quais os adesivos utilizados, bem como a fonte de radiação, dosagens, parâmetros a avaliar e geometria dos provetes. De notar que a unidade do sistema internacional (SI) para a dose absorvida é o gray (Gy).

Tabela 13 - Quadro resumo das propriedades mecânicas avaliadas de adesivos submetidos a radiação, adaptado de Zimmermann et al. (2022)

Adesivo	Fonte de radiação	Dosagem máxima [MGy]	Taxa de dose [kGy/h]	Parâmetros avaliados				Geometria dos provetes
				$\sigma_{\text{máx}}$	$\epsilon_{\text{máx}}$	σ_{ced}	E	
Araldite 2011	^{60}Co	4	4	x	x		x	ISO R-527 Geometria 1
Epóxi, tipo L	^{60}Co	3	4	x	x		x	ISO R-527 Geometria 1
Stycast 1266	^{60}Co	3	4	x	x		x	ISO R-527 Geometria 1
EDT-10	Acelerador de partículas	1	S/ info.	x				Não normalizado
YD-128 epóxi	Raios γ	1.5	8	x				DIN EN ISO 527-2
Fiberite 934	Fluxo de neutrões	100	500	x	x	x	x	ASTM D638-2a

O efeito da radiação nos adesivos, tal como foi referido, pode não existir devido a vários fatores como a presença de aditivos ou outros componentes na sua composição. Porém, existem adesivos que vêm as suas propriedades alteradas quando submetidos a radiação (Figura 30).

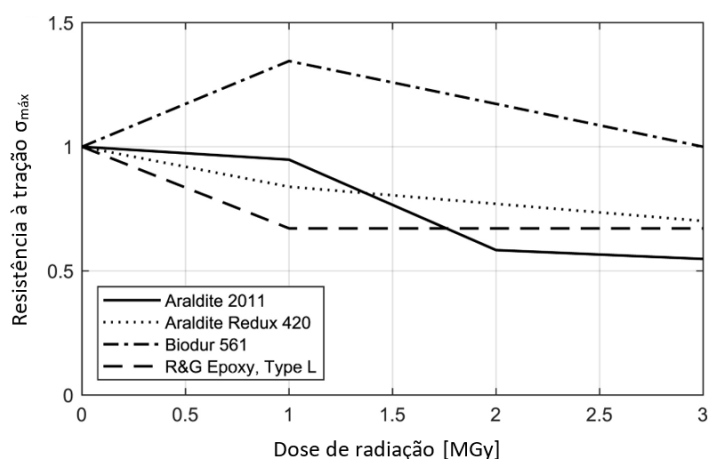


Figura 30 - Resistência à tração de vários adesivos depois irradiados, adaptado de Zimmermann et al. (2022)

2.3.2. Estado da arte na degradação de adesivos

O conhecimento, a confiança e a qualidade que as ligações adesivas têm vindo a demonstrar nas últimas décadas eleva, ainda mais, a distinção perante os outros métodos de ligação. Deste modo, foram muitas as organizações, empresas, investigadores e cientistas interessados em compreender os mecanismos de degradação de adesivos, e como esta degradação afeta o seu comportamento mecânico ou visual. A Tabela 14 resume alguns dos mais recentes avanços nesta área.

Tabela 14 - Quadro resumo dos avanços mais recentes na degradação de adesivos

Autores	Descrição do trabalho
(Han et al., 2020)	Neste trabalho foi analisada a degradação ambiental de adesivos estruturais, através da difusão da água a altas temperaturas, e qual a sua influência nas propriedades mecânicas do adesivo. Desta forma, os autores desenvolveram um modelo analítico de degradação ambiental devido à exposição do adesivo a água desionizada e água com 5% de NaCl, em peso. Posteriormente, foi possível verificar a degradação local das suas propriedades mecânicas devido à difusão da água. Além disso, constatou-se que, quanto maior o teor de humidade presente, maior é o nível de degradação. Após a comparação dos resultados obtidos dos valores da água com 5% de NaCl, os autores verificaram perdas dos módulos de elasticidade e dureza, relativamente à água desionizada, na ordem 5,9% e 11,9%, respetivamente.
(Qin et al., 2019)	Nesta investigação avaliou-se o efeito de gradientes térmicos na degradação de juntas adesivas de PRFC/liga de alumínio, visto que as propriedades dos materiais, principalmente poliméricos, podem alterar durante um ciclo térmico de longo prazo. As transformações químicas do adesivo e do PRFC foram analisadas por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) e Termogravimetria Diferencial (DTG). Foram, de igual forma, analisados os modos de falha e as variações da resistência em juntas de topo a topo submetidas a esforços de tração e corte, após diferentes tempos de envelhecimento. Foi constatada a melhoria da Tg, estabilidade térmica, resistência mecânica e módulo de Young do adesivo utilizando uma pós-cura, uma vez que esta provoca um alívio das tensões presentes na cadeia molecular. No entanto, verificou-se a diminuição da adesão do adesivo na superfície do PRFC devido a oxidação, resultando no aparecimento de rotura na interface. Assim, os autores puderam concluir que a degradação das juntas de submetidas a esforços de corte tiveram como principais causas as perturbações térmicas e a pós-cura do adesivo. As juntas submetidas à tração foram essencialmente afetadas pela rotura das fibras de PRFC.

-
- (Chelazzi et al., 2014)** Os autores avaliaram as modificações dos adesivos Mowilith DMC2[®] e Mowilith DM5[®] após degradação acelerada. Os filmes foram caracterizados por FTIR, DSC, DTG e Microscopia de Força Atômica (AFM). Através dos resultados obtidos a partir das análises térmicas realizadas e pela avaliação por AFM, os autores verificaram a existência de um rearranjo da estrutura molecular. Além disso, com base nesses ensaios indicaram que esse rearranjo se deve à, disputa pela predominância dos efeitos de reticulação e cisão da cadeia molecular. Notaram ainda que a degradação foi principalmente causada pela perda de grupos acetil, sendo observados efeitos de despolimerização e reticulação.
-
- (Biscaro et al., 2009)** Este estudo teve como principal objetivo a determinação da influência de diferentes doses de raios X na resistência da adesão à dentina de restaurações dentárias fabricadas em compósitos de resina. As dosagens utilizadas para a obtenção de resultados foram: 0, 5, 35 e 70 Gy. A radiação foi direcionada de forma a incidir diretamente na superfície dos provetes cilíndricos de resina. Os resultados obtidos permitiram aos autores aferir que, dependendo da dosagem, a resistência de adesão medida através de ensaios de corte, é enfraquecida, na medida em que, com o aumento da dosagem este efeito é mais evidente. Efetivamente, para uma dosagem de 5 Gy a resistência de adesão é ligeiramente influenciada pela radiação, no entanto para dosagens de 35 e 70 Gy esse efeito torna-se mais evidente.
-
- (Visakh et al., 2017)** Neste estudo os autores examinaram o efeito provocado pela irradiação por feixe de elétrons nas propriedades térmicas e mecânicas de compósitos de epóxido reforçados com nanopartículas de alumínio. Após a sua exposição a doses de radiação de 30, 100 e 300 kGy, os compósitos foram submetidos a ensaios de tração e a métodos de análise termogravimétrica. Este tipo de compósitos apresentou boa resistência à radiação. Aliás, para dosagens de 30 kGy e 100 kGy verificou-se um aumento de 45,6% e 52%, respetivamente, da sua resistência à tração comparativamente aos provetes não irradiados. Para a maior dosagem (300 kGy), a matriz sofria degradação das suas propriedades e a resistência à tração diminuía. Os autores notaram ainda que o módulo de elasticidade do compósito aumentava com o aumento da dosagem. De facto, o seu valor aumentou cerca de 38,4% para 30 kGy, 68,1% para 100 kGy e 124,3% para 300 kGy em relação à amostra não irradiada.
-

2.4. Técnicas de inspeção de materiais e estruturas

A procura por materiais, máquinas, peças e produtos de qualidade tem vindo a aumentar de forma significativa com o passar dos anos. Como tal, é necessário realizar uma inspeção ou verificação à conformidade, ou à falta da mesma, de um produto. Para este efeito são realizados testes às propriedades do material ou peça, onde se inserem os ensaios destrutivos, que não só permitem a avaliação quantitativa das suas propriedades como a sua resposta aos mais diversos tipos de solicitações. Estes ensaios possibilitam a avaliação das peças ou materiais já que é possível prever quais serão os seus comportamentos quando estes se encontrarem em serviço. Contrariamente aos ensaios mencionados, que provocam a destruição do provete testado, os ensaios não destrutivos admitem, sem qualquer tipo de prejuízo, a inspeção de toda a superfície e volume de uma peça, contribuindo assim para um nível de qualidade funcional e de prevenção de acidentes (Trampus et al., 2019). Estes tipos de ensaios podem ser efetuados na fase de produção, em pleno funcionamento ou em fases de manutenção.

2.4.1. Deteção de defeitos

A transformação e união de materiais, sejam eles metálicos ou não, em peças ou conjuntos industriais pode ser realizada por intermédio de diversos processos. Atendendo ao processo de

fabrico de cada peça estarão inerentes discontinuidades típicas, sendo necessário existirem técnicos com sólidos conhecimentos não só dos processos de fabrico, mas da forma de mitigar essas mesmas. Além disso, os técnicos, na inspeção de um dado material deverão saber como é que as discontinuidades estão orientadas e como é que elas tipicamente se apresentam no material ou na junta. As discontinuidades podem ser inerentes do processo, como por exemplo impurezas metálicas derivadas da contração térmica durante a solidificação em processo de fundição, ou podem ser discontinuidades resultantes de processos de fabrico, tais como o folheamento no processo de laminação ou até mesmo a má adesão do adesivo ao substrato por meio de uma preparação de superfície inadequada (Adams & Cawley, 1988).

A avaliação dos defeitos de qualquer processo de fabrico deve ser realizada tendo em consideração os seguintes conceitos (RELACRE, 2013):

- Descontinuidade – interrupção da estrutura física natural da peça;
- Indicação – acumulação de partículas ou líquido auxiliar ao ensaio;
- Defeito – descontinuidade que interfere negativamente com a utilidade que se pretende dar à peça.

Uma vez localizada a descontinuidade é necessário interpretá-la, ou seja, estabelecer uma correlação entre o que foi observado com a sua natureza, morfologia, orientação e tamanho. Para tal, deve ser feita uma avaliação conforme documentos ou normas já existentes de forma a definir se a heterogeneidade encontrada é ou não aceitável (Chauveau, 2018; Kumar & Mahto, 2013). Apesar disso as ligações adesivas ainda não possuem qualquer norma associada para a avaliação e determinação das discontinuidades encontradas. Para tal são realizados ensaios não destrutivos, de forma a averiguar a existência de defeitos na junta adesiva.

2.4.1.1. Defeitos comuns em adesivos

As ligações adesivas apresentam fraquezas associadas por mais rigoroso e controlado que seja o seu processamento (Omairey et al., 2021). Os defeitos que mais frequentemente são encontrados numa junta adesiva estão demonstrados na Figura 31 e são sucintamente descritos de seguida (Adams & Cawley, 1988; Omairey et al., 2021).

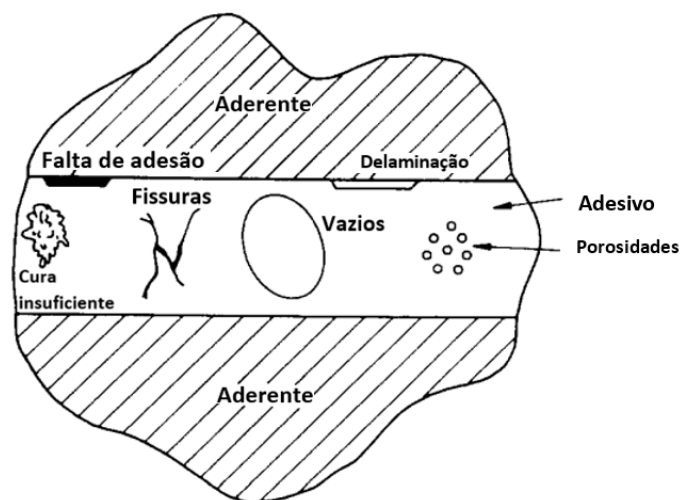


Figura 31 - Defeitos típicos de uma junta adesiva, adaptado de Adams and Cawley (1988)

Falta de adesão: este tipo de defeito é descrito por certos autores como sendo um defeito sem espessura/volume, porém, outros autores consideram que possui espessura na casa dos nanômetros. Na verdade, a falta de adesão representa uma falha significativa ou mesmo a perda total da união que se estabelece entre o adesivo e o aderente. Dada a sua natureza aleatória, uma vez que não é possível prever o seu aparecimento, muito dificilmente é detetado ou até mesmo evitado.

Cura insuficiente: está diretamente relacionada com o perfil de cura e com uma exposição térmica deficiente. Além disso uma dosagem incorreta ou uma formulação errada dos componentes que geram o adesivo podem provocar este defeito.

Fissuras: ocorrem essencialmente devido a uma má cura, no entanto podem também surgir devido a contrações térmicas e esforços de fadiga.

Porosidades, vazios e faltas de adesivo: devem-se essencialmente ao aprisionamento de voláteis e gases, reações químicas durante o processo de cura ou aplicação insuficiente de adesivo.

Delaminação: estes defeitos, também apelidados de descolagens, ocorrem de forma aleatória e em diferentes fases da vida útil da junta adesiva. O tipo de cargas, condições ambientais e degradação do adesivo e dos aderentes ditam o aparecimento deste defeito que consiste, essencialmente, na criação de uma área não colada.

2.4.2. Técnicas de inspeção destrutivas

O principal objetivo de uma inspeção destrutiva passa por analisar o ponto de rotura, ou falha, de um dado material, pelo que resulta na destruição do mesmo. Conforme referido anteriormente, com este tipo de ensaios é possível verificar como é que o material se comportaria quando submetido a diferentes tipos de solicitações. Desta forma, é possível verificar e testar as propriedades de um dado componente ou junta adesiva mesmo antes de ela ser produzida em massa.

Esses testes são, na maioria dos casos, realizados em laboratórios e com recurso a material e pessoal especializado. Aliás, o corpo técnico pode mesmo abranger um vasto leque de áreas (podem ser químicos, analistas de falhas, cientistas de materiais, engenheiros de polímeros, mecânicos ou metalúrgicos, entre outros). As técnicas de inspeção destrutivas mais utilizadas em ligações adesivas são:

- Ensaio de tração – caracteriza-se por medir a força necessária que se impõe ao material até que ele comece a deformar plasticamente ou até se dar a rotura. Além disso permite ainda obter algumas propriedades acerca do adesivo e da junta como tensão de rotura, tensão de cedência, alongamento após rotura e estricção (Saba et al., 2019). Deve ter-se especial atenção ao alinhamento dos mordentes da máquina de tração, já que um ligeiro desalinhamento dos mesmos pode levar a uma obtenção errada das propriedades desse material;
- Ensaio de impacto Charpy – estes ensaios de choque, que utilizam dispositivos pendulares para atingir um provete entalhado (Figura 32), permitem obter a energia absorvida na fratura, no domínio plástico. Essa energia é calculada a partir do princípio de conservação da energia mecânica, mais concretamente a partir da diferença de alturas do pêndulo no

instante inicial e no instante final após o embate. Este teste, além de servir como meio de comparação entre materiais possibilita ainda a caracterização da sua fratura: dúctil ou frágil (Chandrasekar et al., 2018; Saba et al., 2019; Sato & Marzi, 2021);

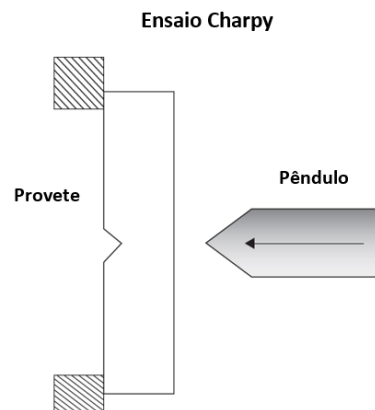


Figura 32 - Princípio de funcionamento do ensaio de impacto Charpy , adaptado de Chandrasekar et al. (2018)

- Ensaio de fadiga – consiste em sujeitar um componente mecânico a solicitações dinâmicas ou repetidas até ao aparecimento de fendas, ou até à sua fratura total, de forma a verificar a resistência à fadiga. A fadiga trata-se de um processo progressivo, localizado e de mudança estrutural de um material e consiste, essencialmente, em três fases: nucleação da fenda, crescimento da fenda a nível micro e macroscópico e rotura (Boyer, 1986). Este ensaio permite prever a vida de uma junta adesiva sujeita a esforços cíclicos, ou seja, quantificar o número de ciclos até à falha. A norma ASTM D3166 define os parâmetros para a execução do ensaio de fadiga a provetes submetidos a esforços de corte (Figura 33).

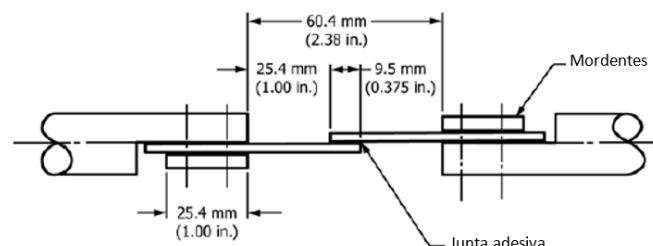


Figura 33 - Provete para execução do ensaio de fadiga a juntas adesivas submetidas a esforços de corte, adaptado de ASTM D3166 - 2012

- Ensaio de dureza – é um teste muito utilizado para determinar a dureza de um adesivo. Entende-se por dureza como a resistência que um material apresenta a ser penetrado ou riscado por um outro (Chandler, 1999). De uma forma geral, um indentador, com carga previamente conhecida e durante um determinado período, é pressionado contra a superfície do material em causa, sendo verificados os tamanhos e profundidades das indentações;
- Ensaio de torção – o seu principal objetivo é dar a conhecer o comportamento de um material sujeito a cargas de torção. Em juntas adesivas é utilizado para conhecer, por exemplo, a resistência ao corte (Ferraris et al., 2022). Estes testes podem ser realizados até à falha ou submetendo o material a um momento torsor por um determinado período ou testando o material em operação (Priya et al., 2022).

2.4.3. Técnicas de inspeção não destrutivas

Os ensaios não destrutivos são definidos, de acordo com a The American Society for Nondestructive Testing (ASNT), como “*a determinação da condição física de um objeto sem afetar a sua capacidade de cumprir a função ao qual é destinado*”. Deste modo, é possível averiguar se existem variações ou descontinuidades nas propriedades e condições físicas do material ou da junta e assim determinar se essas mesmas irão ou não afetar a sua aplicabilidade. Estes ensaios, atualmente, assentam em dois grandes objetivos: o salvaguardar o público e o ambiente contra a falha de componentes e estruturas, e a otimização da produtividade do componente que está a ser inspecionado (Trampus, 2013). Além disso, uma das vantagens deste tipo de ensaios (a sua maioria) é a sua facilidade de serem executados “*in situ*”, algo que traz um valor acrescido quando se trata de estruturas incapazes de ser transportadas. Dentro das muitas técnicas de inspeção não destrutivas a ligações adesivas destacam-se as descritas pelos subcapítulos que se seguem (Deepak et al., 2021; Kumar & Mahto, 2013).

Inspeção visual

A inspeção visual é um dos métodos mais antigos na deteção de defeitos ou imperfeições. Esta técnica resume-se à examinação de superfícies provendo-se para tal de uma essencial “*ferramenta*”: o olho. A quantidade de luz que o olho capta define a qualidade de imagem que o operador irá ter. No entanto, fatores como a condição da superfície, brilho, temperatura, tamanho e formato do objeto podem influenciar a quantidade de luz que é refletida para o olho (Gupta et al., 2021). Entre todos os tipos de ensaios não destrutivos, é correto dizer que a inspeção visual é a técnica mais básica, comum e efetiva, pois permite poupar recursos e tempo útil e assim reduzir a quantidade de ensaios complementares necessários (Gholizadeh, 2016). Além disso, a inspeção visual serve de complemento a todas as outras técnicas (Dwivedi et al., 2018; Márquez, 2020).

Ultrassons

Neste tipo de ensaio, que é dos mais utilizados na deteção de defeitos a juntas adesivas, é imprescindível que o transdutor esteja acoplado ao material a ser ensaiado através de um meio líquido ou sólido, podendo esta camada de gel atuar como acoplante. Isto torna-se necessário devido à diferença da impedância entre o ar e os materiais sólidos (Adams & Cawley, 1988). O ensaio é realizado com o transdutor posicionado por forma a que o feixe ultrassónico emitido incida na superfície do material a ser analisado, permitindo assim que as informações sejam obtidas a partir da área delimitada pelo feixe (Adams & Drinkwater, 1997). Através da varredura do transdutor pela superfície do material é possível obter vários tipos de medições. Após a deteção do defeito, é produzido um plano com o posicionamento do mesmo, no entanto sem informações acerca da sua profundidade (Adams & Cawley, 1988). A varredura A-scan consiste numa representação unidimensional de ecos e indica a variação da magnitude dos ecos refletidos com o tempo, estando relacionada com a presença de defeitos. Por outro lado, caso a amplitude do eco seja traçada com base na intensidade, é apelidada de B-scan. Além disso, se a amplitude do eco for controlada em cada ponto da superfície, a varredura é definida como C-scan (Adams & Drinkwater, 1997).

Para frequências abaixo de 20 MHz, a deteção de defeitos como fissuras, vazios e porosidades é geralmente mais simples e eficaz. No entanto, para a análise das propriedades coesivas dos

adesivos, é recomendada a utilização de ultrassons de alta frequência, ou seja, acima de 20 MHz (Adams & Cawley, 1988).

Radiografia

As técnicas de inspeção radiográficas ainda se encontram em desenvolvimento na área de juntas adesivas, quando se trata de juntas metal-metal, devido à dificuldade de detecção de defeitos. O adesivo, sendo um material polimérico, é muito menos denso que os aderentes, pelo que a absorção de radiação pelos aderentes é superior. Para combater este efeito, devem utilizar-se cargas metálicas de forma a aumentar o contraste, sendo possível observar a presença de vazios. Por outro lado, em plásticos reforçados com fibras, a técnica pode ser aplicada após escolha de uma energia e fluxo adequados, pois a densidade dos aderentes é semelhante à dos adesivos (Adams & Drinkwater, 1997). Além disso, a detecção de delaminações através da técnica não é fácil, pois estas tendem a ser normais ao feixe de raios X. No entanto, através da adição de um penetrante radiopaco, que melhora o contraste, são geradas imagens mais precisas e de grande auxílio na análise de propagação de danos aos materiais. Por sua vez, as porosidades e fissuras apenas podem ser verificadas caso o seu tamanho seja notório comparativamente à espessura da amostra (Adams & Cawley, 1988; Adams & Drinkwater, 1997).

2.5. Análise crítica da revisão bibliográfica

Os adesivos, e mais propriamente as ligações adesivas, estão presentes em praticamente todos os objetos e mecanismos do nosso cotidiano devido às suas excelentes propriedades e versatilidade. A sua fácil aplicação e a redução, por vezes, de processos de fabrico complementares, fazem com que os adesivos sejam utilizados pela generalidade das indústrias. Porém, devido às suas características e natureza polimérica, estes são mais passíveis de sofrerem degradação e, por conseguinte, ocorrer a diminuição ou modificação das suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Deste modo, torna-se necessário conhecer o efeito que a degradação provoca nos adesivos, mais concretamente aquela que é imposta pela radiação.

O estudo da influência da radiação ionizante em adesivos é detalhado por diversos autores, e constata-se que as transformações ocorrem, maioritariamente, a nível macromolecular por meio da reticulação e cisão da cadeia molecular. Os mesmos autores referem e comprovaram, através de estudos experimentais, que as propriedades mecânicas tendem a decair com o aumento da dosagem radioativa. Contudo, também se observou que a presença de aditivos pode contradizer essa tendência, ou seja, melhorar as propriedades mecânicas dos adesivos. Além disso, é ainda possível verificar que as suas propriedades físicas se alteram. Essa deterioração ocorre a nível da coloração do adesivo, verificando-se visualmente pela perda da sua tonalidade para tons mais suaves devido ao aumento da dosagem de radiação.

Com base nos conteúdos abordados na revisão bibliográfica que dizem respeito à redução das propriedades mecânicas dos adesivos serão, na futura componente experimental, realizados ensaios mecânicos a provetes maciços de adesivo submetidos a diferentes tempos e doses radioativas, para que assim se possam comprovar todas as previsões investigadas pelos mais diversos autores. Assim espera-se que os resultados obtidos sejam uma mais-valia na área das ligações adesivas e sirvam de guião para trabalhos futuros.

3. DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo são descritas todas as etapas experimentais necessárias para a realização deste trabalho, mais concretamente a escolha de materiais, o fabrico dos provetes, exposição dos provetes à radiação e o ensaio para a obtenção das propriedades mecânicas resultantes dos adesivos.

3.1. Planeamento do trabalho

O principal objetivo desta dissertação é observar e quantificar o efeito que as radiações ionizantes do tipo X e gama apresentam sobre dois adesivos estruturais distintos vastamente utilizados pela indústria. As ligações moleculares deste tipo de materiais, segundo a literatura científica, são mais vulneráveis à radiação ionizante. Assim, de modo a comprovar tais efeitos foram fabricados provetes maciços de cada adesivo, Araldite® AV138 e Sikaforce® 7818 L7. Os provetes foram, posteriormente, submetidos a diferentes períodos e tipos de radiação nas instalações da empresa QTEC – TÜV Áustria Ibéria. De modo a conciliar as exposições necessárias com as atividades laborais da empresa foi apresentado um plano de intervenções (Tabela 15) que continha as fontes de radiação ionizante a utilizar, bem como o número de provetes e horas de exposição necessárias.

Tabela 15 - Plano de intervenções

	Tempo de exposição	Araldite® AV138	Sikaforce® 7818 L7
Referência	0h	3	3
Raios X	15min	3	3
	30min	3	3
	45min	3	3
	60min	3	3
Raios gama (Iridio)	30h	3	3
	60h	3	3
	90h	3	3
	120h	3	3
Raios gama (Selénio)	30h	3	3
	60h	3	3
	90h	3	3
	120h	3	3
Nº total de provetes	78		

3.2. Requisitos e limitações

Uma vez definidos os principais objetivos desta dissertação, é importante indicar os requisitos e limitações impostos pela natureza do tema a abordar e da empresa onde são realizados os ensaios, a saber:

Requisitos

- Curso de proteção radiológica: de modo a ser possível trabalhar diretamente com esse tipo de fontes;
- Equipamentos de proteção radiológica, tais como dosímetros;
- Sala capaz de reter as radiações emitidas, ou seja, um *bunker*;
- Fontes de radiação do tipo gama;
- Gerador de raios X;

Limitações

- Elevado fabrico de provetes;
- Conciliação das exposições com as atividades laborais da empresa;
- Necessidade de abertura e fecho manual das fontes radioativas.

3.3. Adesivos utilizados

Os adesivos utilizados para o fabrico de provetes nesta componente experimental servem uma ampla diversidade de aplicações nas mais diferentes áreas produtivas. Tratam-se de adesivos estruturais com boas propriedades mecânicas, apesar de apresentarem comportamentos distintos, sendo o adesivo Araldite® AV138 mais frágil e o adesivo Sikaforce® 7818 L7 mais dúctil.

3.3.1. Araldite® AV138

Este adesivo, fabricado pela empresa Huntsman, pertence à família dos epóxis e embora apresente um comportamento frágil, caracteriza-se pela sua elevada resistência, conforme é possível constatar nas curvas tensão-deformação (σ - ϵ) da Figura 34. A sua resistência a ambientes quimicamente agressivos e a temperaturas elevadas faz com que seja amplamente utilizado em aplicações aeroespaciais e em telecomunicações (Hunstman, 2009).

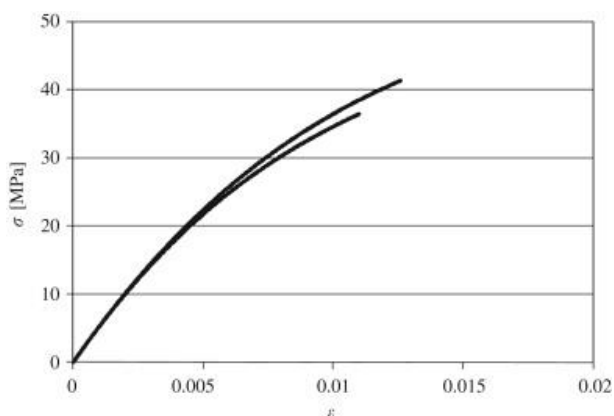


Figura 34 - Curvas σ - ϵ experimentais do adesivo Araldite® AV138 (Campilho et al., 2011)

Por se tratar de um adesivo bicomponente, ou seja, a duas partes, a cura dá-se por reação química à temperatura ambiente através da mistura da resina AV138 com o endurecedor HV998 (Figura 35). A mistura é efetuada de forma manual - até se obter uma mistura homogénea - cumprindo, segundo as especificações do fabricante, a razão mássica 100:40, ou seja, 100 g de resina para 40 g

de endurecedor. A Tabela 16 enumera algumas das principais propriedades mecânicas deste adesivo.



Figura 35 - Adesivo Araldite® AV138

Tabela 16 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138, adaptado de Campilho et al. (2011)

Propriedades	AV138
Módulo de Young, E (GPa)	4,89±0,81
Coefficiente de Poisson, ν	0,35
Tensão de cedência à tração, σ_y (MPa)	36,49±2,47
Tensão de rotura à tração, σ_f (MPa)	39,45±3,18
Deformação de rotura à tração, ϵ_f (%)	1,21±0,10
Módulo de corte, G (GPa)	1,56±0,01
Tensão de cedência ao corte, τ_y (MPa)	25,1±0,33
Tensão de rotura ao corte, τ_f (MPa)	30,2±0,40
Deformação de rotura ao corte, γ_f (%)	7,8±0,7
Tenacidade à tração, G_{IC} (N/mm)	0,43±0,02
Tenacidade ao corte, G_{IIc} (N/mm)	4,7±0,34

3.3.2. Sikaforce® 7818 L7

O adesivo Sikaforce® 7818 L7 é produzido pela empresa Sika®, reconhecida mundialmente pelas suas soluções de colagem, selagem e amortecimento. Este adesivo poliuretano a duas partes destaca-se pelo seu reduzido tempo de cura e elevada resistência mecânica, sendo inclusivamente utilizado na união de peças e outros componentes de turbinas eólicas (Sika®, 2013). Por se tratar de um adesivo relativamente recente, e este não se encontrar disponível na literatura científica, não existem dados suficientes que o permitam caracterizar quanto às suas propriedades mecânicas e de fratura. A Tabela 17 reúne as principais características técnicas disponibilizadas pelo fabricante do adesivo.

Tabela 17 - Ficha técnica do adesivo Sikaforce® 7818 L7, adaptado de (Sika®, 2013)

Propriedades		Sikaforce® 7818 L7 (Resina)	Sikaforce® 7050 (Endurecedor)
Base química		Polióis	Derivados de isocianato
Cor		Branco	Castanho
	Mistura	Bege	
Densidade		1,23 g/cm ³	1,24 g/cm ³
	Mistura	1,23 g/cm ³	
Razão de mistura	Volume	100	45
	Peso	100	45
	Cartuchos/bicos	2	1
Viscosidade		500 Pa.s (aprox.)	35 Pa.s (aprox.)
Temperatura de aplicação		15 - 30°C	
Tempo de utilização (<i>Pot life</i>)		7 min. (aprox.)	
Dureza Shore D		75 (aprox.)	
Resistência à tração		35 MPa (aprox.)	
Alongamento na rotura		2,5% (aprox.)	
Módulo de Young		2500 MPa (aprox.)	
Temperatura de transição vítrea		45°C	
Tempo de armazenamento (<i>Shelf Life</i>)	Baldes	12 meses	6 meses
	Cartuchos e latas	9 meses	

A Figura 36 demonstra a pistola que, através de um bico de mistura de núcleo helicoidal, proporciona a combinação dos dois componentes homogeneamente, permitindo uma fácil aplicação do adesivo após misturado na proporção correta.



Figura 36 - Pistola Sika® com bico de mistura de núcleo helicoidal

De acordo com o fabricante, tal como salientado na Tabela 17, a razão mássica de mistura é de 2:1 quando esta é efetuada através de bicos como o exemplificado, isto é, 2 g de resina Sikaforce® 7818 L7 para 1 g de endurecedor Sikaforce® 7050. A cura realiza-se à temperatura ambiente.

3.4. Fabrico dos provetes

3.4.1. Geometria dos provetes e molde utilizado

Os provetes de adesivo necessários para o estudo em questão foram fabricados de acordo com as indicações presentes na norma francesa NF T 76-142 (2021). A Figura 37 demonstra a geometria e as dimensões dos provetes produzidos.

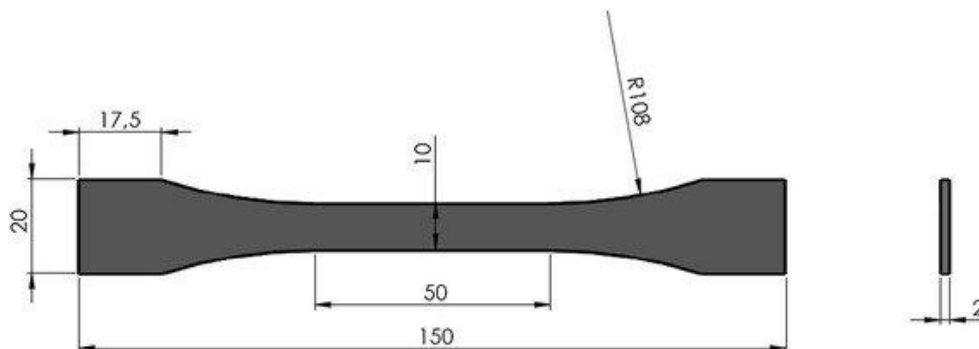


Figura 37 - Dimensões, em mm, dos provetes maciços de adesivo de acordo com a norma NF T 76-142 20 (Monteiro et al., 2015)

O fabrico dos provetes foi efetuado através do processo de moldação manual no molde de aço elaborado por Pinto (2013) e presente na Figura 38, que permite a produção de seis provetes em simultâneo.

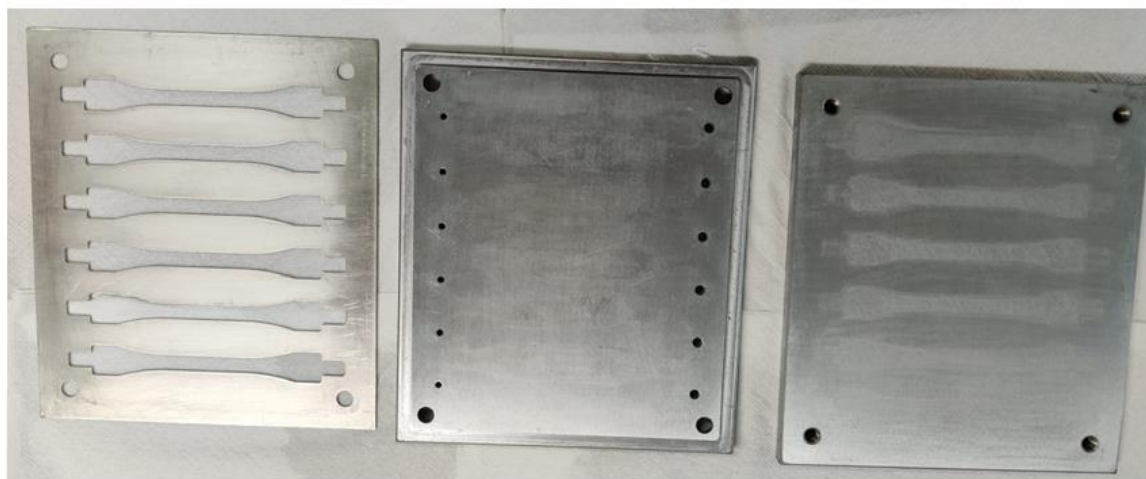


Figura 38 - Placas constituintes do molde para fabrico de provetes maciços de adesivo

Este molde é constituído por duas placas, superior e inferior, maquinadas por Controlo Numérico Computorizado (CNC). De modo a garantir um melhor acabamento superficial, que favorece a desmoldagem dos provetes, as placas foram retificadas antes e após serem submetidas a uma cromagem dura. Este processo tem como propósito aumentar a resistência ao desgaste e abrasão das placas, o que permite que estas não se danifiquem, por exemplo, na extração dos provetes ou limpeza do molde. A placa intermédia, à esquerda na Figura 38, foi fabricada por corte a laser atendendo à geometria dos provetes, uma vez que se pretendiam obter arestas vivas internas na placa.

3.4.1.1. Preparação do molde

A preparação do molde revela ser uma das etapas mais importantes no fabrico de provetes maciços de adesivo para garantir a qualidade dos mesmos. Atendendo ao facto de o fabrico não ser um processo livre de imperfeições, como vazios ou faltas de adesão, ou ainda não existir nenhum método capaz de garantir a correta produção dos mesmos, torna-se crucial minimizar as causas destas falhas. Como tal, existem três etapas que foram cumpridas nesse sentido, a saber:

- 1º Limpeza** – com vista a remover quaisquer resíduos sólidos presentes nas superfícies das placas ou sujidades (gorduras, poeiras e outros contaminantes) foram, respetivamente, utilizadas espátulas e acetona, como processos ativo físico e passivo químico, respetivamente. A acetona foi aplicada a todas as superfícies que se previam estar em contacto com o adesivo, nomeadamente os orifícios da placa superior, todas as faces da placa intermédia e a face superior da placa inferior. Esta limpeza facilita a aderência do desmoldante Loctite Frekote® 770-NC utilizado nas placas do molde. A Figura 39 demonstra o processo de limpeza referido.



Figura 39 - Limpeza da placa intermédia do molde com acetona

- 2º Aquecimento das placas** – após as placas se encontrarem devidamente limpas e livres de gorduras ou oleosidades, estas são colocadas num forno a 60°C durante, aproximadamente, 15 minutos (Figura 40). Este aquecimento melhora a aderência do desmoldante conforme as instruções técnicas definidas pelo fabricante (Henkel®, 2014).



Figura 40 – Aquecimento, no forno, das placas constituintes do molde

3º Aplicação de desmoldante – a utilização deste produto tem como principal objetivo auxiliar e simplificar a remoção dos provetes, já curados, do molde. Como tal, é necessário que a sua aplicação seja o mais uniforme possível por todas as superfícies e orifícios do molde que entrarão em contacto com o adesivo. Assim, e depois de concluída a etapa de aquecimento, procedeu-se à aplicação do desmoldante, através de um pincel (Figura 41), sobre as placas ainda quentes, do molde, repetindo-se esta etapa três vezes.

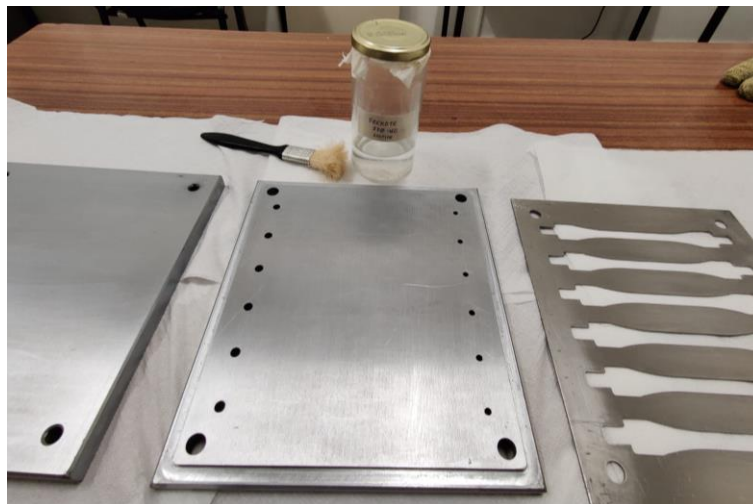


Figura 41 - Aplicação do desmoldante Loctite Frekote® 770-NC às placas do molde

3.4.2. Aplicação do adesivo por moldação em molde aberto

De um modo geral, e tal como descrito anteriormente, as resinas são misturadas com os endurecedores para se obterem os adesivos desejados. Esta etapa foi realizada depois da aplicação do desmoldante às placas do molde após estas arrefecerem até à temperatura ambiente. Por se tratarem de adesivos e misturas distintas, a sua aplicação no molde é descrita de forma individual nos subcapítulos que se seguem.

3.4.2.1. Aplicação do adesivo Araldite® AV138

Num primeiro momento foi necessário preparar o adesivo de acordo com a razão de mistura definida pelo fabricante, isto é, 10 g de resina para 4 g de endurecedor. De modo a que o adesivo preenchesse todas as cavidades do molde, seguiu-se a quantidade sugerida por Pinto (2013) de 80 g de resina para 32 g de endurecedor. Para que todas as cavidades fossem devidamente preenchidas, esta razão incluiu um sobredimensionamento de, aproximadamente, 30% de adesivo. De seguida procedeu-se à mistura dos dois componentes, num recipiente plástico, até se obter uma combinação homogénea. De forma a garantir que as placas não se moviam enquanto o adesivo era aplicado, nomeadamente a intermédia e a inferior, foram roscados dois parafusos nessas mesmas, conforme se verifica na Figura 42.

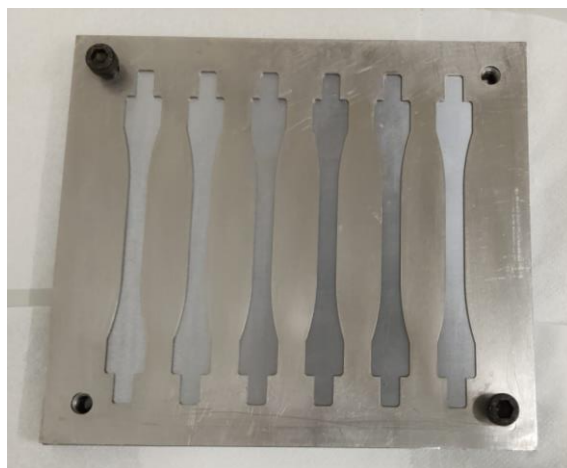


Figura 42 - Fixação da placa intermédia e inferior para aplicação do adesivo

O adesivo foi então espalhado pelas cavidades do molde com recurso a uma espátula. Nesta fase é importante evitar movimentos que provoquem a formação de vazios ou outras imperfeições que afetem o comportamento mecânico do provete. Como tal, após a aplicação do adesivo procedeu-se à sua compactação manual com a espátula, obtendo-se um espalhamento uniforme (Figura 43).



Figura 43 - Adesivo Araldite® AV138 aplicado e compactado no molde

De seguida realizou-se o fecho do molde. Os parafusos que tinham sido colocados para evitar qualquer oscilação das placas na aplicação do adesivo foram removidos e a placa superior foi devidamente posicionada através de um movimento perpendicular imposto às faces do molde, e apertada pelos quatro parafusos. Este aperto permitiu que as inclusões de ar e todo o adesivo em excesso saíssem pelos orifícios da placa superior, tal como se verifica na Figura 44.

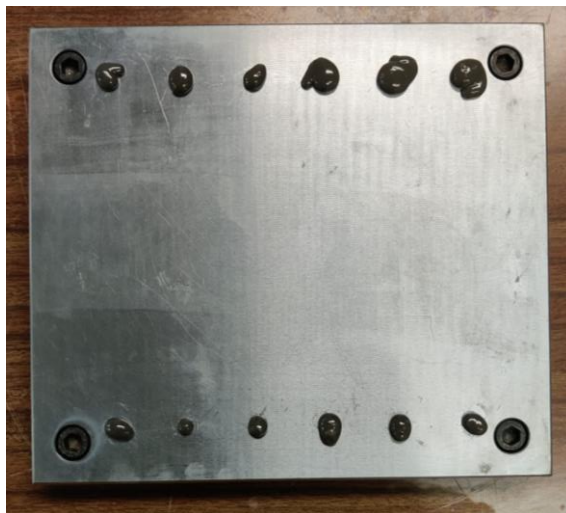


Figura 44 - Fecho do molde e surgimento de excesso de adesivo

3.4.2.2. Aplicação do adesivo Sikaforce® 7818 L7

A preparação deste adesivo seguiu contornos distintos, uma vez que o adesivo foi fornecido em cartuchos que possuíam um bico de mistura de núcleo helicoidal, ou seja, a mistura foi efetuada dentro do próprio bico à razão mássica de 2 g de resina para 1 g de endurecedor. O uso da pistola e dos cartuchos permite utilizar a quantidade de adesivo necessária para o enchimento das cavidades do molde. Embora a mistura do adesivo seja realizada de forma diferente, a sua aplicação no molde é, aliás, mais facilitada devido ao uso da pistola. Apesar deste facto, foi igualmente necessário realizar o aperto dos parafusos na placa inferior e intermédia do molde para impedir a oscilação das mesmas. A Figura 45 demonstra a aplicação deste adesivo com recurso à pistola e aos cartuchos.

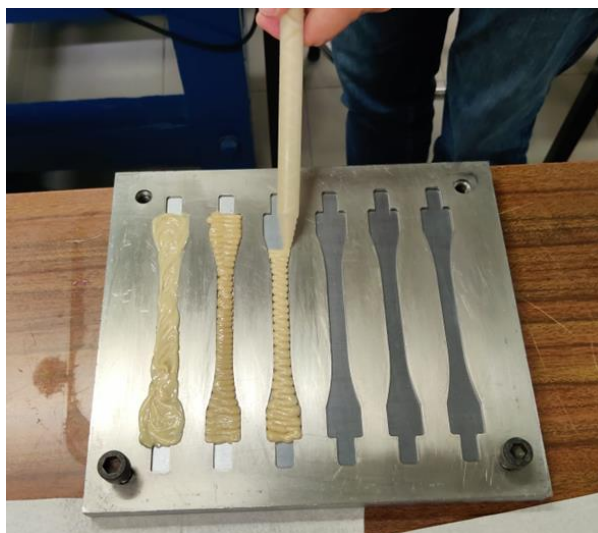


Figura 45 - Aplicação do adesivo Sikaforce® 7818 L7 ao molde

Atendendo ao facto de não ser possível fazer o espalhamento do adesivo de forma mais uniforme, e como este método de enchimento do molde pode induzir a inclusão de bolhas de ar, efetuou-se a compactação e uniformização do mesmo com recurso a uma pequena espátula. A Figura 46 ilustra este processo.



Figura 46 - Adesivo Sikaforce® 7818 L7 aplicado e compactado no molde

Logo depois efetuou-se o fecho do molde através da colocação da placa superior sobre as outras placas, dando-se assim uma aproximação perpendicular à placa inferior do molde, e a devida roscagem dos parafusos. Posto isto verificou-se, através dos furos presentes na placa superior, o adesivo excedente que foi expelido (Figura 47).

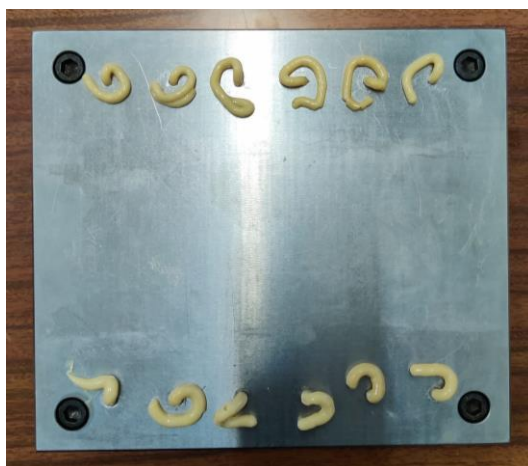


Figura 47 - Excesso de adesivo expulso no aperto do molde

3.4.3. Cura e extração dos provetes

Os provetes, em ambos os adesivos, foram curados à temperatura ambiente, aproximadamente a 25°C. A Tabela 18 especifica os tempos mínimos de cura fornecidos pelo fabricante. No entanto, os provetes fabricados excederam esse tempo.

Tabela 18 - Tempos de cura dos adesivos utilizados

	Araldite® AV138	Sikaforce® 7818 L7
Tempo de cura (horas)	24	24

O adesivo que no fecho do molde foi expulso para a placa superior também se encontrava curado, pelo que foi necessário, através do uso de uma espátula e um martelo, quebrar cuidadosamente esses excessos, para não danificar o molde (Figura 48).



Figura 48 - Remoção do adesivo excedente sobre a placa superior

Logo depois efetuou-se a abertura do molde. Na Figura 49 é possível notar o bom acabamento superficial dos provetes, apesar de se constatar a presença de alguns defeitos como vazios.

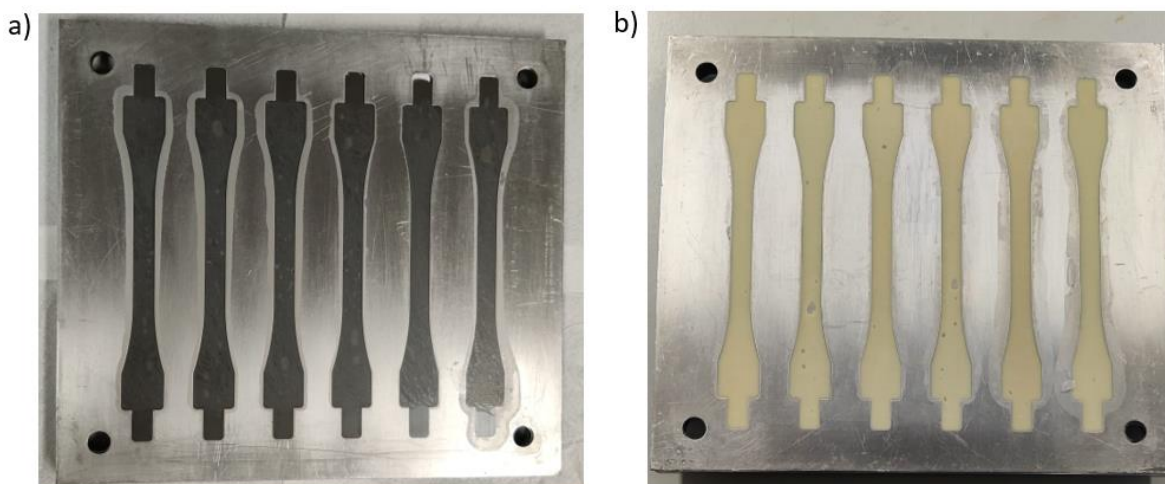


Figura 49 – Acabamento superficial dos provetes de adesivo: a) Araldite® AV138 e b) Sikaforce® 7818 L7

De seguida efetuou-se a extração dos provetes do molde, cuja etapa inicial consistiu na remoção do adesivo remanescente nos orifícios da placa superior com o auxílio de punções e um martelo, com movimentos de pequeno curso perpendicularmente ao plano das placas, tendo sempre o maior cuidado para não danificar os provetes. Quando estes já se encontravam livres desses excessos foi possível retirar a placa intermédia e extrair os provetes. A rebarba que se formou em torno dos provetes, presente na Figura 50, e os resíduos que ficaram acoplados às placas, foram depois removidos. De modo a se poderem fabricar mais provetes, o molde foi de novo limpo com acetona, tendo-se repetido todo o procedimento anteriormente descrito.

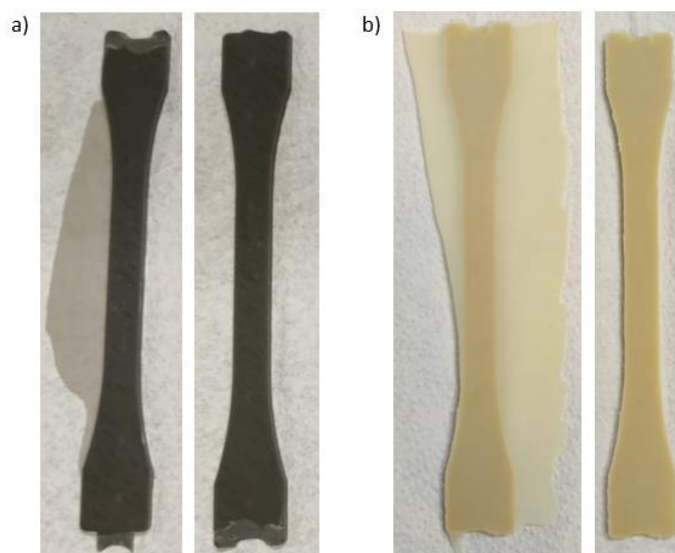


Figura 50 - Remoção da rebarba dos provetes de adesivo: a) Araldite® AV138 e b) Sikaforce® 7818 L7

3.5. Ensaios realizados

O tema desta dissertação tem como principal objetivo verificar o efeito da radiação ionizante do tipo gama e X nas propriedades mecânicas dos adesivos já referidos. Os provetes fabricados teriam, assim, de ser submetidos a esse tipo de radiação. Como tal, através de contactos realizados com a empresa QTEC – TÜV Áustria Ibéria, pertencente ao grupo multinacional TÜV Áustria e especialista em diversos serviços como certificação de sistemas de gestão, qualidade, inspeções mecânicas e ensaios não destrutivos foi possível utilizar as suas instalações e equipamentos, incluindo as fontes radioativas e geradores de raios X que possuem. Depois dos provetes terem sido expostos a essas radiações, realizaram-se ensaios de tração nas instalações do ISEP.

3.5.1. Princípios gerais sobre radiação ionizante

O uso de fontes radioativas, de acordo com o Decreto-Lei nº108/2018, de 3 de dezembro, da Presidência do Conselho de Ministros, é da responsabilidade de uma pessoa singular ou coletiva. A este titular cabe a manutenção dos equipamentos, a criação de procedimentos de utilização e planos de emergência. De modo a combater qualquer tipo de negligência e acidente, a entidade reguladora de proteção radiológica, mais nomeadamente a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), zela pela existência de elevados níveis e padrões de segurança nuclear e proteção radiológica. Por outro lado, cabe à Inspeção Geral da Agricultura, do Mar, do Ambiente e do Ordenamento do Território (IGAMAOT), a inspeção do cumprimento do Decreto-Lei citado.

A utilização de fontes radioativas é um assunto de elevada importância, pelo que, a possibilidade de exposições deve ser evitada segundo o Princípio ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*), isto é, mantida “tão baixa quanto razoavelmente possível”. Este princípio refere que o benefício de uma prática adotada, ou exposição, deve ser sempre superior ao detrimento provocado para os indivíduos expostos ou para a sociedade (Gomes, 2022). Como tal, existem três fatores essenciais a ter em consideração quando são utilizadas fontes radioativas, a saber:

- Tempo de exposição;

- Distância;
- Blindagem.

Tempo de exposição: está diretamente relacionado com a quantidade de radiação recebida e é proporcional à taxa de radiação debitada pela fonte.

Distância: determina a intensidade de radiação recebida. Esta intensidade diminui através do inverso do quadrado da distância à fonte radioativa (Equação (2)).

$$\frac{D_i}{D_f} = \frac{(r_f)^2}{(r_i)^2} \quad (2)$$

Em que:

D_i – Dose inicial;

D_f – Dose final;

r_i – Distância inicial;

r_f – Distância final.

Blindagem: representa todos os obstáculos encontrados entre uma fonte radioativa e uma pessoa, objeto ou ambiente, com o propósito de reduzir a quantidade de radiação recebida.

A utilização de fonte de radiação ionizante deve exclusivamente ser empregue por técnicos e peritos qualificados, de modo a evitar qualquer tipo de acidente. É ainda importante saber que a radiação ionizante pode provocar riscos para a saúde humana. Aliás, uma exposição com níveis excessivos pode causar danos celulares irreversíveis (Gomes, 2022). A Tabela 19, presente no Decreto Regulamentar nº76/2007 de 17 de julho do Ministério do Trabalho e da Solidariedade Social, demonstra as principais doenças provocadas por radiações ionizantes.

Tabela 19 - Principais doenças provocadas por agentes físicos: radiação ionizante, adaptado de Governo (2007)

Fatores de risco	Radiações ionizantes
Doenças ou outras manifestações clínicas e caracterização (prazo indicativo)	Anemia, leucopenia, trombopenia ou diátese hemorrágica consecutivas a irradiação crónica; Radiodermites agudas e radiepitelites agudas das mucosas; Radiodermites crónicas; Radiolesões crónicas das mucosas; Blefarite ou conjuntivite; Queratite; Catarata; Radionecrose óssea; Tumores malignos da pele; Estados leucemóides; Leucemia; Sarcoma ósseo; Carcinoma bronco-pulmonar por inalação.

<p>Lista exemplificativa dos trabalhos suscetíveis de provocar a doença</p>	<p>Todos os trabalhos que impliquem exposição a radiações ionizantes, como por exemplo:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Extração e tratamento de minerais radioativos; - Produção e emprego de substâncias radioativas; - Fabrico de aparelhos produtores de radiações ionizantes e o seu emprego; - Trabalhos com isótopos radioativos, aparelhos geradores de radiações ou outras fontes radioativas; - Trabalhos realizados na proximidade de substâncias radioativas ou fontes emissoras de radiações ionizantes.
--	---

3.5.2. Fontes de radiação utilizadas

A exposição dos provetes foi realizada com três fontes de radiação ionizante diferentes: duas fontes radioativas seladas, mais concretamente de ^{192}Ir e ^{75}Se e um gerador (equipamento) de raios X. Nos subcapítulos que se seguem é feita uma breve descrição dos princípios de funcionamento destes equipamentos.

3.5.2.1. Fontes radioativas seladas

As fontes radioativas utilizadas no âmbito desta dissertação são obtidas a partir de isótopos estáveis (estado fundamental), mais concretamente de ^{191}Ir e ^{74}Se . A passagem de eletrões de uma órbita interna para outra mais externa faz com que o átomo fique no estado excitado, isto é, com excesso de energia (nucleões), o que conduz à formação do ^{192}Ir e ^{75}Se . Estes isótopos tendem a estabilizar-se de forma natural, decaindo em séries radioativas, ou seja, emitindo radiação do tipo gama até encontrarem estabilidade. Este fenómeno pelo qual os isótopos instáveis são capazes de emitir radiações denomina-se por radioatividade (Gomes, 2022).

De notar que uma fonte radioativa não debita, diariamente, a mesma quantidade de radiação, ou seja, a sua atividade diminui. A atividade, segundo o SI, é expressa em becquerel (Bq), sendo usualmente apresentada em curies (Ci). A instabilidade desses isótopos e a sua procura pela estabilidade provoca um decaimento radiativo. As tabelas presentes no Anexo C. e no Anexo D. demonstram o decaimento que cada uma das fontes tem com o passar do tempo, devendo o técnico calcular o tempo de exposição de acordo com a dose que a fonte possui nesse dia. Este declínio pode ser calculado através da lei presente na Equação (3):

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

Onde:

$N(t)$ – Número de isótopos instáveis após um determinado intervalo de tempo, t ;

N_0 – Número inicial de isótopos instáveis;

λ – Constante de decaimento.

Delacroix et al. (2002) tabelaram o tempo necessário para que o número de isótopos instáveis se reduza a metade, isto é, o tempo de meia vida, $t_{1/2}$. A Tabela 20 demonstra o tempo de meia vida de alguns elementos radioativos.

Tabela 20 - Tempo de meia vida e tipo de radiação emitida de certos isótopos

Elemento	$t_{1/2}$	Tipo de radiação emitida
Radão	3,8 dias	α
Iodo	8,0 dias	β, γ
Fósforo	14,3 dias	β
Ferro	44,5 dias	β, γ
Iródio	73,8 dias	β, γ
Selénio	119,8 dias	γ
Cobalto	5,27 anos	β, γ
Césio	30,2 anos	β, γ
Rádio	1600 anos	α, γ
Carbono	5730 anos	β
Urânio	4,47E9 anos	α, γ

Estes isótopos instáveis, ou seja, as fontes radioativas, são depois colocadas em contentores ou equipamentos de gamagrafia industrial e utilizados, principalmente, em ensaios não destrutivos. A Figura 51 demonstra os constituintes e principal mecanismo desse equipamento.

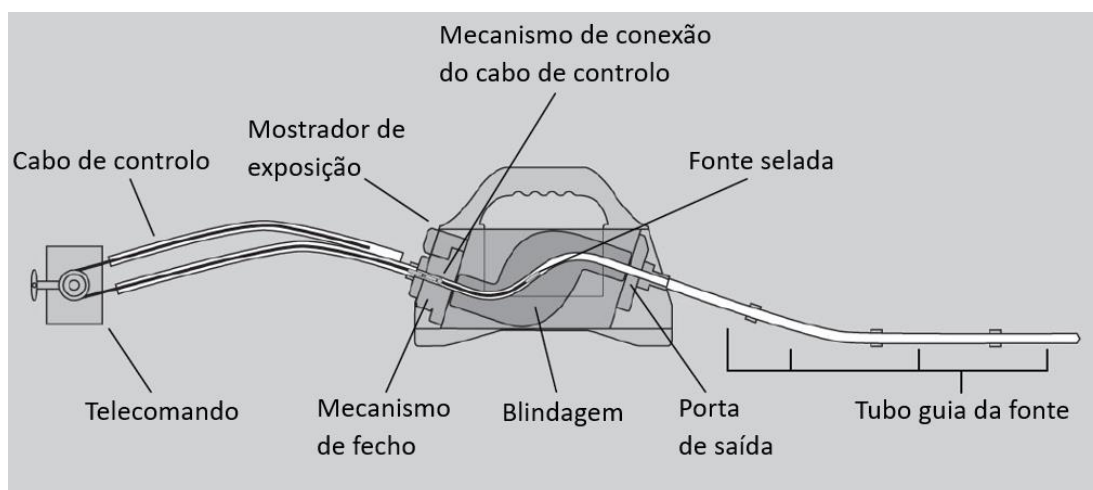


Figura 51 - Constituição de um dispositivo de exposição radiográfica, adaptado de QSA Global (2023)

Todos estes dispositivos possuem mecanismos de segurança que impedem que a fonte selada seja exposta indevidamente. O telecomando ou controlo remoto é constituído por uma roldana conectada a um cabo de aço que transporta a fonte desde o interior do equipamento até à extremidade do tubo guia, dando-se assim a exposição. A recolha da fonte é feita de forma inversa.

Os equipamentos de gamagrafia industrial utilizados nesta dissertação são fabricados pela empresa QSA Global, reconhecida mundialmente por ser especialista no fornecimento de fontes de radiação de alta qualidade e desempenho. Apesar de o mecanismo ser idêntico em todos os equipamentos, cada qual é construído atendendo ao isótopo que irá conter no seu interior, sendo a principal diferença entre ambos a sua blindagem e peso (Tabela 21). Os dispositivos utilizados nesta dissertação pertencem à categoria Delta e estão carregados, cada qual, com um isótopo de ^{192}Ir e ^{75}Se . A Figura 52 ilustra um dos referidos equipamentos.

Tabela 21 - Principais diferenças entre equipamentos de gamagrafia, adaptado de QSA Global (2023)

	SENTINEL 880 Series Delta	SENTINEL 880 Series Elite	SENTINEL 880 Series Omega
^{192}Ir	150 Ci (5,55TBq)	50 Ci (1,85 TBq)	15 Ci (0,55TBq)
^{75}Se	150 Ci (5,55TBq)	150 Ci (5,55TBq)	80 Ci (3,00 TBq)
Peso	23,6 kg	19,0 kg	15,0 kg



Figura 52 - Equipamento SENTINEL 880 Series Delta (QSA Global, 2023)

Além disso, e tal como ilustra a Figura 51, foram também utilizados outros acessórios essenciais para a execução deste trabalho, nomeadamente o telecomando (Figura 53), mangueira ou tubo guia (Figura 54) e colimador (Figura 55). Este último é geralmente fabricado em chumbo, tungsténio ou urânio empobrecido, e tem como principal objetivo direcionar a radiação num determinado sentido, reduzindo a exposição nas restantes zonas.



Figura 53 - Telecomando



Figura 54 - Tubo guia



Figura 55 - Colimador

3.5.2.2. Equipamentos geradores de raios X

A radiação do tipo X é utilizada em muitas indústrias para a deteção de fraturas, doenças e por exemplo objetos. Contrariamente aos dispositivos de raios gama, que estão sempre a debitar radiação, os equipamentos de raios X apenas a emitem quando o botão de acionamento do centro de comando é pressionado. Estes equipamentos possuem, além de muitos outros componentes, um gerador e uma ampola ou díodo de alto vácuo. De uma forma geral, o gerador fornece corrente elétrica capaz de aquecer o filamento do cátodo presente na ampola. Este aquecimento, através do efeito termiônico, provoca a libertação de eletrões para a vizinhança do cátodo. A diferença de potencial gerada entre o cátodo e o ânodo faz com que os eletrões emitidos acelerem, a grandes

velocidades, contra o alvo de tungstênio. A rápida desaceleração que se verifica na colisão dos eletrões produz os raios X. A Figura 56 demonstra os principais constituintes que originam este tipo de radiação.

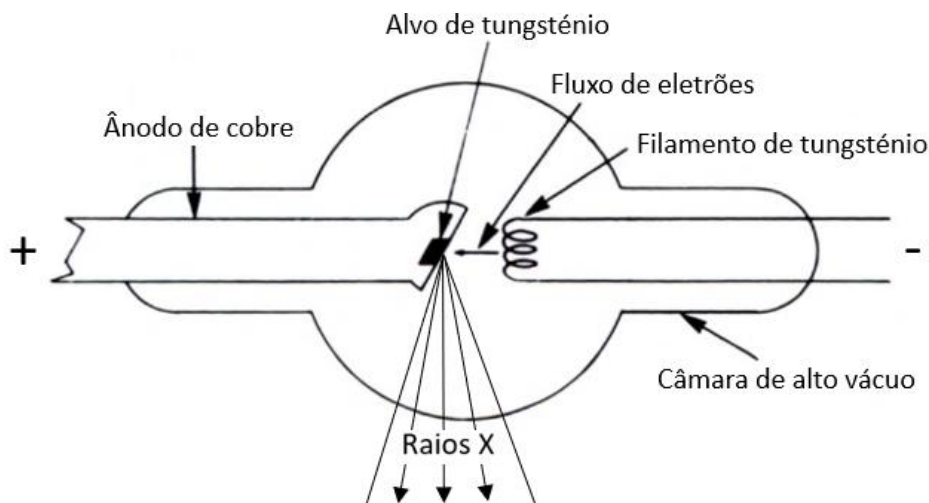


Figura 56 - Principais componentes de uma ampola de raios X, adaptado de Curry III et al. (1990)

O equipamento utilizado na presente dissertação é fabricado por uma empresa líder na conceção e fabrico de tecnologias energéticas, mais concretamente a General Electric. O modelo ERESO 65 MF4 de 300 kV e 3 mm de ponto focal (área da superfície do ânodo que recebe o feixe de eletrões) distingue-se pela sua fiabilidade. Além disso o facto de ser facilmente transportado permite a sua utilização em diferentes campos, cenários e condições ambientais difíceis (General Electric, 2023). A Figura 57 ilustra esta máquina de raios X e respetivos complementos, isto é, os cabos e o centro de comando.



Figura 57 – Gerador de raios X ERESO 65 MF 4 (General Electric, 2023)

3.5.3. Exposição dos provetes a radiação ionizante

Os provetes de ambos os adesivos foram submetidos a diferentes níveis e períodos de radiação, de acordo com o Plano de Intervenções presente na Tabela 15. A diferença dos tempos de irradiação pode provocar diferentes efeitos ou alterações nos provetes, sendo necessário realizar cada ensaio

de forma individual. A fonte de ^{75}Se foi a primeira a ser utilizada, embora o procedimento de preparação, exposição e recolha dos provetes tenha sido similar para ambas as fontes de radiação do tipo gama. A preparação dos provetes para irradiação por raios do tipo X seguiu contornos distintos, porém mais simples, que são explicados de seguida.

3.5.3.1. Fontes radioativas seladas

Num primeiro momento, os provetes foram colocados numa placa de esferovite (Figura 58) de modo a se encontrarem todos à mesma distância, e por conseguinte, obterem as mesmas dosagens. De modo a facilitar o cálculo da dosagem final, os provetes foram colocados a um metro de distância de cada uma das fontes de radiação ionizante.



Figura 58 - Fixação dos provetes em esferovite

De seguida, as amostras foram colocadas e posicionadas à distância referida dentro do *bunker* para assim evitar que qualquer pessoa fosse exposta à radiação do tipo gama emitida por esses isótopos. A Figura 59 e a Figura 60 ilustram a montagem e preparação dos provetes dentro do *bunker* para serem expostas à radiação emitida pelas fontes de ^{75}Se e ^{192}Ir , respetivamente.



Figura 59 - Montagem da fonte de selênio para irradiação dos provetes

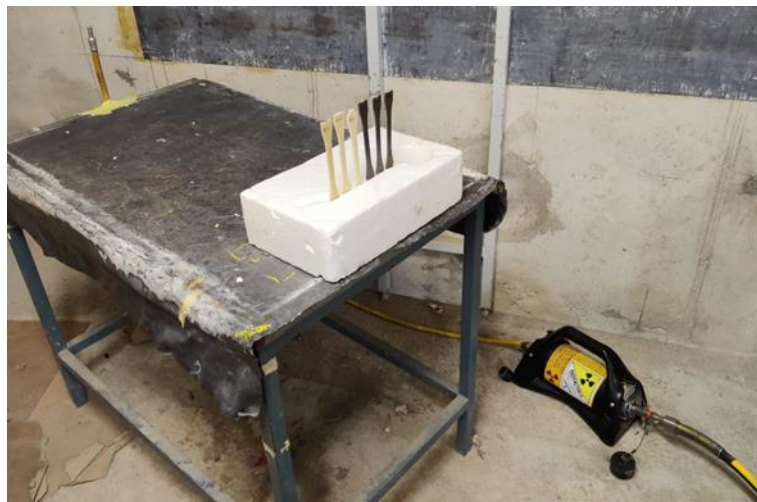


Figura 60 - Montagem da fonte de irídio para irradiação dos provetes

A fonte selada, tal como foi referido, é enviada para a extremidade do tubo guia (também designada por ponteira) pelo telecomando através de um acionamento mecânico e daí é emitida radiação para todas as direções, isto é, em 360°. De modo a transformar o feixe de radiação panorâmico num feixe direcional no sentido dos provetes, foi colocado um colimador de tungsténio nessa mesma extremidade, tal como demonstra a Figura 61.



Figura 61 - Colocação de um colimador na ponteira do tubo guia

Decorrido o tempo de exposição programado, o isótopo radioativo retorna ao contentor de transporte, sendo transportado pelo telecomando no sentido oposto ao executado primeiramente para que a fonte seja armazenada em segurança. Logo depois do isótopo entrar no contentor, é acionado um mecanismo de segurança que emite um sinal sonoro de forma a alertar que é seguro entrar no *bunker*. Antes disso, e de forma a evitar qualquer exposição indevida, é necessário verificar o valor de dose que se encontra no detetor de radiações presente nas instalações de forma a confirmar que é seguro entrar no *bunker* onde decorrem os ensaios e recolher ou colocar novos provetes.

3.5.3.2. Equipamento gerador de raios X ERESKO 65 MF 4

A exposição dos provetes com esta fonte de radiação ionizante realizou-se de forma semelhante à anterior. No entanto, como o gerador de raios X é normalmente utilizado pela empresa a um metro

de distância da mesa de trabalho por meio de um suporte fixo na parede do *bunker* (Figura 62), os provetes foram colocados sobre a mesma e expostos a este tipo de radiação.



Figura 62 - Preparação dos provetes e gerador de raios X

O gerador de raios X, cujo foco possui um ângulo de abertura de 60° em todas as direções, dispõe de um laser de modo a centrar o equipamento (ou peças) na sua direção focal, conforme é possível constatar na Figura 63. Assim, colocaram-se os provetes, igualmente espaçados, em torno desse ponto de modo a adquirirem a mesma dosagem.



Figura 63 - Posicionamento dos provetes de acordo com o laser do gerador de raios X

O processo de exposição das fontes seladas não envolve qualquer sistema operativo. Porém o mesmo não acontece com geradores de raios X, uma vez que o centro de comando, que é responsável pelo acionamento do equipamento, possui um *software* onde são introduzidos os parâmetros necessários para a exposição (Figura 64). Esses parâmetros são: tensão (kV), corrente (A) e tempo, podendo ser selecionados manualmente ou pelo próprio *software* atendendo à espessura da peça e distância a que se encontra do gerador de raios X.

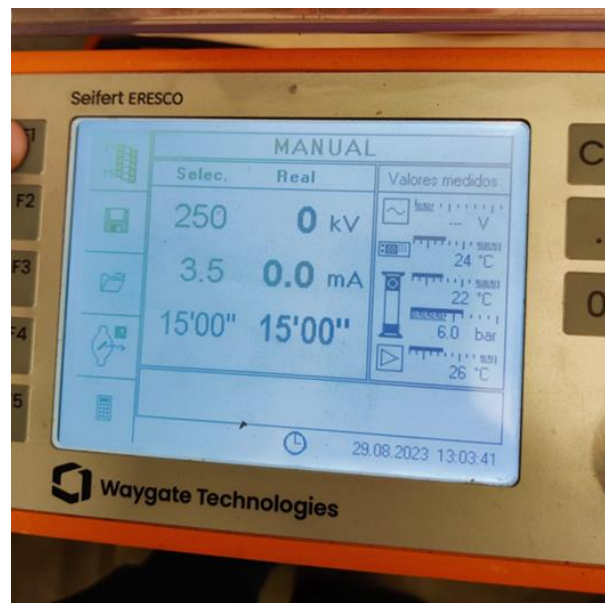


Figura 64 - Parâmetros utilizados para exposição dos provetes a radiação do tipo X

O próprio centro de comando está equipado com um sinal sonoro de aviso de início e fim de exposição, pelo que, quando este sinal é ativado é permitido entrar no *bunker*, retirar os provetes já expostos e colocar outros alterando o parâmetro referente ao tempo.

3.5.4. Cálculo das dosagens obtidas

De modo a calcular as doses de radiação a que cada provete foi submetido torna-se necessário conhecer qual o débito de dose de cada fonte, isto é, a radiação que cada uma das fontes radioativas emite por hora. A Equação (4) relaciona os parâmetros que permitem calcular essa taxa.

$$\dot{D} = \frac{A \times \Gamma \times \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{HVL}}}{d^2}, \quad (4)$$

em que:

\dot{D} – Débito de dose [mSv/h];

A – Atividade da fonte [Ci];

Γ – Constante específica do radionuclídeo [mSv/MBq.h];

x – Espessura da blindagem [mm];

HVL – Espessura da blindagem para que a intensidade de radiação se reduza a metade [mm];

d – Distância da fonte ao objeto [m].

Uma vez que não existiu qualquer tipo de blindagem entre os provetes e a fonte emissora de radiação, a equação pode ser simplificada e reescrita (Equação (5)). Atendendo ao decaimento diário de cada uma das fontes, e de modo a simplificar este cálculo, foi feita a média dos valores tabelados correspondentes aos dias que as mesmas estiveram a expor. Tendo como exemplo as exposições de cento e vinte horas com a fonte de ^{192}Ir , foi calculada a média de cinco valores de atividade distintos, referentes aos cinco dias de exposição, uma vez que por cada dia a fonte tem

um decaimento, e por conseguinte, valores distintos de atividade. A Tabela 22 resume as constantes específicas de certos radionuclídeos.

$$\dot{D} = \frac{A \times \Gamma}{d^2} \quad (5)$$

Tabela 22 - Constantes específicas de radionuclídeos, adaptado de Delacroix et al. (2002)

Elemento	Constante específica, Γ a 1 metro [mSv/MBq.h]
¹³⁷ Cs (Césio-137)	9,63 x 10 ⁻⁵
⁶⁰ Co (Cobalto-60)	3,47 x 10 ⁻⁴
¹⁹² Ir (Iridio-192)	1,39 x 10 ⁻⁴
²²⁶ Ra (Rádio-226)	1,17 x 10 ⁻⁶
⁷⁵ Se (Selênio-75)	6,66 x 10 ⁻⁵

A dosagem dos provetes, D, é finalmente obtida multiplicando \dot{D} pelo número de horas de exposição à radiação ionizante, t. A Equação (6) é aplicável a fontes de radiação radioativas e a geradores de raios X, caso se conheça o débito de dose do mesmo.

$$D = \dot{D} \times t, \quad (6)$$

3.5.4.1. Provetes irradiados com raios gama

As doses absorvidas pelos provetes, tal como foi referido, são diretamente proporcionais ao tempo de exposição à fonte radioativa. Como tal, atendendo ao número de horas estabelecido a que os provetes estiveram submetidos à radiação do tipo gama e à atividade, A, que as fontes apresentavam à data, foi possível obter os valores de dose presentes na Tabela 23. Os cálculos efetuados incluem os fatores de conversão de unidades necessários.

Tabela 23 - Dosagens absorvidas pelos provetes submetidos às radiações do tipo gama das fontes de Ir¹⁹² e Se⁷⁵

Fonte	Dias de exposição	Atividade média [Ci]	Constante específica do radionuclídeo [mSv/MBq.h]	Número de horas de exposição [h]	Débito de dose [mSv/h]	Dose absorvida [Gy]
Ir ¹⁹²	11 e 12 de agosto	35,55	1,39 x 10 ⁻⁴	30	182,83	5,49
	18 a 21 de agosto	32,98		60	169,59	10,18
	11 a 15 de agosto	35,06		90	180,31	16,23
	11 a 16 de agosto	34,90		120	179,49	21,54
Se ⁷⁵	20 e 21 de julho	64,15	6,66 x 10 ⁻⁵	30	158,08	4,74
	4 a 7 de agosto	58,50		60	144,16	8,65
	20 a 24 de julho	63,60		90	156,72	14,11
	20 a 25 de julho	63,42		120	156,27	18,75

3.5.4.2. Provetes irradiados com raios X

O débito de dose do gerador de raios X foi calculado no âmbito de uma auditoria realizada às instalações da empresa QTEC – TÜV Áustria Ibéria, no dia catorze de junho do presente ano, mais concretamente ao *bunker* onde são realizados os ensaios com radiação ionizante. No relatório realizado pela autoridade reconhecida pela APA, neste caso a Stericycle Portugal, são apresentados os valores de débito de dose, a um metro, dos geradores de raios X pertencentes à QTEC – TÜV Áustria Ibéria. Para efeitos de sigilo profissional apenas são revelados os valores auditados (Tabela 24), não sendo possível anexar esse documento.

Tabela 24 – Valores de \dot{D} para os geradores de raios X a 1 metro de distância, adaptado de Stericycle Portugal (2023)

Equipamento	Tensão da ampola [kV]	Corrente [mA]	Débito de dose [mSv/h]
ERESCO 42 MF4	200	4,5	56,2
ERESCO 65 MF4	300	3	71,4

Uma vez que os parâmetros utilizados para as exposições dos provetes a este tipo de radiação são diferentes dos valores auditados, foi feita uma interpolação linear entre os dados conhecidos da tensão da ampola e os valores de débito de dose. Através desta análise, para uma tensão de 250 kV, obteve-se um débito de dose de 63,8 mSv/h. A Tabela 25 demonstra, de acordo com o tempo de exposição, as dosagens absorvidas pelos provetes.

Tabela 25 - Dosagens absorvidas pelos provetes submetidos à radiação do tipo X do gerador ERESCO 65 MF4

Gerador	Tensão da ampola [kV]	Corrente [mA]	Tempo de exposição [h]	Débito de dose [mSv/h]	Dose absorvida [Gy]
ERESCO 65 MF4	250	3,5	0,25	63,8	0,01595
			0,5		0,03190
			0,75		0,04785
			1		0,06380

3.5.5. Ensaio de tração

Os ensaios de tração aos provetes de ambos os adesivos foram realizados, à temperatura ambiente, no laboratório de ensaios tecnológicos do departamento de engenharia mecânica, recorrendo à máquina universal de ensaios Shimadzu Autograph AG-X 100 que possui uma célula de carga de 100 kN (Figura 65). O controlo dos parâmetros e registo de dados é efetuado pelo *software* TRAPEZIUM X presente no computador que se encontra conectado ao equipamento de tração. Devido ao elevado número de provetes e de condições, existiu a necessidade de os identificar e separar de forma a facilitar a sua identificação e tratamento após o ensaio. A nomenclatura utilizada segue a seguinte regra: G“L”_”n”, sendo o “L” o lote do provete fabricado e o “n” o seu número identificativo, a Figura 66 ilustra um desses provetes. Além disso e antes de serem tracionados,

foram efetuadas três medições de largura e espessura a cada um dos provetes, com recurso a um paquímetro digital, de modo a calcular a média da secção transversal.

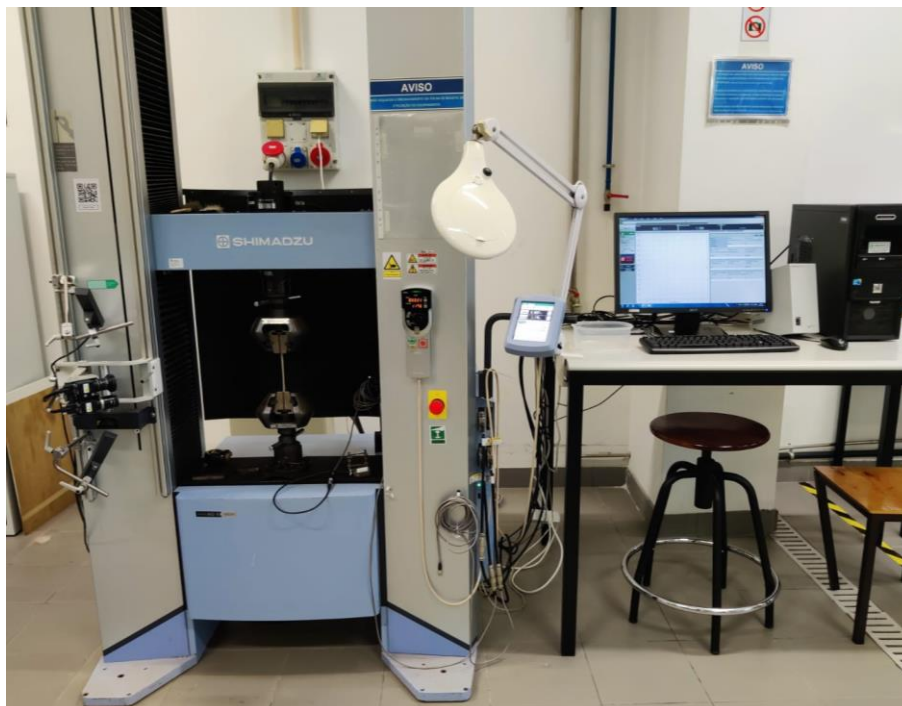


Figura 65 - Máquina universal de ensaios Shimadzu Autograph AG-X 100



Figura 66 - Provetes de adesivo Sikaforce® 7818 L7 do lote 4, número 5

A fixação dos provetes na máquina é feita recorrendo ao aperto manual dos mordentes que o equipamento possui. Estes acessórios evitam o escorregamento dos provetes durante o ensaio, algo que afetaria certas propriedades mecânicas como o deslocamento máximo. Além disso, é necessário garantir o correto posicionamento do provete antes do aperto, bem como o alinhamento e paralelismo entre amarras. A Figura 67 ilustra a fixação de um provete de adesivo Sikaforce® 7818 L7 nos mordentes da máquina.



Figura 67 - Fixação de provete de adesivo Sikaforce® 7818 L7

3.5.5.1. Condições de ensaio

Antes de iniciar o ensaio de tração foi necessário calibrar o equipamento para que este apresentasse um valor de deslocamento igual a zero, caso contrário os resultados seriam incorretos. De seguida, após fixar o provete com recurso aos mordentes e de forma a garantir o alinhamento segundo o eixo de sollicitação foi realizada um pré-carga que não excedia os 10 N. Os ensaios foram efetuados com uma distância entre amarras de 110 mm tendo sido adotada uma velocidade constante de 1 mm/min. A medição das deformações dos provetes deu-se com recurso a um extensómetro mecânico conforme é ilustrado na Figura 68.



Figura 68 – Setup do ensaio de tração a um provete de adesivo Araldite® AV138

3.5.5.2. Medição de deformações

O extensómetro mecânico utilizado (Figura 69) é um aparelho de contacto. A leitura das deformações só é registada quando este se encontra em contacto direto com o corpo de prova. Este é fixo ao provete através de pinças distanciadas entre si pela constante que se denomina como comprimento base (l_e), correspondente a 50 mm. Antes de se iniciar o ensaio, este equipamento deve ser calibrado através do *software* TRAPEZIUM X para que o valor da deformação inicial seja igual a zero. O extensómetro deve ser retirado imediatamente antes de ser atingido o limite elástico do material do provete, de forma a não o danificar. Como tal, deve ser previamente selecionado no *software* o valor do alongamento limite que o aparelho deve ler até ser retirado. Logo depois é efetuado o tratamento de dados com recurso a uma folha de cálculo Excel®, a partir da qual é possível obter informações como o módulo de elasticidade longitudinal, tensão de rotura, tensão limite elástico e alongamento máximo.



Figura 69 - Extensómetro mecânico utilizado

3.6. Análise de resultados

A determinação das propriedades mecânicas dos provetes, à tração, executou-se com base na norma EN ISO 527-2 (2012). Num primeiro momento, realizou-se a conversão dos dados, de formato do tipo “.csv”, fornecidos pelo *software* TRAPEZIUM X, em formato “.xlsx”, de forma a facilitar o tratamento destes mesmos numa folha de cálculo Excel®. A determinação de certas propriedades como o módulo de elasticidade longitudinal e a tensão máxima tiveram como base a Equação (7) e Equação (8), respetivamente. O módulo de Young é obtido através do declive da reta de proporcionalidade elástica para valores de tensão correspondentes a deformações a 0,05% e 0,25%.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (7)$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A} \quad (8)$$

Onde:

E – Módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de Young;

$\Delta\sigma$ – Variação de tensão;

$\Delta\varepsilon$ – Variação de deformação;

$\sigma_{\text{máx}}$ – Tensão máxima;

$F_{\text{máx}}$ – Força máxima aplicada;

A – Área da secção transversal.

A tensão de limite elástico é obtida através da interseção de uma reta paralela à curva de proporcionalidade, para uma deformação de 0,2%, obtendo-se o valor da tensão de limite elástico, $R_{p0,2}$. A Figura 70, correspondente ao provete G4_5 de adesivo Sikaforce® 7818 L7 irradiado com sessenta minutos de raios X, ilustra a obtenção dessa propriedade.

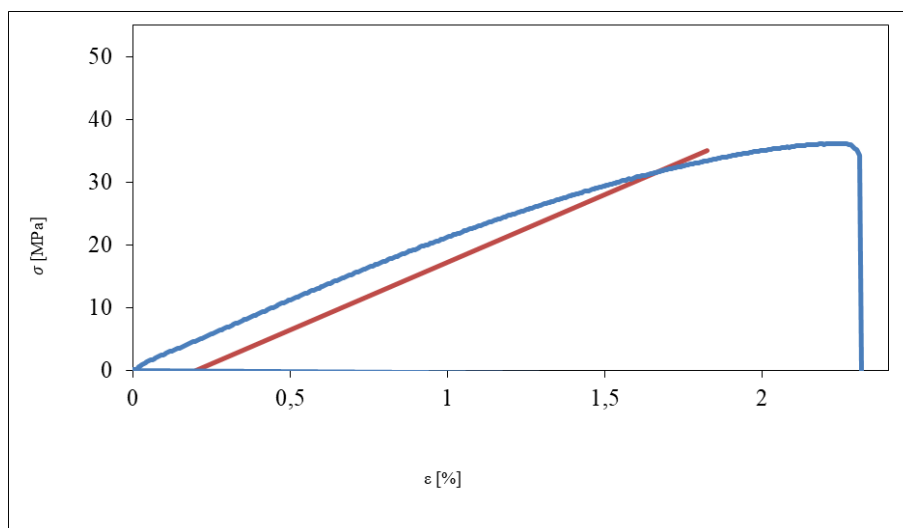


Figura 70 - Tensão limite elástico do provete G4_5 de adesivo Sikaforce® 7818 L7, irradiado com raios X durante 60 minutos

3.6.1. Análise da superfície de rotura

Num primeiro momento, após terem sido realizados todos os ensaios de tração aos provetes, e de modo a otimizar a tensão máxima, foi calculada a área total dos defeitos presentes na secção transversal dos provetes. Esta medição foi executada no laboratório de metalografia do ISEP recorrendo a um microscópio estereoscópio Olympus SZ-PT (Figura 71). As leituras foram efetuadas através do *software* NIS - Elements presente no computador que estava diretamente conectado ao microscópio.

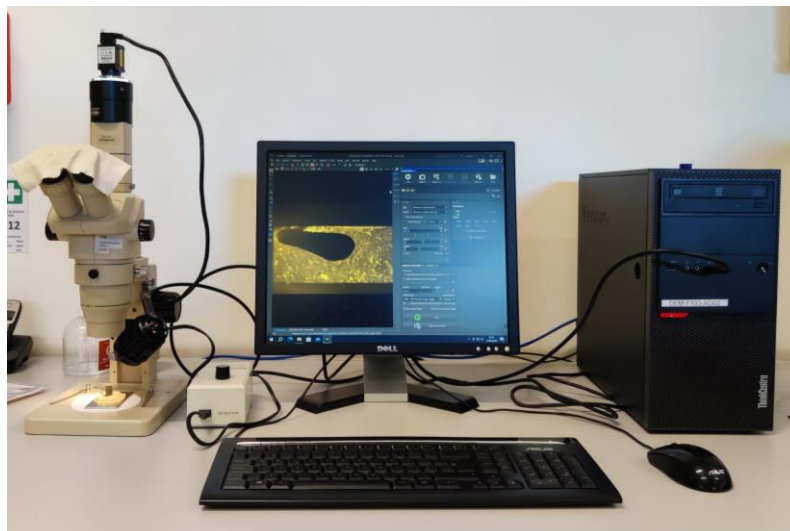


Figura 71 - Microscópio estereoscópio Olympus SZ-PT

A Figura 72 e a Figura 73 ilustram os defeitos presentes na superfície de rotura do provete G3_1 de adesivo Araldite® AV138 e a respetiva medição da área total desses defeitos. O *software* apenas fazia a leitura em pixel, pelo que foi necessário fazer a conversão para milímetros. Com recurso a um paquímetro foi feita a medição da espessura de cada provete na zona da rotura e através de uma folha de cálculo, foi feita a correlação entre essa medida e a leitura da espessura do provete pelo software (Tabela 26), para uma ampliação da lente de 2,5x.

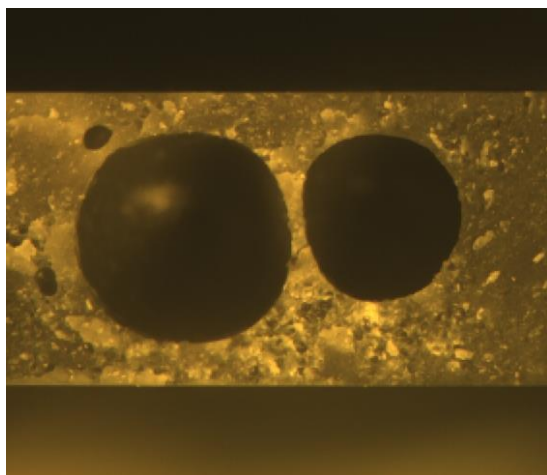


Figura 72 - Defeitos presentes na secção transversal de rotura do provete G3_1 de adesivo Araldite® AV138

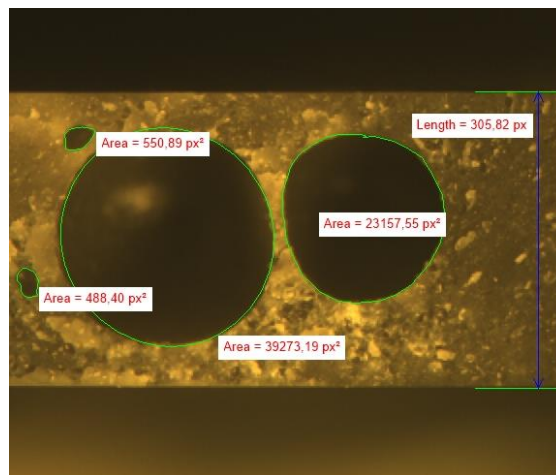


Figura 73 - Medição da área total dos defeitos

Tabela 26 - Conversão de pixel para milímetro, para uma ampliação da lente da lupa de 2,5x

	Largura	Fator de conversão	Área do defeito [mm ²]
Medição em pixel	305,82		
Medição em mm	2,06	148,46	2,88
Área obtida [px ²]	63470,03		

A área real da secção transversal do provete foi calculada subtraindo a área total inicial, que corresponde à multiplicação da largura do provete pela sua espessura, à área dos defeitos. Deste modo, é possível obter o valor correto da tensão máxima.

3.6.2. Curvas σ - ϵ

3.6.2.1. Araldite® AV138

A partir do tratamento dos dados fornecidos pelo *software* TRAPEZIUM X foi possível traçar as curvas características de cada um dos provetes de adesivo Araldite® AV138, para cada uma das condições, isto é, para os diferentes tempos e fontes de radiação. Além disso, foi possível comparar os resultados obtidos entre os provetes irradiados e os provetes que serviram de referência.

A Figura 74 ilustra as curvas σ - ϵ dos provetes de referência e dos provetes submetidos a radiação ionizante do tipo X. Note-se que não existe uma grande dispersão de resultados relativamente à tensão máxima e à deformação entre todas as condições.

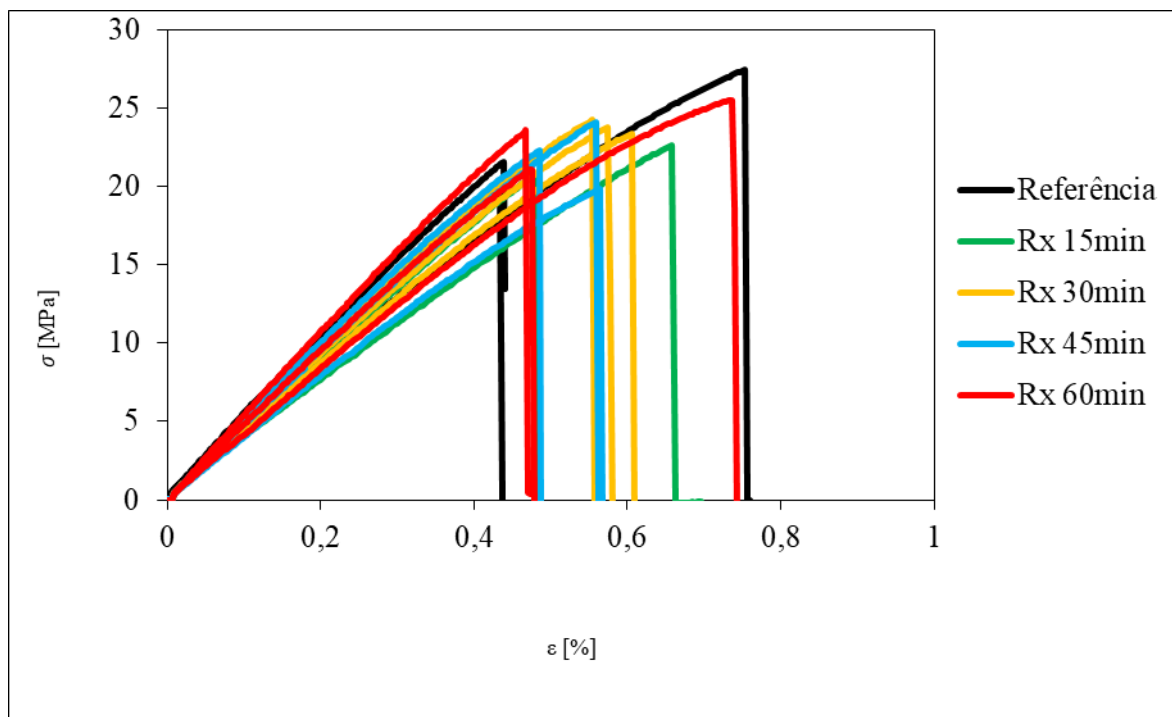


Figura 74 - Curvas σ - ϵ dos provetes de referência e dos provetes submetidos a raios X

Este adesivo foi também submetido à radiação gama de uma fonte de ^{192}Ir , que possui uma constante específica do radionuclídeo superior ao isótopo ^{75}Se , ou seja, tem um poder de penetração superior. De facto, segundo a Figura 75 é possível verificar que, apesar de a tensão máxima não variar significativamente, o adesivo apresenta uma deformação maior.

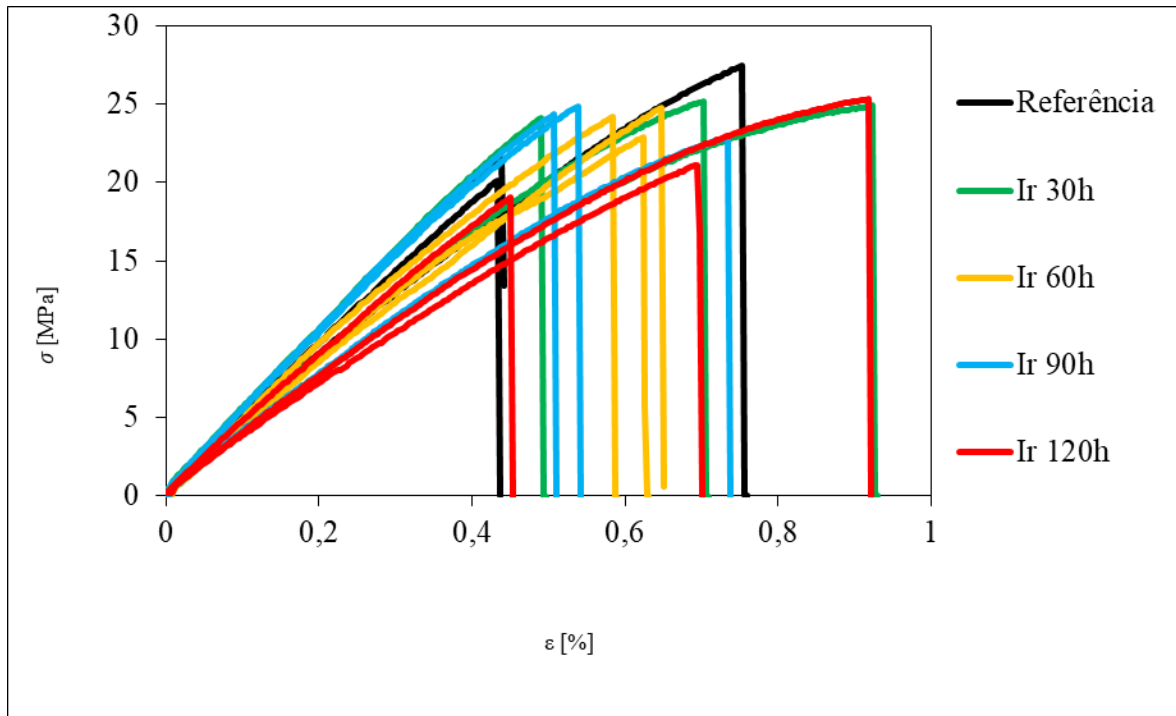


Figura 75 - Curvas σ - ϵ dos provetes de referência e dos provetes submetidos a raios gama ^{192}Ir

A Figura 76 compara as curvas entre os provetes de referência e os provetes irradiados com raios do tipo gama provenientes do isótopo ^{75}Se . Verifica-se, uma vez mais, que não existiu uma grande dispersão dos resultados relativamente à tensão máxima, no entanto, os provetes irradiados durante trinta horas apresentam uma deformação menor aos valores de referência, apresentando uma maior tendência de fragilidade. O provete G2_5, submetido a trinta horas da fonte referida, foi considerado inválido por possuir muitos vazios ao longo de toda a sua extensão, comprometendo as suas propriedades mecânicas.

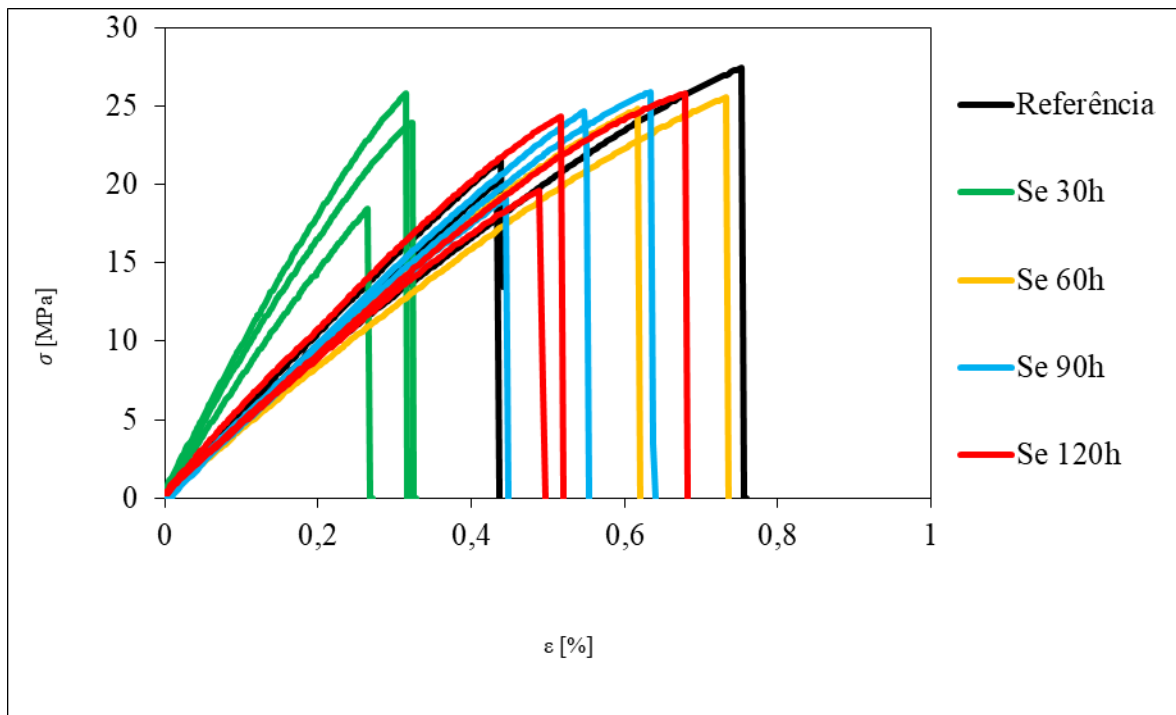


Figura 76 - Curvas σ - ϵ dos provetes de referência e dos provetes submetidos a radiação gama da fonte ^{75}Se

3.6.2.2. Sikaforce® 7818 L7

Os dados referentes ao adesivo Sikaforce® 7818 L7 foram tratados para as mesmas condições de tempo e fontes de exposição. Apesar da fácil aplicação do adesivo ao molde existiram provetes que foram considerados inválidos devido à grande diferença das suas propriedades mecânicas com os restantes adesivos.

O provete G4_2 foi submetido aos raios tipo X durante quarenta e cinco minutos, no entanto, apesar de este adesivo ser mais dúctil, exibiu uma flexibilidade e alongamento excessivos, pelo que foi considerado inválido.

No ensaio de tração do provete G2_4, irradiado com raios gama de ^{75}Se durante trinta horas, a rotura iniciou-se numa das extremidades laterais e a fenda propagou-se até à rotura total do mesmo. Por esse motivo, e por o valor da tensão máxima se situar na ordem dos 20 MPa, considerou-se o provete como inválido.

O provete G3_6, irradiado com raios gama de ^{192}Ir durante trinta horas, apresentou deformações demasiado elevadas e tensões máximas na ordem dos 15 MPa, cerca de metade dos restantes provetes. Para além deste, o provete G3_1 apresentava uma coloração diferente dos demais (Figura 78), mesmo antes da exposição, demonstrando uma tensão máxima inferior a 10 MPa, pelo que foram ambos considerados inválidos.

A Figura 77 demonstra as diferenças existentes entre os provetes de referência e os provetes que não cumpriram com as especificações usuais.

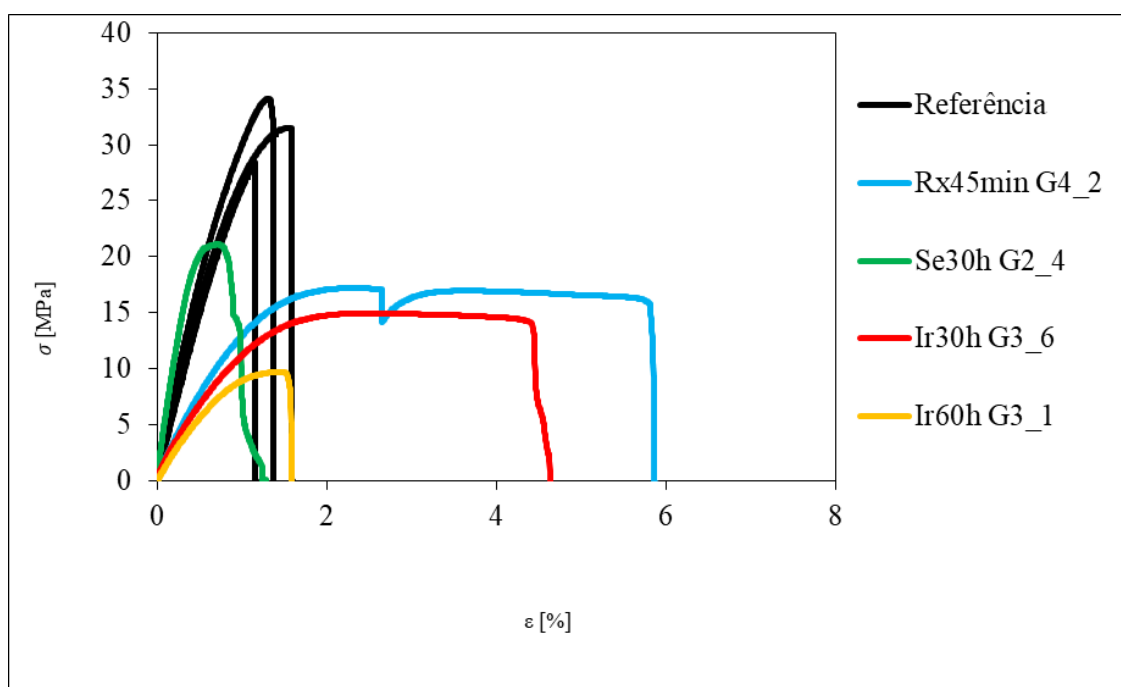


Figura 77 - Comparação das curvas σ - ϵ dos provetes de referência e os provetes inválidos



Figura 78 - Provete G3_1 de adesivo Sikaforce® 7818 L7 dado como inválido

Os provetes deste adesivo que foram submetidos a raios X não apresentaram, durante os diferentes períodos, uma grande dispersão de resultados relativamente à sua tensão máxima, apesar do seu alongamento variar significativamente (Figura 79).

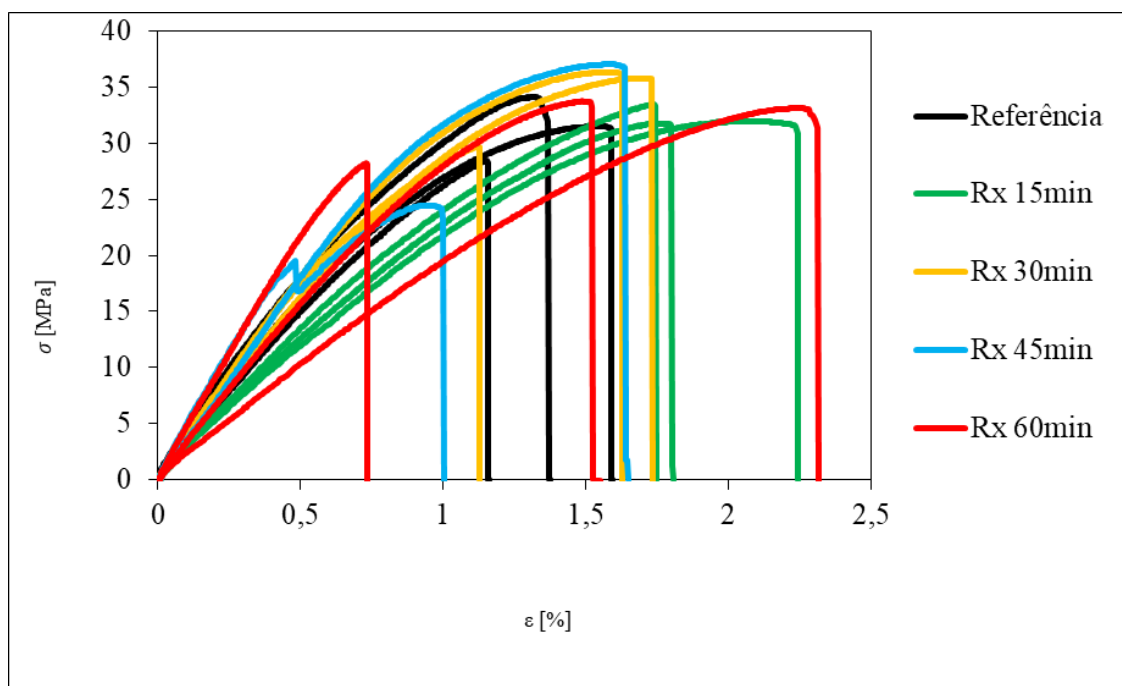


Figura 79 - Curvas σ - ϵ dos provetes de adesivo Sikaforce® 7818 L7 de referência e dos provetes submetidos a raios X

De acordo com a Figura 80, independentemente do tempo a que os provetes foram irradiados com a fonte de ^{192}Ir , não ocorreu uma grande variação dos resultados. Para um período de noventa horas verificou-se uma diminuição da deformação de rotura de dois dos provetes.

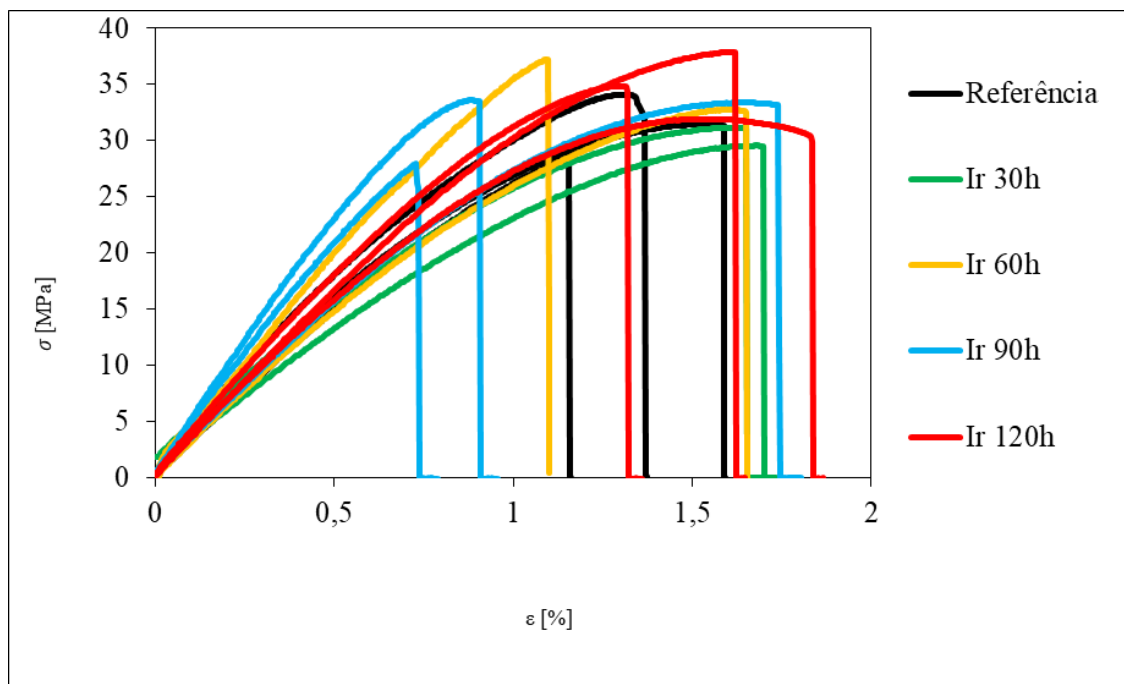


Figura 80 - Curvas σ - ϵ dos provetes de adesivo Sikaforce® 7818 L7 de referência e dos provetes submetidos a raios gama da fonte ^{192}Ir

Apesar de a fonte de ^{75}Se possuir um maior poder de penetração que os raios X, os provetes submetidos a essa fonte de radiação gama não apresentaram uma dispersão assinalável de resultados para a tensão máxima (Figura 81.) No entanto, existe uma tendência crescente relativamente ao seu alongamento e, por conseguinte, da deformação para cento e vinte horas. De forma contrária, para trinta e noventa horas, ocorreu uma diminuição da sua deformação para a quase totalidade dos provetes testados.

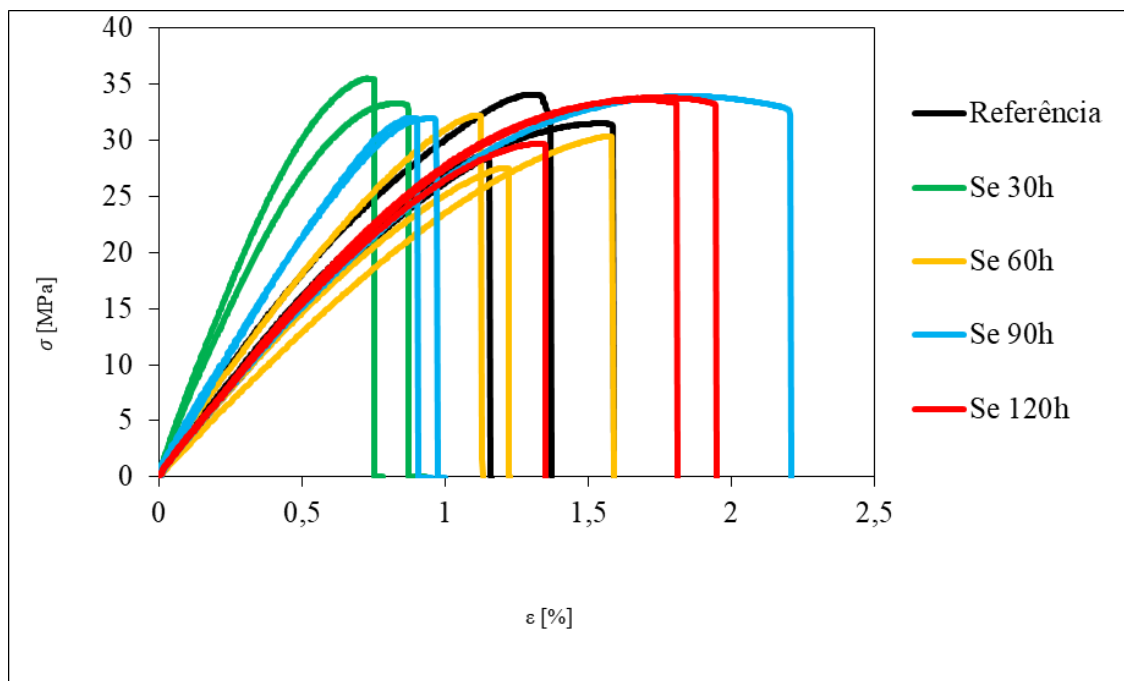


Figura 81 – Curvas σ - ϵ dos provetes de adesivo Sikaforce® 7818 L7 de referência e dos provetes submetidos a raios gama da fonte ^{75}Se

3.6.3. Propriedades mecânicas

Os ensaios de tração permitiram obter as propriedades mecânicas de cada um dos provetes, tendo estas propriedades sido calculadas e agrupadas de acordo com as suas condições de exposição.

3.6.3.1. Araldite® AV138

A Tabela 27 demonstra as propriedades mecânicas obtidas pelo ensaio de tração dos provetes de referência do adesivo Araldite® AV138. Por se tratar de um adesivo frágil não foi possível obter o valor da tensão limite elástico. Estes dados permitem auferir que o módulo de elasticidade longitudinal se encontra dentro dos valores tabelados pelo fabricante, tendo-se verificado, aliás, uma elevada repetibilidade de acordo com o seu coeficiente de variação (CoV), que é cerca de 5%. No entanto, a tensão máxima é bastante inferior à tabelada pelo fabricante. Isto pode dever-se, essencialmente, aos vazios e inclusões de ar presentes nos provetes, que diminuem a resistência do adesivo devido à sua área e volume. O provete G3_3 apresentava apenas um vazio de pequenas dimensões na sua secção transversal, contrariamente aos restantes provetes, tendo o seu deslocamento e alongamento máximo sido superiores, o que indica que esses defeitos podem ter influenciado os resultados obtidos.

Tabela 27 - Propriedades mecânicas dos provetes de referência do adesivo Araldite® AV138

Provete	Força máxima [N]	Desloc. Máximo [mm]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	Tensão máxima [MPa]	Along. Máximo [%]	Módulo de Young [MPa]
G3_3	534,1	0,949	-	27,43	0,760	4672,9
G5_6	357,3	0,633	-	21,54	0,447	5114,2
G7_2	380,8	0,574	-	20,15	0,437	4723,4
Média	424,1	0,719	-	23,04	0,548	4836,8
Desvio Padrão	96,0	0,202	-	3,87	0,184	241,6
CoV	23%	28%	-	17%	34%	5%

Raios X

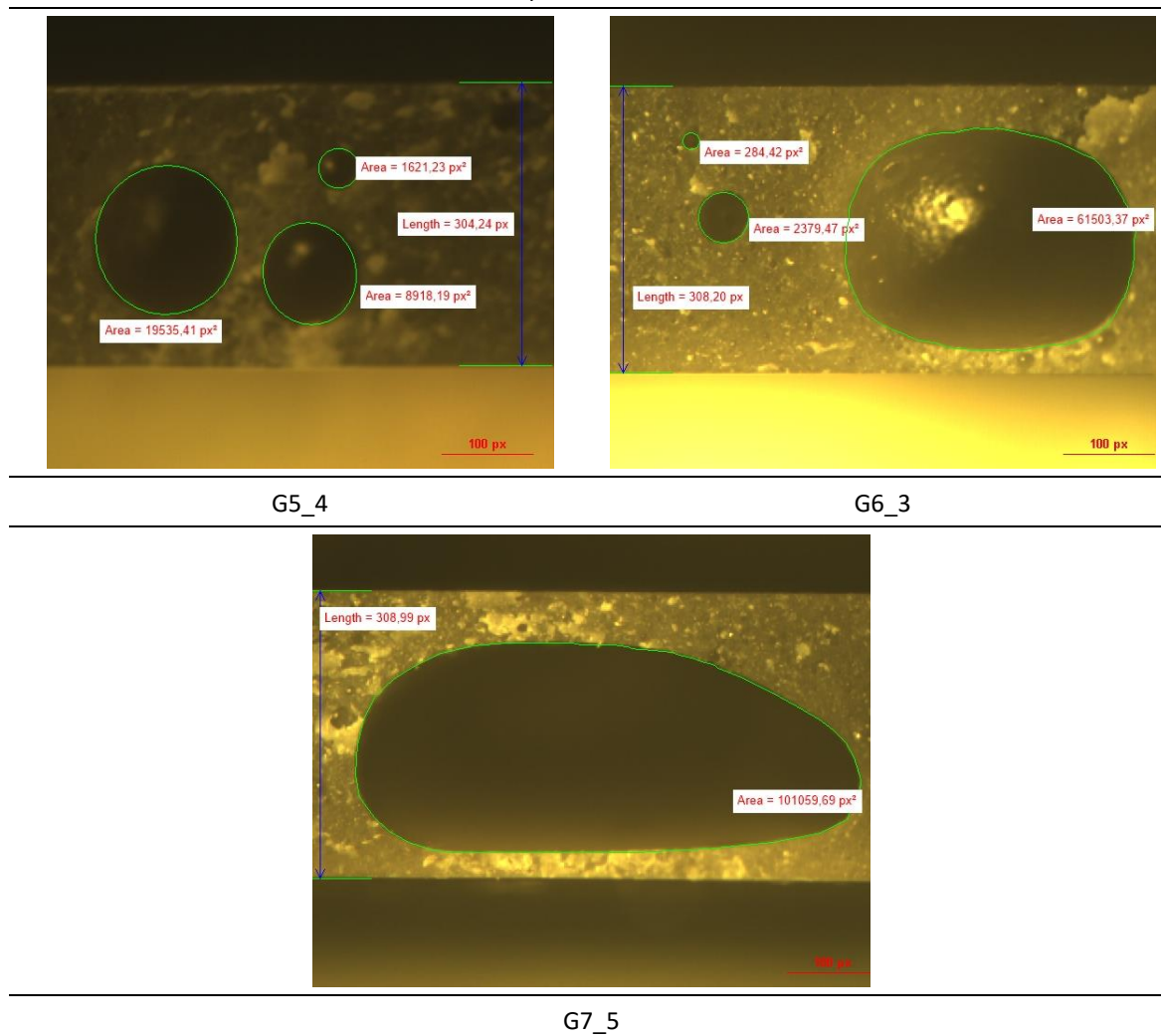
As propriedades mecânicas dos provetes submetidos a radiação ionizante do tipo X encontram-se demonstradas na Tabela 28. Para os provetes submetidos a um período de quinze minutos verificou-se uma diminuição do módulo de elasticidade longitudinal. A tensão máxima para este conjunto de provetes manteve-se praticamente inalterada. No entanto, o provete G1_3, apresentou uma área da secção transversal praticamente livre de qualquer imperfeição o que pode ter promovido a um aumento do deslocamento e alongamento máximo relativamente aos provetes G2_1 e G7_4. Os provetes irradiados durante trinta minutos e quarenta e cinco minutos não apresentaram uma grande dispersão dos resultados obtidos, tendo o CoV, para todas as propriedades, sido inferior ou igual a 10% o que se traduz numa baixa variação. O provete G5_4, irradiado durante um período igual a sessenta minutos seguiu contornos semelhantes aos anteriormente descritos relativamente à sua área da secção transversal. A Tabela 29 comprova que

a área do vazio deste provete é inferior às dos outros provetes desse conjunto, o que poderá ter motivado o aumento do alongamento máximo.

Tabela 28 - Propriedades mecânicas dos provetes do adesivo Araldite® AV138 irradiados com raios X

15min Raios X						
Provete	Força máxima [N]	Desloc. Máximo [mm]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	Tensão máxima [MPa]	Along. Máximo [%]	Módulo de Young [MPa]
G1_3	478,9	1,283	21,04	21,67	0,970	3046,6
G2_1	405,5	0,784	-	22,59	0,697	3621,7
G7_4	352,2	0,625	-	20,82	0,514	3760,9
Média	412,2	0,897	-	21,69	0,727	3476,4
Desvio Padrão	63,6	0,343	-	0,89	0,230	378,7
CoV	15%	38%	-	4%	32%	11%
30min Raios X						
G2_4	402,1	0,708	-	23,75	0,581	4568,4
G4_3	435,5	0,774	-	23,34	0,609	4273,1
G5_2	428,3	0,729	-	24,23	0,557	4827,3
Média	422,0	0,737	-	23,77	0,582	4556,2
Desvio Padrão	17,5	0,034	-	0,44	0,026	277,3
CoV	4%	5%	-	2%	4%	6%
45min Raios X						
G4_4	418,7	0,750	-	24,06	0,586	4631,4
G5_3	393,8	0,759	-	19,80	0,594	4455,5
G7_6	403,0	0,671	-	22,29	0,495	4940,7
Média	405,1	0,727	-	22,05	0,558	4675,9
Desvio Padrão	12,59	0,049	-	2,14	0,055	245,6
CoV	3%	7%	-	10%	10%	5%
60min Raios X						
G5_4	498,8	0,923	-	25,49	0,762	4131,6
G6_3	392,5	0,708	-	21,09	0,535	4664,2
G7_5	395,8	0,679	-	23,56	0,479	4637,8
Média	429,0	0,770	-	23,38	0,592	4477,9
Desvio Padrão	60,43	0,133	-	2,204	0,150	300,2
CoV	14%	17%	-	9%	25%	7%

Tabela 29 - Área dos defeitos dos provetes submetidos a raios X durante 60min



Raios gama – ^{192}Ir

Após exposição dos provetes a radiação ionizante do tipo gama com o isótopo de ^{192}Ir verificou-se uma baixa variação dos resultados obtidos, nomeadamente em relação ao módulo de elasticidade longitudinal e à tensão máxima, contrariamente ao deslocamento máximo (Tabela 30). Estes valores, tal como já foi referido, são influenciados pela área útil de cada provete. De facto, os provetes G1_1, G3_2, G1_5 e G1_6 destacam-se dos seus pares devido à menor quantidade de defeitos que possuem. Além disso, é importante destacar a existência de $R_{p0,2}$ no provete G1_6, isto é, o provete apresentou ductilidade, apesar de ser um adesivo com características frágeis, quando submetido a cento e vinte horas de radiação gama deste isótopo.

Tabela 30 - Propriedades mecânicas dos provetes do adesivo Araldite® AV138 irradiados com raios gama do isótopo ¹⁹²Ir

30h ¹⁹²Ir						
Proвете	Força máxima [N]	Desloc. Máximo [mm]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	Tensão máxima [MPa]	Along. Máximo [%]	Módulo de Young [MPa]
G1_1	502,5	1,229	-	24,91	0,961	4439,4
G1_2	410,1	0,974	-	25,17	0,751	4134,6
G7_3	392,2	0,634	-	24,13	0,518	5052,5
Média	434,9	0,946	-	24,74	0,743	4542,2
Desvio Padrão	59,2	0,300	-	0,54	0,221	467,5
CoV	14%	32%	-	2%	30%	10%
60h ¹⁹²Ir						
G3_2	485,6	1,058	-	22,90	0,632	4238,7
G5_5	428,8	0,791	-	24,74	0,651	4188,7
G7_1	416,6	0,766	-	24,21	0,591	4673,2
Média	443,6	0,872	-	23,95	0,625	4366,9
Desvio Padrão	36,8	0,162	-	0,95	0,031	266,5
CoV	8%	19%	-	4%	5%	6%
90h ¹⁹²Ir						
G1_5	463,0	0,997	-	22,85	0,758	4414,9
G2_3	424,5	0,778	-	24,84	0,606	5007,4
G4_5	397,1	0,687	-	24,38	0,558	5175,2
Média	428,2	0,820	-	24,02	0,640	4865,9
Desvio Padrão	33,1	0,160	-	1,04	0,105	399,4
CoV	8%	19%	-	4%	16%	8%
120h ¹⁹²Ir						
G1_4	367,0	0,825	-	21,13	0,744	3724,7
G1_6	474,3	1,148	24,98	25,32	0,962	3639,3
G6_2	360,1	0,635	-	19,03	0,508	4219,4
Média	400,4	0,869	24,98	21,83	0,738	3861,1
Desvio Padrão	64,0	0,260	-	3,20	0,227	313,1
CoV	16%	30%	-	15%	31%	8%

Raios gama – ⁷⁵Se

Os provetes submetidos à radiação gama do isótopo de ⁷⁵Se, para um período de irradiação de trinta horas, apresentaram módulos de elasticidade muito elevados comparativamente aos dados

fornecidos pelo fabricante, apesar do CoV reduzido (Tabela 31). Os provetes G4_6, G2_5, G5_1 e G6_5, de cada período de exposição, apresentaram vários vazios ao longo de toda a sua extensão, verificando-se o efeito destas imperfeições nos resultados obtidos, nomeadamente na tensão de rotura e no deslocamento máximo. O provete G2_5 não foi considerado para o cálculo da média e desvio padrão.

Tabela 31 - Propriedades mecânicas dos provetes do adesivo Araldite® AV138 irradiados com raios gama do isótopo ⁷⁵Se

30h ⁷⁵ Se						
Proвете	Força máxima [N]	Desloc. Máximo [mm]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	Tensão máxima [MPa]	Along. Máximo [%]	Módulo de Young [MPa]
G4_2	440,6	0,957	-	23,93	0,400	7620,1
G4_6	354,8	0,751	-	18,46	0,330	6815,1
G6_1	481,0	0,785	-	25,80	0,336	7973,7
Média	425,4	0,831	-	22,73	0,355	7469,7
Desvio Padrão	64,5	0,110	-	3,82	0,040	593,8
CoV	15%	13%	-	17%	11%	8%
60h ⁷⁵ Se						
G2_2	473,5	0,874	-	24,85	0,624	4676,6
G2_5	249,9	0,433	-	16,22	0,299	4512,6
G3_6	483,0	0,929	-	25,54	0,739	4047,6
Média	478,2	0,902	-	25,20	0,682	4362,1
Desvio Padrão	6,7	0,038	-	0,49	0,081	444,8
CoV	1%	4%	-	2%	12%	10%
90h ⁷⁵ Se						
G2_6	431,8	0,727	-	24,65	0,586	4798,3
G3_4	502,7	0,845	-	25,91	0,667	4632,4
G5_1	363,7	0,621	-	19,10	0,489	4439,5
Média	432,7	0,731	-	23,22	0,580	4623,4
Desvio Padrão	69,5	0,112	-	3,62	0,090	179,6
CoV	16%	15%	-	16%	15%	4%
120h ⁷⁵ Se						
G3_1	441,0	0,834	-	24,35	0,560	5051,0
G4_1	470,6	0,872	-	25,79	0,701	4418,7
G6_5	390,9	0,649	-	19,62	0,538	4209,0
Média	434,2	0,785	-	23,25	0,600	4559,6
Desvio Padrão	40,3	0,119	-	3,22	0,087	438,4
CoV	9%	15%	-	14%	15%	10%

3.6.3.2. Sikaforce® 7818 L7

A Tabela 32 demonstra as propriedades obtidas a partir dos ensaios de tração realizados aos provetes de referência do adesivo Sikaforce® 7818 L7. De acordo com os resultados obtidos é possível notar a baixa variação do módulo de elasticidade longitudinal e da tensão máxima, valores estes que se encontram ligeiramente diferentes dos tabelados pelo fabricante. A existência de vazios de grandes dimensões teve influência no deslocamento e alongamento máximo, que se encontram abaixo dos tabelados em cerca de 45%, como detalhado posteriormente.

Tabela 32 - Propriedades mecânicas dos provetes de referência do adesivo Sikaforce® 7818 L7

Provete	Força máxima [N]	Desloc. Máximo [mm]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	Tensão máxima [MPa]	Along. Máximo [%]	Módulo de Young [MPa]
G1_5	483,0	1,454	28,15	28,41	1,163	3048,0
G4_1	687,7	2,666	28,04	31,50	1,593	3195,3
G6_3	519,4	1,924	30,32	34,08	1,374	3404,7
Média	563,4	2,015	28,84	31,33	1,377	3216,0
Desvio Padrão	109,2	0,611	1,28	2,84	0,215	179,2
CoV	19%	30%	4%	9%	16%	6%

A generalidade das propriedades dos provetes deste adesivo, que foram irradiados com raios do tipo X, não exibiram uma grande variação dos resultados. Apesar disso, verificou-se um aumento do módulo de elasticidade longitudinal a partir dos trinta minutos de exposição (Tabela 33). O provete G6_6 apresentou vazios de grandes dimensões em toda a sua extensão e na sua secção transversal na rotura, motivo pelo qual os resultados se encontram abaixo do esperado. Note-se que o provete G4_2 foi dado como inválido devido à elevada flexibilidade e alongamento demonstrados ao longo do ensaio de tração, valores estes que não foram considerados para o cálculo da média, desvio padrão e CoV daquele conjunto.

Tabela 33 - Propriedades mecânicas dos provetes do adesivo Sikaforce® 7818 L7 irradiados com raios X

15min Raios X						
Provete	Força máxima [N]	Desloc. Máximo [mm]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	Tensão máxima [MPa]	Along. Máximo [%]	Módulo de Young [MPa]
G2_1	562,4	2,390	26,40	31,96	2,347	2419,4
G3_4	637,9	2,498	23,41	31,77	1,880	2810,8
G7_5	656,4	1,935	26,33	33,44	1,776	2743,3
Média	618,9	2,274	25,38	32,39	2,001	2657,9
Desvio Padrão	49,8	0,299	1,71	0,91	0,304	209,2
CoV	8%	13%	7%	3%	15%	8%

30min Raios X						
G2_5	549,4	1,758	28,37	29,65	1,130	3513,4
G4_3	733,0	2,434	32,51	36,32	1,656	3651,5
G5_3	695,4	2,244	31,61	35,77	1,770	3284,0
Média	659,3	2,145	30,85	33,92	1,519	3483,0
Desvio Padrão	97,0	0,349	2,20	3,70	0,342	185,6
CoV	15%	16%	7%	11%	23%	5%
45min Raios X						
G2_2	744,2	2,466	35,27	37,04	1,647	3346,2
G4_2	336,2	7,235	13,11	17,22	5,892	1614,3
G6_6	251,1	1,089	21,12	24,45	1,035	4380,7
Média	497,7	1,777	28,199	30,75	1,341	3863,5
Desvio Padrão	348,7	0,974	10,006	8,90	0,433	731,4
CoV	70%	55%	35%	29%	32%	19%
60min Raios X						
G4_5	577,3	1,737	28,93	33,10	2,349	3373,5
G6_1	637,0	1,861	30,58	33,74	1,551	3243,7
G6_4	424,5	1,108	-	28,19	0,803	3616,4
Média	546,3	1,569	29,76	31,68	1,568	3411,2
Desvio Padrão	109,6	0,404	1,16	3,04	0,773	189,1
CoV	20%	26%	4%	10%	49%	6%

Os provetes submetidos a radiação gama do isótopo de ^{192}Ir , cujas propriedades se encontram ilustradas pela Tabela 34, viram o seu módulo de elasticidade longitudinal aumentar, para o período de noventa horas. Os provetes G3_6 e G3_1, irradiados durante trinta e sessenta horas, foram considerados inválidos devido ao excessivo alongamento demonstrado bem como à sua flexibilidade, pelo que também não foram considerados para os cálculos da média, desvio padrão e CoV. O provete G5_6 possuía, na sua secção transversal, apenas um vazio de baixas dimensões, o que terá beneficiado a obtenção dos valores mais elevados de alongamento máximo e módulo de elasticidade longitudinal.

Tabela 34 - Propriedades mecânicas dos provetes do adesivo Sikaforce® 7818 L7 irradiados com raios gama do isótopo ^{192}Ir

30h ^{192}Ir						
Proвете	Força máxima [N]	Desloc. Máximo [mm]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	Tensão máxima [MPa]	Along. Máximo [%]	Módulo de Young [MPa]
G3_6	321,2	5,245	11,43	14,95	4,636	1374,9
G4_4	582,6	1,932	28,06	31,14	1,701	2905,8
G5_2	581,4	1,871	26,27	29,54	1,737	2579,2
Média	582,0	1,900	27,16	30,34	1,720	2742,5
Desvio Padrão	0,9	0,043	1,26	1,13	0,025	230,9
CoV	0%	2%	5%	4%	1%	8%
60h ^{192}Ir						
G2_3	586,1	1,583	37,24	37,24	1,102	3570,2
G3_1	221,4	2,554	8,34	9,73	1,581	1242,6
G3_5	644,8	2,079	27,18	32,75	1,657	3109,1
Média	615,5	1,83	32,21	34,99	1,38	3339,7
Desvio Padrão	41,5	0,351	7,11	3,17	0,39	326,1
CoV	7%	19%	22%	9%	28%	10%
90h ^{192}Ir						
G1_4	442,8	1,044	27,93	27,93	0,788	4210,3
G5_6	691,5	2,243	30,28	33,38	1,804	4238,7
G7_3	455,0	1,295	33,57	33,60	0,956	4801,2
Média	529,8	1,527	30,59	31,64	1,183	4416,7
Desvio Padrão	140,2	0,632	2,83	3,21	0,545	333,3
CoV	26%	41%	9%	10%	46%	8%
120h ^{192}Ir						
G1_1	600,9	2,310	28,79	31,93	1,866	3190,7
G5_4	593,2	1,655	32,82	34,87	1,358	3669,5
G5_5	775,3	1,886	37,89	37,89	1,648	3298,2
Média	656,5	1,950	33,17	34,90	1,624	3386,1
Desvio Padrão	103,0	0,332	4,56	2,98	0,255	251,2
CoV	16%	17%	14%	9%	16%	7%

A radiação gama emitida pelo isótopo ^{75}Se originou um aumento do módulo de elasticidade longitudinal para os períodos de trinta e noventa horas, conforme demonstra a Tabela 35. Todas as outras propriedades mantiveram-se na generalidade inalteradas. A rotura do provete G2_4 deu-se de forma semelhante à abertura de uma fenda, pelo que este ensaio foi considerado inválido. Os

provetes G1_3 e G7_6 apresentaram vazios de grandes dimensões na superfície de rotura, sendo esta a principal causa de os valores de deslocamento e alongamento máximos serem inferiores.

Tabela 35 - Propriedades mecânicas dos provetes do adesivo Sikaforce® 7818 L7 irradiados com raios gama do isótopo ⁷⁵Se

30h ⁷⁵Se						
Proвете	Força máxima [N]	Desloc. Máximo [mm]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	Tensão máxima [MPa]	Along. Máximo [%]	Módulo de Young [MPa]
G2_4	404,3	2,825	20,99	21,10	1,285	4852,6
G6_2	621,2	1,819	35,50	35,54	0,785	6616,5
G7_1	628,3	2,181	33,04	33,28	0,932	6345,2
Média	624,8	2,000	34,27	34,41	0,860	6480,9
Desvio Padrão	5,0	0,256	1,74	1,60	0,104	191,8
CoV	1%	13%	5%	5%	12%	3%
60h ⁷⁵Se						
G1_6	465,3	1,441	30,08	32,18	1,132	3606,5
G3_2	657,4	1,758	27,34	30,38	1,590	3188,8
G3_3	532,0	1,704	27,77	27,51	1,228	3058,5
Média	551,6	1,634	28,40	30,02	1,317	3284,6
Desvio Padrão	97,6	0,169	1,47	2,35	0,241	286,3
CoV	18%	10%	5%	8%	18%	9%
90h ⁷⁵Se						
G1_3	451,6	1,276	31,91	31,99	1,002	4207,8
G7_4	670,7	2,637	29,21	33,94	2,267	4192,4
G7_6	416,8	1,082	32,01	32,01	0,955	4474,2
Média	513,0	1,665	31,04	32,65	1,408	4291,5
Desvio Padrão	137,6	0,847	1,59	1,12	0,744	158,4
CoV	27%	51%	5%	3%	53%	4%
120h ⁷⁵Se						
G1_2	536,2	1,761	27,865	29,69	1,392	3107,2
G2_6	678,1	2,272	29,693	33,59	1,847	3202,9
G7_2	682,3	2,468	33,813	33,81	1,982	3125,0
Média	632,2	2,167	30,457	32,36	1,740	3145,0
Desvio Padrão	83,2	0,365	3,046	2,32	0,309	50,9
CoV	13%	17%	10%	7%	18%	2%

3.6.4. Discussão de resultados

3.6.4.1. Araldite® AV138

Os provetes tidos como referência, para este adesivo, apresentaram diferenças bastante significativas na tensão de rotura, quando comparadas com as obtidas por Campilho et al. (2011). A tensão máxima obtida situou-se na ordem dos $23,04 \pm 3,87$ MPa, ou seja, 42% inferior à constatada por aqueles autores. A obtenção destes resultados deve-se à presença de poros nos provetes, comprovando que o processo de fabrico destes não foi o mais preciso. Além disso, a presença de humidade e a temperatura de cura são fatores que podem igualmente ter motivado a discrepância destes valores. No entanto, é de notar que o valor médio do módulo de elasticidade longitudinal destes provetes de referência ($4,84 \pm 0,24$ GPa), é inferior ao alcançado pelos autores ($4,89 \pm 0,81$ GPa) em apenas 1%. Além disso, verificou-se um desvio percentual baixo (5%) para esta propriedade, o que comprova a elevada repetibilidade do ensaio, apesar de a existência de vazios comprometer os resultados referentes à tensão máxima (desvio percentual de 17%) e alongamento máximo (desvio percentual de 34%).

Comparação de resultados

Apesar de se ter comprovado a diferença existente entre as propriedades dos provetes de referência e as obtidas por outros autores é ainda importante comparar os resultados destes provetes com os que foram submetidos a diferentes fontes e períodos de radiação.

De facto, os provetes submetidos a uma radiação ionizante do tipo X não sofreram alterações muito relevantes para os períodos de trinta, quarenta e cinco e sessenta minutos. De forma contrária, para um período igual a quinze minutos verificou-se que o alongamento máximo foi 33% superior ao obtido inicialmente. Além disso, o módulo de elasticidade longitudinal foi 28% inferior para este período, tendo-se verificado no provete G1_3, apesar deste adesivo possuir um comportamento frágil, a existência de $R_{p0,2}$ o que é indicativo da alteração do seu comportamento.

Nos provetes submetidos à radiação gama do isótopo de ^{192}Ir notou-se um aumento de 36% no alongamento máximo dos provetes irradiados durante trinta horas. No entanto, todas as outras propriedades se mantiveram estáveis, o que poderá indicar que a radiação não provocou qualquer efeito, tendo-se devido o aumento do alongamento mencionado à quantidade de defeitos existentes nos provetes. Da mesma forma, para os períodos de sessenta e noventa horas não se verificaram alterações relevantes nas propriedades em estudo, contrariamente ao verificado para o período de cento e vinte horas. Neste caso existiu, uma vez mais, um aumento do alongamento máximo (35%), a diminuição do módulo de elasticidade longitudinal (20%) e a perda acentuada de linearidade no provete G1_6.

Os resultados obtidos na irradiação dos provetes com o isótopo de ^{75}Se não foram muito diferentes dos anteriormente descritos, não se tendo notado nenhuma alteração relevante nas propriedades analisadas para períodos superiores a trinta horas. Porém, no caso destes provetes, verificou-se um aumento significativo (cerca de 54%) do módulo de elasticidade longitudinal e uma diminuição de 35% do alongamento máximo, tendo o adesivo adotado um comportamento ainda mais rígido.

3.6.4.2. Sikaforce® 7818 L7

As propriedades dos provetes de referência demonstraram ser distintas relativamente às reclamadas pelo fabricante. De facto, o valor médio do módulo de elasticidade longitudinal fixou-se nos $3,2 \pm 0,1$ GPa, que manifesta ser superior, cerca de 29%, comparativamente ao valor tabelado pelo fabricante (2,5 GPa). Porém, a tensão e o alongamento máximo obtidos provaram ser inferiores em 10% e 45%, respetivamente. Estes valores justificam-se com o facto de os provetes possuírem um elevado número de vazios de grandes dimensões. Apesar disso, o desvio percentual alcançado foi inferior a 10% para a maioria das propriedades.

Comparação de resultados

Embora neste adesivo se tenha notado uma maior variação relativamente aos dados do fabricante, torna-se importante comparar os resultados das diferentes exposições aos provetes padrão.

A exposição dos provetes à radiação ionizante do tipo X não alterou significativamente as propriedades dos provetes irradiados para trinta minutos. No entanto, para exposições de quinze minutos deu-se uma diminuição da tensão de limite elástico e do módulo de elasticidade longitudinal na ordem dos 12% e 17%, respetivamente, apesar do baixo desvio percentual. O alongamento máximo foi 45% superior ao registado nos provetes de referência. É de notar que, neste caso, os resultados obtidos assemelham-se aos resultados reclamados pelo fabricante. De forma contrária aos restantes provetes irradiados por este tipo de radiação, o provete G6_4, exposto durante sessenta minutos, não demonstrou tensão de limite elástico, tendo apresentado um comportamento semelhante a um material rígido.

Na exposição aos raios gama do isótopo ^{192}Ir , para um período de trinta horas, notou-se uma elevada repetibilidade dos ensaios, embora se tenha registado a diminuição do módulo de elasticidade longitudinal (15%) e consequente aumento do alongamento máximo (25%). O período em que se verificaram alterações mais significativas foi o de noventa horas, caso em que teve lugar um aumento de 37% do módulo de elasticidade longitudinal e uma diminuição de 13% do alongamento máximo. O provete G5_6 teve bastante influência nesses valores devido à baixa quantidade de vazios que apresentou.

De uma forma geral, os provetes submetidos ao isótopo ^{75}Se apenas demonstraram uma variação significativa das propriedades para um período de trinta horas, caso em que a tensão de limite elástico e o módulo de elasticidade longitudinal foram superiores às dos provetes padrão em 20% e 102%, respetivamente. Estes provetes mostraram um comportamento distinto dos restantes, mostrando-se mais frágeis. As noventa horas de exposição provocaram um aumento de 33% do módulo de elasticidade longitudinal neste adesivo. Para o período de cento e vinte horas verificou-se um aumento do alongamento máximo, no entanto, constata-se que os provetes responsáveis por esse aumento (G2_6 e G7_2) apresentavam poucos defeitos, o que poderá ser a principal razão desse incremento.

4. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação teve como principal objetivo observar e quantificar a degradação provocada pela radiação ionizante, do tipo X e gama, nas propriedades mecânicas de adesivos estruturais. De forma a averiguar a alteração das propriedades, foram escolhidos dois adesivos com comportamentos distintos, nomeadamente o Araldite® AV138 e o Sikaforce® 7818 L7, sendo o primeiro tipicamente frágil e o outro dúctil. Para tal, foram fabricados provetes de adesivo maciço, por moldação em molde aberto, que foram posteriormente expostos a radiação ionizante, na empresa QTEC – TÜV Áustria Ibéria, em condições e períodos distintos, a saber:

- Radiação do tipo X (15min, 30min, 45min e 60min);
- Radiação do tipo gama do isótopo ^{192}Ir (30h, 60h, 90h e 120h);
- Radiação do tipo gama do isótopo ^{75}Se (30h, 60h, 90h e 120h).

De modo a proporcionar um meio de comparação, enquanto decorria esta exposição, foram efetuados ensaios de tração a três provetes de cada adesivo cujas propriedades se encontravam inalteradas, servindo de padrão para a análise posterior. Apesar disso, verificou-se uma discrepância com os valores tabelados pelos fabricantes e outros autores, sendo a diferença mais notória a tensão máxima obtida para o adesivo Araldite® AV138, que era 42% inferior à verificada por Campilho et al. (2011). O adesivo Sikaforce 7818 L7 também revelou um módulo de elasticidade longitudinal 29% superior ao reclamado pelo fabricante. A existência de vazios, a humidade, a má mistura da resina e do endurecedor ou o tempo excessivo de aplicação de adesivo no molde podem ter influenciado estes resultados.

Os provetes submetidos às diferentes fontes de radiação e respetivos períodos de exposição foram também tracionados, tendo sido realizada uma análise de dados às propriedades obtidas, comparando-as com os provetes de referência. De um modo geral, constatou-se que a radiação não teve grande influência nos resultados obtidos. As variações de menor expressão assinaladas na discussão de resultados podem dever-se a diversos fatores como a quantidade de defeitos existentes nos provetes (que é uma tarefa difícil de evitar), mau alinhamento dos mordentes da máquina de tração e condições de mistura e cura indevidas (humidade e temperatura). Porém, existiram provetes que viram as suas propriedades alteradas, tais como:

- Proвете G1_6, exposto a 120h de ^{192}Ir (Araldite® AV138) apresentou limite elástico (de 24,98 MPa) apesar de ser um adesivo com comportamento frágil;
- Provetes submetidos a 30h de ^{75}Se (Araldite® AV138) demonstraram um aumento de 54% do seu módulo de elasticidade longitudinal e uma diminuição de 35% do seu alongamento máximo, relativamente aos provetes de referência;
- Proвете G6_4, irradiado durante 60min de raios X (Sikaforce® 7818 L7), não demonstrou tensão de limite elástico, apresentando-se mais frágil que os outros provetes;
- Provetes submetidos a 30h de ^{75}Se (Sikaforce® 7818 L7) apresentaram um aumento de 102% do módulo de elasticidade longitudinal, revelando um comportamento rígido comparativamente aos restantes.

É de notar que os efeitos observados não seguem nenhum critério específico, isto é, a radiação não provocou alterações constantes que possam ser linearizadas ou previstas. Zimmermann et al. (2019) realizaram um estudo semelhante a este no adesivo epóxico 3M SW 9323, utilizando uma fonte de ^{60}Co , cujo poder de penetração é superior ao das fontes utilizadas nesta dissertação. As dosagens obtidas por estes autores foram mil vezes superiores às alcançadas neste trabalho e, mesmo assim, não se notaram alterações relevantes nas suas propriedades mecânicas. Isto acontece porque, segundo esse investigador, ocorre a combinação de ambos os efeitos de reticulação e cisão da cadeia molecular no adesivo, não havendo nenhuma transformação aparente nas suas propriedades apesar da descoloração existente.

Da mesma forma, nesta dissertação, apesar de existirem provetes que viram as suas propriedades mecânicas alteradas, não é possível afirmar que a radiação teve influência nessas mesmas. Apesar de não se ter verificado uma coloração diferente dos provetes, as propriedades mantiveram-se praticamente inalteradas, possivelmente pela ocorrência de ambos os efeitos de reticulação e cisão da cadeia molecular dos adesivos. Pode-se desta maneira concluir que as estruturas ligadas por estes adesivos, e com exposição a estas fontes de radiação nas durações testadas, não vêm a sua resistência mecânica alterada.

Como propostas de trabalhos futuros sugere-se:

- Fabrico de provetes por injeção, de modo a diminuir a ocorrência de defeitos;
- Exposição de provetes de adesivo maciço a períodos mais longos;
- Diminuição da distância entre o provete e a fonte de radiação;
- Utilização de fontes com um maior débito de dose, por exemplo, fontes acabadas de ser “carregadas”, isto é, com maior atividade;
- Análise FTIR aos provetes de modo a verificar a formação de radicais livres.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, R. D. (2005). *Adhesive bonding: Science, technology and applications* (R. D. Adams ed.). Woodhead Publishing Limited.
- Adams, R. D., & Cawley, P. (1988). A review of defect types and nondestructive testing techniques for composites and bonded joints. *NDT International*, 21(4), 208-222.
- Adams, R. D., & Drinkwater, B. W. (1997). Nondestructive testing of adhesively-bonded joints. *NDT & E International*, 30(2), 93-98.
- Adams, R. D., & Wake, W. C. (1984). The Nature and Magnitude of Stresses in Adhesive Joints. In R. D. Adams & W. C. Wake (Eds.), *Structural Adhesive Joints in Engineering* (pp. 14-114). Springer Netherlands.
- AFNOR, É. (2021). Adhésifs structuraux - Méthode de préparation de plaques d'adhésifs structuraux pour la réalisation d'éprouvettes d'essai de caractérisation. In *NF T 76-142* (pp. 11). France: Afnor Éditions.
- Akhavan-Safar, A., Marques, E. A. S., Carbas, R. J. C., & da Silva, L. F. M. (2021). 6 - Stress analysis of adhesive joints. In R. D. Adams (Ed.), *Adhesive Bonding (Second Edition)* (pp. 159-192). Woodhead Publishing.
- Aliha, M. R. M., Kucheki, H. G., & Mirsayar, M. (2021). Mixed Mode I/II Fracture Analysis of Bi-Material Adhesive Bonded Joints Using a Novel Short Beam Specimen. *Applied Sciences*, 11(11), 5232.
- Alves, D. L., Campilho, R. D. S. G., Moreira, R. D. F., Silva, F. J. G., & da Silva, L. F. M. (2018). Experimental and numerical analysis of hybrid adhesively-bonded scarf joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 83, 87-95.
- Aronovich, D. A., & Boinovich, L. B. (2021). Structural Acrylic Adhesives: A Critical Review. In *Progress in Adhesion and Adhesives* (pp. 651-708).
- ASTM. (2019). Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal). In (pp. 6). West Conshohocken, Pensilvânia, EUA: ASTM.
- ASTM D 907. (1999). Standard Terminology of Adhesives. In (pp. 11). West Conshohocken, Pensilvânia, EUA: ASTM.
- ASTM D 3433. (1999). Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints. In (pp. 7). West Conshohocken, Pensilvânia, EUA: ASTM
- ASTM D 5573. (1999). Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints. In (pp. 3). West Conshohocken, Pensilvânia, EUA: ASTM.
- Banea, M. D., & da Silva, L. F. M. (2010). The effect of temperature on the mechanical properties of adhesives for the automotive industry. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 224(2), 51-62.
- Bernal, C., Couto, A. B., Breviglieri, S. T., & Cavalheiro, É. T. G. (2002). Influência de alguns parâmetros experimentais nos resultados de análises calorimétricas diferenciais - DSC. *Química Nova*, 25.
- Biscaro, S., Moraes, R., Correr, A., De Almeida, S., Bóscolo, F., Soares, C., & Sobrinho, L. (2009). Effect of X-ray Radiation Dose on the Bond Strength of Different Adhesive Systems to Dentin. *The journal of adhesive dentistry*, 11, 355-360.
- Bishopp, J. (2011). 13 - Adhesives for Aerospace Structures. In S. Ebnesajjad (Ed.), *Handbook of Adhesives and Surface Preparation* (pp. 301-344). William Andrew Publishing.
- Blackman, B. R. K. (2011). Fracture Tests. In L. F. M. da Silva, A. Öchsner, & R. D. Adams (Eds.), *Handbook of Adhesion Technology* (pp. 473-501). Springer Berlin Heidelberg.
- Borsellino, C., Di Bella, G., & Ruisi, V. F. (2009). Adhesive joining of aluminium AA6082: The effects of resin and surface treatment. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29(1), 36-44.

- Boyer, H. E. (1986). Fatigue Testing. *ASM International, Atlas of Fatigue Curves*.
- Broughton, W., & Mera, R. (1997). Review of Durability Test Methods and Standards for Assessing Long Term Performance of Adhesive Joints.
- Campilho, R. D. S. G., Banea, M. D., Pinto, A. M. G., da Silva, L. F. M., & de Jesus, A. M. P. (2011). Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31(5), 363-372.
- Carbas, R. J. C., da Silva, L. F. M., Marques, E. A. S., & Lopes, A. M. (2013). Effect of post-cure on the glass transition temperature and mechanical properties of epoxy adhesives. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 27(23), 2542-2557.
- Carbas, R. J. C., Marques, E. A. S., da Silva, L. F. M., & Lopes, A. M. (2014). Effect of Cure Temperature on the Glass Transition Temperature and Mechanical Properties of Epoxy Adhesives. *The Journal of Adhesion*, 90(1), 104-119.
- Chaffin, K., Taylor, C., & Grailer, T. (2013). 14 - Bonding strategies and adhesives for joining medical device components. In Y. Zhou & M. D. Breyen (Eds.), *Joining and Assembly of Medical Materials and Devices* (pp. 370-404). Woodhead Publishing.
- Chandler, H. (1999). Introduction to Hardness Testing. *ASM International, 2nd Edition*, 14.
- Chandrasekar, M., Ishak, M. R., Jawaid, M., Sapuan, S. M., & Leman, Z. (2018). 14 - Low velocity impact properties of natural fiber-reinforced composite materials for aeronautical applications. In M. Jawaid & M. Thariq (Eds.), *Sustainable Composites for Aerospace Applications* (pp. 293-313). Woodhead Publishing.
- Chauveau, D. (2018). Review of NDT and process monitoring techniques usable to produce high-quality parts by welding or additive manufacturing. *Welding in the World*, 62(5), 1097-1118.
- Chaves, F. J. P., da Silva, L. F. M., de Moura, M. F. S. F., Dillard, D. A., & Esteves, V. H. C. (2014). Fracture Mechanics Tests in Adhesively Bonded Joints: A Literature Review. *The Journal of Adhesion*, 90(12), 955-992.
- Chelazzi, D., Chevalier, A., Pizzorusso, G., Giorgi, R., Menu, M., & Baglioni, P. (2014). Characterization and degradation of poly(vinyl acetate)-based adhesives for canvas paintings. *Polymer Degradation and Stability*, 107, 314-320.
- Chen, J. H., Sernow, R., Schulz, E., & Hinrichsen, G. (1999). A modification of the mixed-mode bending test apparatus. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 30(7), 871-877.
- Comyn, J. (2021). 2 - What are adhesives and sealants and how do they work? In R. D. Adams (Ed.), *Adhesive Bonding (Second Edition)* (pp. 41-78). Woodhead Publishing.
- Curry III, T. S., Dowdey, J. E., & Murry Jr., R. C. (1990). *Physics of Diagnostic Radiology* (4th ed.).
- da Silva, L. F. M., de Magalhães, F. A. C. R. G., Chaves, F. J. P., & de Moura, M. F. S. F. (2010). Mode II Fracture Toughness of a Brittle and a Ductile Adhesive as a Function of the Adhesive Thickness. *The Journal of Adhesion*, 86(9), 891-905.
- da Silva, L. F. M., Dillard, D. A., Blackman, B., & Adams, R. D. (2012). *Testing Adhesive Joints*. Wiley-VCH.
- Deepak, J. R., Bupesh Raja, V. K., Srikanth, D., Surendran, H., & Nickolas, M. M. (2021). Non-destructive testing (NDT) techniques for low carbon steel welded joints: A review and experimental study. *Materials Today: Proceedings*, 44, 3732-3737.
- Delacroix, D., Guerre, J. P., Leblanc, P., & Hickman, C. (2002). Radionuclide and radiation protection data handbook 2nd edition (2002). *Radiat Prot Dosimetry*, 98(1), 9-168.
- Désagulier, C., Pérès, P., & Larnac, G. (2018). Aerospace Industry. In L. F. M. da Silva, A. Öchsner, & R. D. Adams (Eds.), *Handbook of Adhesion Technology* (pp. 1285-1331). Springer International Publishing.
- Dillard, D. A. (2011). Physical Properties of Adhesives. In L. F. M. da Silva, A. Öchsner, & R. D. Adams (Eds.), *Handbook of Adhesion Technology* (pp. 391-414). Springer Berlin Heidelberg.
- Dillard, D. A. (2021). 10 - Applying fracture mechanics to adhesive bonds. In R. D. Adams (Ed.), *Adhesive Bonding (Second Edition)* (pp. 295-316). Woodhead Publishing.

- Dwivedi, S. K., Vishwakarma, M., & Soni, P. A. (2018). Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 5(2, Part 1), 3690-3698.
- Ebnesajjad, S. (2014). Chapter 5 - Theories of Adhesion. In S. Ebnesajjad (Ed.), *Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding (Second Edition)* (pp. 77-91). William Andrew Publishing.
- Ebnesajjad, S., & Landrock, A. H. (2015a). Chapter 1 - Introduction and Adhesion Theories. In S. Ebnesajjad & A. H. Landrock (Eds.), *Adhesives Technology Handbook (Third Edition)* (pp. 1-18). William Andrew Publishing.
- Ebnesajjad, S., & Landrock, A. H. (2015b). Chapter 4 - Classification of Adhesives and Compounds. In S. Ebnesajjad & A. H. Landrock (Eds.), *Adhesives Technology Handbook (Third Edition)* (pp. 67-83). William Andrew Publishing.
- Ebnesajjad, S., & Landrock, A. H. (2015c). Chapter 5 - Characteristics of Adhesive Materials. In S. Ebnesajjad & A. H. Landrock (Eds.), *Adhesives Technology Handbook (Third Edition)* (pp. 84-159). William Andrew Publishing.
- Ebnesajjad, S., & Landrock, A. H. (2015d). Chapter 7 - Joint Design. In S. Ebnesajjad & A. H. Landrock (Eds.), *Adhesives Technology Handbook (Third Edition)* (pp. 183-205). William Andrew Publishing.
- Ebnesajjad, S., & Landrock, A. H. (2015e). Chapter 11 - Durability of Adhesive Bonds. In S. Ebnesajjad & A. H. Landrock (Eds.), *Adhesives Technology Handbook (Third Edition)* (pp. 297-338). William Andrew Publishing.
- Esteves, V. H. C. (2010). *Determinação da tenacidade de um adesivo em solicitações de modo misto (I+ II)* [Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto]. Porto, Portugal.
- Fernández, M. V., de Moura, M. F. S. F., da Silva, L. F. M., & Marques, A. T. (2013). Mixed-mode I+II fatigue/fracture characterization of composite bonded joints using the Single-Leg Bending test. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 44, 63-69.
- Ferraris, M., Salvo, M., Casalegno, V., De La Pierre, S., Goglio, L., & Benelli, A. (2022). Torsion Test vs. Other Methods to Obtain the Shear Strength of Elastic-Plastic Adhesives. *Applied Sciences*, 12(7), 3284.
- Fried, J. R. (2014). *Polymer Science and Technology* (3rd ed.). Pearson.
- General Electric. (2023). ERESO 65 MF4. In.
- Gholizadeh, S. (2016). A review of non-destructive testing methods of composite materials. *Procedia Structural Integrity*, 1, 50-57.
- Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1999). *Cellular Solids - Structure and properties* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Golling, F. E., Pires, R., Hecking, A., Weikard, J., Richter, F., Danielmeier, K., & Dijkstra, D. (2019). Polyurethanes for coatings and adhesives – chemistry and applications. *Polymer International*, 68(5), 848-855.
- Gomes, P. (2022). Curso de formação em proteção radiológica na utilização de fontes seladas e de aparelhos geradores de radiação X. In.
- Governo, P. (2007). *Decreto Regulamentar nº76/2007, de 17 de Julho*. Retrieved from <https://files.dre.pt/1s/2007/07/13600/0449904543.pdf#Page=8>
- Guarino, F., Hauviller, C., Tavlet, M., & CERN. (2001). *Compilation of radiation damage test data* (Vol. pt.4: Adhesives). CERN.
- Gupta, M., Khan, M. A., Butola, R., & Singari, R. M. (2021). Advances in applications of Non-Destructive Testing (NDT): A review. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 1-22.
- Han, X., Pickering, E., Bo, A., & Gu, Y. (2020). Characterisation on the hygrothermal degradation in the mechanical property of structural adhesive: A novel meso-scale approach. *Composites Part B: Engineering*, 182, 107609.
- Harper, C. A. (2002). *Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites* (C. A. Harper, Ed. Fourth ed.). R. R. Donnelley & Sons Company.
- Hartshorn, S. R. (1986). *Structural Adhesives - Chemistry and Technology* (P. Press, Ed.). Plenum Press.

- Henkel®. (2014). LOCTITE® FREKOTE 770-NC™. In H. A. Technologies (Ed.): Henkel Adhesive Technologies.
- Higgins, A. (2000). Adhesive bonding of aircraft structures. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 20(5), 367-376.
- Hunstman, A. M. (2009). Product Data Sheet Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998. In H. A. Materials (Ed.). (Switzerland) GmbH
Klybeckstrasse 200
4057 Basel - Switzerland: Hunstman Advanced Materials.
- Hutchinson, A. R. (2008). 3 - Surface preparation of component materials. In L. C. Hollaway & J. G. Teng (Eds.), *Strengthening and Rehabilitation of Civil Infrastructures Using Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites* (pp. 83-111). Woodhead Publishing.
- Ionashiro, M. G. (2004). *Giolito - Fundamentos da Termogravimetria/Análise Térmica Diferencial/Calorimetria Exploratória Diferencial*.
- ISO. (2012). Plastics — Determination of tensile properties — Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics. In *EN ISO 527-2* (pp. 11): ISO Standards.
- Jahani, Y., Baena, M., Barris, C., Perera, R., & Torres, L. (2022). Influence of curing, post-curing and testing temperatures on mechanical properties of a structural adhesive. *Construction and Building Materials*, 324, 126698.
- Kholodovych, V., & Welsh, W. J. (2007). Densities of Amorphous and Crystalline Polymers. In J. E. Mark (Ed.), *Physical Properties of Polymers Handbook* (pp. 611-617). Springer New York.
- Kim, H.-J., Lim, D.-H., Hwang, H.-D., & Lee, B.-H. (2011). Composition of Adhesives. In L. F. M. da Silva, A. Öchsner, & R. D. Adams (Eds.), *Handbook of Adhesion Technology* (pp. 291-314). Springer Berlin Heidelberg.
- Kinloch, A. J., Wang, Y., Williams, J. G., & Yayla, P. (1993). The mixed-mode delamination of fibre composite materials. *Composites Science and Technology*, 47(3), 225-237.
- Klingen, J. (2022). The 5 Steps for Achieving Safe and High-Quality Bonds. In Wiley-VCH (Ed.), *Adhesive Bonding in Five Steps: Achieving Safe and High-Quality Bonds*. Wiley-VCH.
- Kumar, S., & Mahto, D. (2013). Recent trends in industrial and other engineering applications of non destructive testing: a review. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(9).
- Loctite. (2022). STEP-BY-STEP INSTRUCTIONS FOR SHOE SOLE REPAIR. In. Düsseldorf, Alemanha: Loctite.
- Lorandi, N., Cioffi, M. O., & Ornaghi, H. (2016). Análise Dinâmico-Mecânica de Materiais Compósitos Poliméricos. *Scientia cum Industria*, 4, 48.
- Loureiro, F. J. C. F. B., Campilho, R. D. S. G., & Rocha, R. J. B. (2020). Mixed-mode fracture toughness of a structural adhesive by the single-leg bending test. *Procedia Structural Integrity*, 25, 63-70.
- Makuuchi, K. C., Song. (2012a). Basic Concepts of Radiation Processing. In *Radiation Processing of Polymer Materials and its Industrial Applications* (pp. 1-25).
- Makuuchi, K. C., Song. (2012b). Fundamentals of Radiation Crosslinking. In *Radiation Processing of Polymer Materials and its Industrial Applications* (pp. 26-70).
- Marques, E. A. S., Carbas, R. J. C., Tenreiro, A. F. G., & Silva, L. F. M. (2021). Introdução às ligações adesivas estruturais. In ENGEBOOK (Ed.), *Introdução às ligações adesivas estruturais* (1ª ed., pp. 47-63). Quântica Editora.
- Márquez, G. C., Fausto Pedro Peco; María, Ana. (2020). A review of non-destructive testing on wind turbines blades. *Renewable Energy*, 161, 998-1010.
- Martin, R. H., & Davidson, B. D. (1999). Mode II fracture toughness evaluation using four point bend, end notched flexure test. *Plastics, Rubber and Composites*, 28(8), 401-406.
- McGrail, P. T. (1996). Polyaromatics. *Polymer International*, 41(2), 103-121.
- Monteiro, J., Campilho, R., Marques, E., & Silva, L. F. M. (2015). Experimental estimation of the mechanical and fracture properties of a new epoxy adhesive. *Applied Adhesion Science*, 3, 25.

- Monteiro, P. J. J. (2020). *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural modificado com pó de cortiça expandida* Instituto Superior de Engenharia do Porto]. Porto.
- Morais, J. F. A. (2013). *Desenvolvimento de ferramentas e provetes para o ensaio Thick Adherend Shear Test (TAST)* Instituto Superior de Engenharia do Porto]. Porto.
- Netzsch. (2023). *Coefficient of Linear Thermal Expansion (CLTE/CTE)*. Netzsch Group. Retrieved 2023/08/25 from
- Neves, L. F. R., Campilho, R. D. S. G., Sánchez-Arce, I. J., Madani, K., & Prakash, C. (2022). Numerical Modelling and Validation of Mixed-Mode Fracture Tests to Adhesive Joints Using J-Integral Concepts. *Processes*, 10(12), 2730.
- Nunes, F. A. A., & Campilho, R. D. S. G. (2018). Mixed-mode fracture analysis of adhesively-bonded joints using the ATDCB test specimen. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 85, 58-68.
- Omairey, S., Jayasree, N., & Kazilas, M. (2021). Defects and uncertainties of adhesively bonded composite joints. *SN Applied Sciences*, 3(9), 769.
- Paiva, R. M., Marques, E. A., da Silva, L. F., António, C. A., & Arán-Ais, F. (2016). Adhesives in the footwear industry. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 230(2), 357-374.
- Park, S., & Dillard, D. A. (2007). Development of a simple mixed-mode fracture test and the resulting fracture energy envelope for an adhesive bond. *International Journal of Fracture*, 148(3), 261-271.
- Petrie, E. (2011). How Moisture Affects Adhesives, Sealants, and Coatings. *Metal Finishing*, 109, 36–37, 48.
- Petrie, E. M. (2006). *Handbook of Adhesives and Sealants* (2nd ed.). The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Pinto, A. G. (2007). *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos* Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto]. Repositório UP.
- Pinto, S. D. M. (2013). *Determinação das propriedades mecânicas à tração de adesivos estruturais frágeis e dúcteis* Instituto Superior de Engenharia do Porto]. Repositório P. Porto.
- Priya, V. S. J. K., Pradeep, K., Madhumitha, M., & Mishra, A. K. (2022). Experimental investigation on mild steel using torsion test method. *Materials Today: Proceedings*, 62, 1990-1994.
- Qin, G., Na, J., Mu, W., & Tan, W. (2019). Effect of thermal cycling on the degradation of adhesively bonded CFRP/aluminum alloy joints for automobiles. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 95, 102439.
- QSA Global. (2023). SENTINEL™ 880 Series Gamma-Ray Source Projectors.
- Ramalho, L. D. C., Campilho, R. D. S. G., Belinha, J., & da Silva, L. F. M. (2020). Static strength prediction of adhesive joints: A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 96, 102451.
- RELACRE, A., CNDT, CrSNDT, MAROVISZ e SEF. (2013). Manual de Estudo. In *Partículas Magnéticas* (2ª Edição ed., pp. 276). PROQUALINDT.
- Rincon, P. (2019). Neanderthal 'glue' points to complex thinking. BBC News. Retrieved 03/12/2022 from <https://www.bbc.com/news/science-environment-50131120>
- Saba, N., Jawaid, M., & Sultan, M. T. H. (2019). 1 - An overview of mechanical and physical testing of composite materials. In M. Jawaid, M. Thariq, & N. Saba (Eds.), *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites* (pp. 1-12). Woodhead Publishing.
- Sakaguchi, R. L., Shah, N. C., Lim, B.-S., Ferracane, J. L., & Borgersen, S. E. (2002). Dynamic mechanical analysis of storage modulus development in light-activated polymer matrix composites. *Dental Materials*, 18(3), 197-202.
- Sancaktar, E. (2011). Classification of Adhesive and Sealant Materials. In L. F. M. da Silva, A. Öchsner, & R. D. Adams (Eds.), *Handbook of Adhesion Technology* (pp. 259-290). Springer Berlin Heidelberg.

- Sastri, V. R. (2022). 10 - Three-Dimensional Printing, Wearables, Medical Textiles, Adhesives, and Coatings. In V. R. Sastri (Ed.), *Plastics in Medical Devices (Third Edition)* (pp. 381-421). William Andrew Publishing.
- Sato, C., & Marzi, S. (2021). 9 - High-rate loading and impact in adhesively bonding joints. In R. D. Adams (Ed.), *Adhesive Bonding (Second Edition)* (pp. 257-293). Woodhead Publishing.
- Schnabel, W. (2014). Chemical Reactions Induced by High-Energy Radiation. In *Polymers and Electromagnetic Radiation* (pp. 239-314).
- Shaw, J. D. N. (1990). Adhesives in the construction industry: Materials and case histories. *Construction and Building Materials*, 4(2), 92-97.
- Sika®. (2013). Product Data Sheet SikaForce®-7818 L7. In Sika® (Ed.), (05/2013 ed.). Watchmead, Welwyn Garden City - Herts, AL7 1BQ - United Kingdom: Sika Limited.
- Silva, L. F. M. (2011). Design Rules and Methods to Improve Joint Strength. In L. F. M. da Silva, A. Öchsner, & R. D. Adams (Eds.), *Handbook of Adhesion Technology* (pp. 689-723). Springer Berlin Heidelberg.
- Silva, L. F. M., Magalhães, A. G., & Moura, M. F. S. F. (2007). *Juntas Adesivas Estruturais*. Publindustria.
- Silvestru, V. A., Kolany, G., Freytag, B., Schneider, J., & Englhardt, O. (2019). Adhesively bonded glass-metal façade elements with composite structural behaviour under in-plane and out-of-plane loading. *Engineering Structures*, 200, 109692.
- Soares, A. R. F., Campilho, R. D. S. G., Chaves, F. J. P., Sánchez-Arce, I. J., Fecheira, J. M. F. S., Silva, F. J. G., & Carvalho, P. M. D. (2022). Design and validation of mixed-mode device for fracture toughness analysis of adhesive joints. *Procedia Structural Integrity*, 41, 48-59.
- Stericycle Portugal. (2023). *Prática avaliada - Radiologia Industrial e Gamagrafia*.
- Thippireddy, R. (2018). *MECHANICAL CHARACTERISTICS OF WASTE ELECTRICAL PARTICLES IN POLYMERIC COMPOSITES*
- Trampus, P. (2013). NDT challenges and responses-an overview. Proceedings of the 12th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering,
- Trampus, P., Krstelj, V., & Nardoni, G. (2019). NDT integrity engineering – A new discipline. *Procedia Structural Integrity*, 17, 262-267.
- Tran, N. T., Boyer, A. J., Busch, C. E., Bartucci, M. A., Orlicki, J. A., Lenhart, J. L., & Knorr, D. B. (2022). Evaluation of dopamine and dopamine derivatives as additives in epoxy resin for structural adhesive applications. *The Journal of Adhesion*, 1-16.
- Troughton, M. J. (2009). Chapter 17 - Adhesive Bonding. In M. J. Troughton (Ed.), *Handbook of Plastics Joining (Second Edition)* (pp. 145-173). William Andrew Publishing.
- Tserpes, K. (2020). Adhesive Bonding of Aircraft Structures. In S. Pantelakis & K. Tserpes (Eds.), *Revolutionizing Aircraft Materials and Processes* (pp. 337-357). Springer International Publishing.
- Viana, G., Costa, M., Banea, M., & da Silva, L. (2017). A review on the temperature and moisture degradation of adhesive joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 231(5), 488-501.
- Visakh, P. M., Nazarenko, O. B., Sarath Chandran, C., Melnikova, T. V., Nazarenko, S. Y., & Kim, J. C. (2017). Effect of electron beam irradiation on thermal and mechanical properties of aluminum based epoxy composites. *Radiation Physics and Chemistry*, 136, 17-22.
- Wegman, R. F., & Van Twisk, J. (2013). 1 - Introduction. In R. F. Wegman & J. Van Twisk (Eds.), *Surface Preparation Techniques for Adhesive Bonding (Second Edition)* (pp. 1-8). William Andrew Publishing.
- Xiao, F., Hui, C. Y., & Kramer, E. J. (1993). Analysis of a mixed mode fracture specimen: the asymmetric double cantilever beam. *Journal of Materials Science*, 28(20), 5620-5629.
- Zimmermann, J., Sadeghi, M. Z., & Schroeder, K. U. (2019). The effect of γ -radiation on the mechanical properties of structural adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 93, 102334.

- Zimmermann, J., Sadeghi, M. Z., & Schroeder, K. U. (2020). Exposure of structural epoxy adhesive to combination of tensile stress and γ -radiation. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *97*, 102496.
- Zimmermann, J., Schalm, T., Sadeghi, M. Z., & Schröder, K. U. (2022). Empirical investigations on the effects of ionizing radiation on epoxy structural adhesives and resins: An overview. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *117*, 103014.

ANEXO A. Adesivo Araldite® AV138

Advanced Materials**Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998****Structural Adhesives****Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998****Two component epoxy adhesive****Key properties**

- Low out gassing / volatile loss
- Excellent chemical resistance
- Temperature resistant to 120°C
- Thixotropic, gap filling paste

Description

Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998 is a two component, room temperature curing paste adhesive of high strength. When fully cured the adhesive will have excellent performance at elevated temperatures and has high chemical resistance. It is suitable for bonding a wide variety of metals, ceramics, glass, rubbers, rigid plastics and other materials, and is widely used in many industrial applications where resistance to aggressive or warm environments are required. The low out gassing makes this product suitable for specialist electronic telecommunication and aerospace applications.

Typical product data

Property	Araldite® AV 138M-1	Hardener HV 998	Mix
Colour (visual)	beige	grey	grey
Specific gravity	ca. 1.7	ca. 1.7	ca. 1.7
Viscosity (Pas)	thixotropic	thixotropic	thixotropic
Pot Life (100 gm at 25°C)	-	-	35 mins

Processing**Pretreatment**

The strength and durability of a bonded joint are dependant on proper treatment of the surfaces to be bonded. At the very least, joint surfaces should be cleaned with a good degreasing agent such as acetone or other proprietary degreasing agents in order to remove all traces of oil, grease and dirt. Low grade alcohol, gasoline (petrol) or paint thinners should never be used. The strongest and most durable joints are obtained by either mechanically abrading or chemically etching ("pickling") the degreased surfaces. Abrading should be followed by a second degreasing treatment

Mix ratio	Parts by weight	Parts by volume
Araldite® AV 138M-1	100	100
Hardener HV 998	40	40

Resin and hardener should be blended until they form a homogeneous mix.

Application of adhesive

The resin/hardener mix is applied with a spatula, to the pretreated and dry joint surfaces. A layer of adhesive 0.05 to 0.10 mm thick will normally impart the greatest lap shear strength to the joint. The joint components should be assembled and clamped as soon as the adhesive has been applied. An even con-

tact pressure throughout the joint area will ensure optimum cure.

Mechanical processing

Specialist firms have developed metering, mixing and spreading equipment that enables the bulk processing of adhesive. We will be pleased to advise customers on the choice of equipment for their particular needs.

Equipment maintenance

All tools should be cleaned with hot water and soap before adhesives residues have had time to cure. The removal of cured residues is a difficult and time-consuming operation.

If solvents such as acetone are used for cleaning, operatives should take the appropriate precautions and, in addition, avoid skin and eye contact.

Curing times

Temperature	°C	10	15	23	40	60	80	100
Cure time	hours	48	36	24	16	1	-	-
	minutes	-	-	-	-	-	15	10
LSS at 23°C	N/mm ²	10	11	13	14	15	16	18

LSS = Lap shear strength.

Typical cured properties

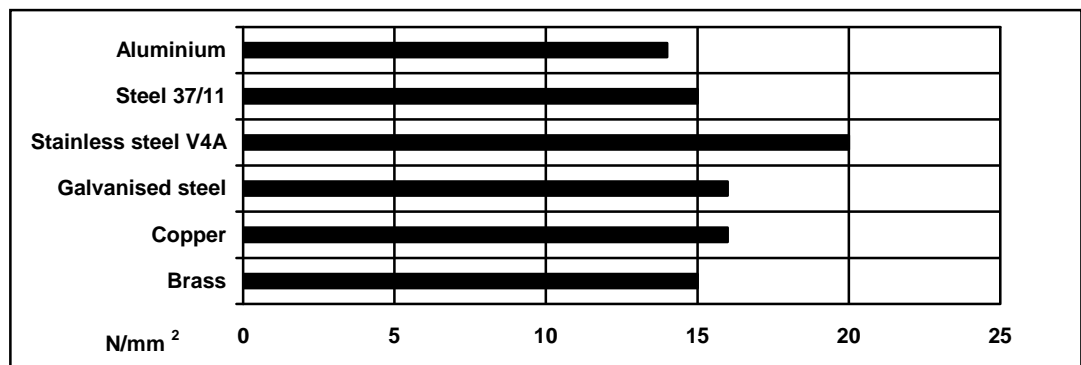
Unless otherwise stated, the figures given below were all determined by testing standard specimens made by lap-jointing 114 x 25 x 1.6 mm strips of aluminium alloy. The joint area was 12.5 x 25 mm in each case.

The figures were determined with typical production batches using standard testing methods. They are provided solely as technical information and do not constitute a product specification.

Average lap shear strengths of typical metal-to-metal joints (ISO 4587)

Cure: 16 hours at 40°C and tested at 23°C

Pretreatment - Sand blasting



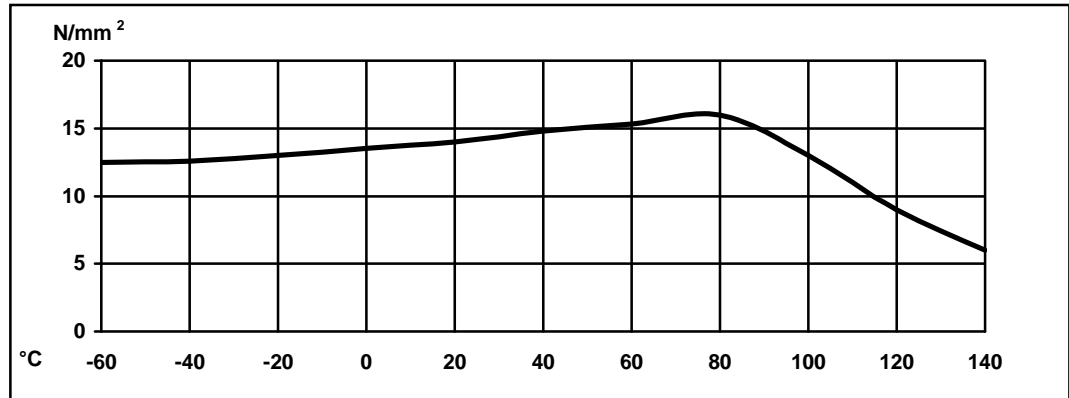
Shear modulus (DMA ISO 6721)

Cure: 16 hours at 40°C

-25°C	2175 MPa
0°C	2030 MPa
20°C	1890 MPa
60°C	780 MPa
100°C	34 Mpa
120°C	27 MPa

Lap shear strength versus temperature (ISO 4587) (typical average values)

Cure: 16 hours at 40°C



Roller peel test (ISO 4578)

Cure: 16 hours at 40°C

1.8 N/mm

Shore hardness

D84-86

Tensile strength

Cure: 16 hours at 40°C

43 MPa

Tensile modulus

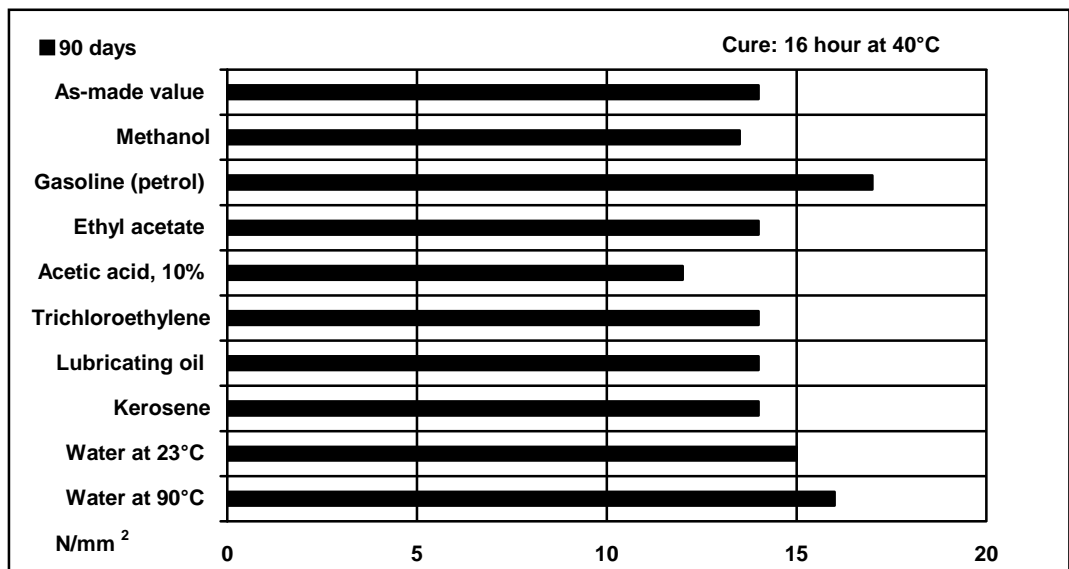
4.7 GPa

Elongation at break

1.2%

Lap shear strength versus immersion in various media (typical average values)

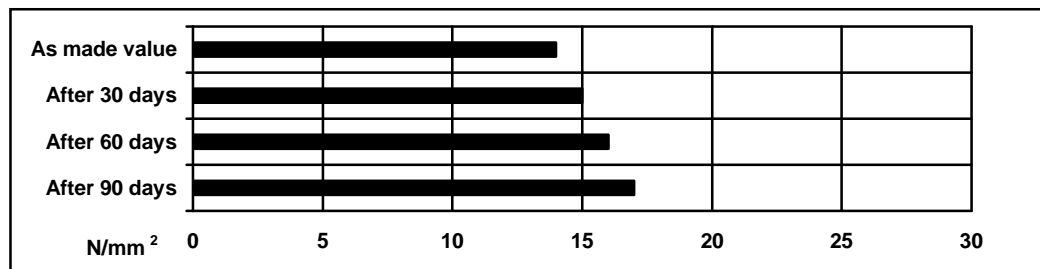
Unless otherwise stated, L.S.S. was determined after immersion for 90 days at 23°C



Lap shear strength versus tropical weathering

(40/92, DIN 50015; typical average values)

Test at 23°C

**Storage**

Araldite® AV 138M-1 and Hardener HV 998 may be stored for up to 6 years and 3 years respectively at room temperature provided that the components are stored in sealed containers. The expiry date is indicated on the label.

**Handling
Precautions****Caution**

Our products are generally quite harmless to handle provided that certain precautions normally taken when handling chemicals are observed. The uncured materials must not, for instance, be allowed to come into contact with food-stuffs or food utensils, and measures should be taken to prevent the uncured materials from coming in contact with the skin, since people with particularly sensitive skin may be affected. The wearing of impervious rubber or plastic gloves will normally be necessary; likewise the use of eye protection. The skin should be thoroughly cleansed at the end of each working period by washing with soap and warm water. The use of solvents is to be avoided. Disposable paper - not cloth towels - should be used to dry the skin. Adequate ventilation of the working area is recommended. These precautions are described in greater detail in the Material Safety Data sheets for the individual products and should be referred to for fuller information.

Huntsman Advanced Materials warrants only that its products meet the specifications agreed with the buyer. Typical properties, where stated, are to be considered as representative of current production and should not be treated as specifications.

The manufacture of materials is the subject of granted patents and patent applications; freedom to operate patented processes is not implied by this publication.

While all the information and recommendations in this publication are, to the best of our knowledge, information and belief, accurate at the date of publication, NOTHING HEREIN IS TO BE CONSTRUED AS A WARRANTY, EXPRESS OR OTHERWISE.

IN ALL CASES, IT IS THE RESPONSIBILITY OF THE USER TO DETERMINE THE APPLICABILITY OF SUCH INFORMATION AND RECOMMENDATIONS AND THE SUITABILITY OF ANY PRODUCT FOR ITS OWN PARTICULAR PURPOSE.

The behaviour of the products referred to in this publication in manufacturing processes and their suitability in any given end-use environment are dependent upon various conditions such as chemical compatibility, temperature, and other variables, which are not known to Huntsman Advanced Materials. It is the responsibility of the user to evaluate the manufacturing circumstances and the final product under actual end-use requirements and to adequately advise and warn purchasers and users thereof.

Products may be toxic and require special precautions in handling. The user should obtain Safety Data Sheets from Huntsman Advanced Materials containing detailed information on toxicity, together with proper shipping, handling and storage procedures, and should comply with all applicable safety and environmental standards.

Hazards, toxicity and behaviour of the products may differ when used with other materials and are dependent on manufacturing circumstances or other processes. Such hazards, toxicity and behaviour should be determined by the user and made known to handlers, processors and end users.

Except where explicitly agreed otherwise, the sale of products referred to in this publication is subject to the general terms and conditions of sale of Huntsman Advanced Materials LLC or of its affiliated companies including without limitation, Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA, Huntsman Advanced Materials Americas Inc., and Huntsman Advanced Materials (Hong Kong) Ltd.

Huntsman Advanced Materials is an international business unit of Huntsman Corporation. Huntsman Advanced Materials trades through Huntsman affiliated companies in different countries including but not limited to Huntsman Advanced Materials LLC in the USA and Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA in Europe.

Araldite is a registered trademark of Huntsman Corporation or an affiliate thereof.

Copyright © 2008 Huntsman Corporation or an affiliate thereof. All rights reserved.

Huntsman Advanced Materials

(Switzerland) GmbH
Klybeckstrasse 200
4057 Basel
Switzerland

Tel: +41 (0)61 299 11 11
Fax: +41 (0)61 299 11 12

www.huntsman.com/advanced_materials
Email: advanced_materials@huntsman.com

ANEXO B. Adesivo Sikaforce® 7818 L7

Product Data Sheet

Version 5/2013 (04/2014)

SikaForce®-7818 L7

High-Performance, Non-Sagging Structural Adhesive for Wind Turbine Bonding Applications

Technical Data

	Comp. A: SikaForce®- 7818 L7	Comp. B: SikaForce®- 7050
Chemical Base	Polyols	Isocyanate derivatives
Colour (CQP ¹ 001-1) Colour - Mixed	White	Brown
	Beige	
Cure Mechanism	Polyaddition	
Density (CQP 553-2) Density - Mixed (calculated)	1.23 g/cm ³ approx	1.24 g/cm ³ approx
	1.23 g/cm ³ approx	
Mixing Ratio ³	By volume (recommended) By weight	
	100 : 45 100 : 45	
Solids Contents	100%	
Viscosity ² (CQP 538-2)	Brookfield - RVT 7/5 Brookfield - RVT 5/10	
	500 Pa·s approx 35 Pa·s approx	
Consistency - Mixed	Thixotropic paste	
Application Temperature	15°C to 30°C	
Application Time ² (CQP 536-3)	3 min. approx.	
Pot Life ² (CQP 536-3)	7 minutes approx	
Shore D-Hardness (CQP 537-2/DIN 53505)	75 approx	
Tensile Strength (CQP 545-2/ISO 527)	35 N/mm ² approx	
Elongation at Break (CQP 545-2/ISO 527)	2.5% approx	
Elastic Modulus (CQP 545-2/ISO 5270)	2500 N/mm ² approx	
Tensile Lap-Shear Strength (CQP 546-2/ISO 4587)	20 N/mm ² approx	
Glass Transition Temperature (CQP 509-1/ISO 4663)	45°C	
Shelf Life (CQP 016-1)	Drums	12 months 6 months
	Cartridges, Cans and Pails	9 months
¹ CQP: Corporate Quality Procedure ² 23°C and 50% Relative Humidity ³ For cartridges, the mixing ratio is 2 : 1.		

Description

SikaForce®-7818 L7 is the base-part of a two-component polyurethane adhesive used with the hardener, SikaForce®-7050. SikaForce®-7818 L7 is manufactured in accordance with the ISO 9001/14001, quality assurance system.

Product Benefits

- Excellent non-sag behaviour;
- Short application- and curing-time;
- High strength and modulus for structural bonding applications.

Areas of Application

SikaForce®-7818 L7 is used in various bonding applications in the wind turbine manufacturing process, e.g. the attachment of mounting parts, lightning protection, etc. This product is suitable for professional experienced applicators only. Tests with actual substrates and conditions must first be performed to ensure adhesion and material compatibility.



Cure Mechanism	SikaForce®-7818 L7 cures as the result of a chemical reaction between the two components. Higher temperatures speed up the curing process, while lower temperatures slow it down.
Environmental Resistance	We recommend project-related testing based on anticipated chemical and/or thermal exposure. Please consult the Technical Services Department of Sika Industry for advice.
Surface Preparation	It is reasonable to expect that the surfaces will need to be adequately prepared prior to bonding if optimal adhesion and strength is to be achieved. Based on the surface condition and type of material, physical and/or chemical pre-treatment may be required after the cleaning process. Advice on specific applications is available from the Technical Services Department of Sika Industry.
Mixing	Thoroughly stir the base Component A in its original packaging before undertaking to mix it with Component B. Pour the desired amount of Component A into a mixing pot and add to it the hardener (Component B) at a rate of 45 parts for every 100 parts of Component A. Stir constantly until a homogeneous mixture is obtained. Apply the mixed adhesive within the Application Time. For more detailed information, please contact Sika Industry's Technical Services Department. It is possible to apply SikaForce®-7818 L7 using automatic application equipment. For advice on selecting and setting up a suitable pump system, please contact the System Engineering Department of Sika Industry.
Removal	Uncured SikaForce®-7818 L7 may be removed from tools and equipment with SikaForce®-7260 Cleaner. Cured material can only be removed mechanically. Hands and exposed skin should be washed immediately using Sika® HandClean towels or other suitable industrial hand cleaner and water. Do not use solvents!
Storage	SikaForce®-7818 L7 must be stored in a dry area at a temperature between 10°C and 30°C. Do not expose to direct sunlight or frost. After the packaging is opened, the contents should be protected from humidity. Minimum temperature during transportation is -20°C for a maximum of 7 days. For Component B, please refer to its individual Product Data Sheet.
Further Information	Copies of the following publications are available upon request: Material Safety Data Sheet.
Packaging	Component A: 1 kg cans; 20 kg pails; 240 kg drums Component B: 0.45 kg cans; 1 kg cans; 5 kg cans; 20 kg pails; 250 kg drums. Two-Part Cartridges: 195 ml.
Value Bases	All technical data stated in this Product Data Sheet are laboratory test-based. Current measured values may vary due to factors beyond our influence.
Health and Safety Information	For information and advice on the safe handling, storage and disposal of chemical products, users should refer to the current Material Safety Data Sheet containing physical, ecological, toxicological and other safety-related data for the appropriate type of substance. Product Data Sheets and Material Safety Data Sheets are available on our website at: www.sika.ca or via your local Sika representative.

The information, and in particular, the recommendations relating to the application and end-use of Sika products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions, within their shelf life. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any recommendations, or from any other advice offered. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users should always refer to the most recent issue of the Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request or can be accessed in the Internet under www.sika.ca.

Sika Canada Inc.
601 Delmar Avenue
Pointe-Claire, QC H9R 4A9
Tel.: 514-697-2610
Fax: 514-697-3910

1-800-689-SIKA
www.sika.ca

An ISO 9001 certified company
Pointe-Claire : ISO 14001 certified EMS



ANEXO C. TABELA DE DECAIMENTO DO ISÓTOPO ^{192}Ir

QSA GLOBAL

Source Certificate

Radionuclide: *I-192*
 ISO/ANSI Classification: *97C64515*
 IAEA Special Form Reference Number: *USA/0335/S-96*
 Measured Equivalent Activity on *Jun-06-2023* **66.4 Ci** **2.5 TBq**

Holder/Capsule # **71859M / 64272M**
 Source Model: *A424-9*
 Product Code: *ICECK060*
 Sales Order: *18604* **SERVICIOS DE CONTROL E INSPECC**

Source Physical Size:	
Diameter	2.000 (mm) 0.079 (in)
Length	1.875 0.074
Diagonal	2.741 0.108

Quality Control Tests	
Wipe Test A:	<0.00045 uCi
Vacuum Bubble Test:	Passed
Tensile Test:	Passed
Wipe Test B:	<0.00045 uCi

Decay Data:

Technician: *kye*

Activity in Curies						
Date	Date +1	Date +2	Date +3	Date +4	Date +5	Date +6
66.4	65.8	65.2	64.6	64.0	63.4	62.8
62.2	61.6	61.0	60.4	59.9	59.3	58.8
58.2	57.7	57.1	56.6	56.1	55.5	55.0
54.5	54.0	53.5	53.0	52.5	52.0	51.5
51.0	50.6	50.1	49.6	49.2	48.7	48.2
47.8	47.4	46.9	46.5	46.0	45.6	45.2
44.8	44.3	43.9	43.5	43.1	42.7	42.3
41.9	41.5	41.1	40.7	40.4	40.0	39.6
39.2	38.9	38.5	38.2	37.8	37.4	37.1
36.7	36.4	36.1	35.7	35.4	35.1	34.7
34.4	34.1	33.8	33.5	33.1	32.8	32.5
32.2	31.9	31.6	31.3	31.0	30.7	30.5
30.2	29.9	29.6	29.3	29.1	28.8	28.5
28.2	28.0	27.7	27.5	27.2	27.0	26.7
26.5	26.2	26.0	25.7	25.5	25.2	25.0
24.8	24.5	24.3	24.1	23.9	23.6	23.4
23.2	23.0	22.8	22.5	22.3	22.1	21.9
21.7	21.5	21.3	21.1	20.9	20.7	20.5
20.3	20.1	20.0	19.8	19.6	19.4	19.2
19.0	18.9	18.7	18.5	18.3	18.2	18.0
17.8	17.7	17.5	17.3	17.2	17.0	16.9
16.7	16.5	16.4	16.2	16.1	15.9	15.8
15.6	15.5	15.3	15.2	15.1	14.9	14.8
14.6	14.5	14.4	14.2	14.1	14.0	13.8
13.7	13.6	13.5	13.3	13.2	13.1	13.0
12.8	12.7	12.6	12.5	12.4	12.2	12.1
12.0	11.9	11.8	11.7	11.6	11.5	11.4
11.3	11.1	11.0	10.9	10.8	10.7	10.6
10.5	10.4	10.3	10.2	10.1	10.0	10.0
9.9	9.8	9.7	9.6	9.5	9.4	9.3
9.2	9.2	9.1	9.0	8.9	8.8	8.7
8.7	8.6	8.5	8.4	8.3	8.3	8.2
8.1	8.0	7.9	7.9	7.8	7.7	7.7
7.6	7.5	7.4	7.4	7.3	7.2	7.2
7.1	7.0	7.0	6.9	6.8	6.8	6.7
6.6	6.6	6.5	6.5	6.4	6.3	6.3
6.2	6.2	6.1	6.1	6.0	5.9	5.9
5.8	5.8	5.7	5.7	5.6	5.6	5.5
5.5	5.4	5.4	5.3	5.3	5.2	5.2
5.1	5.1	5.0	5.0	4.9	4.9	4.8
4.8	4.7	4.7	4.7	4.6	4.6	4.5
4.5	4.4	4.4	4.4	4.3	4.3	4.2
4.2	4.2	4.1	4.1	4.0	4.0	4.0
3.9	3.9	3.9	3.8	3.8	3.7	3.7
3.7	3.6	3.6	3.6	3.5	3.5	3.5
3.4	3.4	3.4	3.4	3.3	3.3	3.3
3.2	3.2	3.2	3.1	3.1	3.1	3.0
3.0	3.0	3.0	2.9	2.9	2.9	2.9
2.8	2.8	2.8	2.8	2.7	2.7	2.7
2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5
2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.3
2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2

Activity in Tera-Becquerels						
Date	Date +1	Date +2	Date +3	Date +4	Date +5	Date +6
2.45	2.43	2.41	2.39	2.36	2.34	2.32
2.30	2.27	2.25	2.23	2.21	2.19	2.17
2.15	2.13	2.11	2.09	2.07	2.05	2.03
2.01	1.99	1.97	1.96	1.94	1.92	1.90
1.88	1.87	1.85	1.83	1.82	1.80	1.78
1.76	1.75	1.73	1.72	1.70	1.68	1.67
1.65	1.63	1.62	1.60	1.49	1.57	1.56
1.55	1.53	1.52	1.50	1.49	1.48	1.46
1.45	1.43	1.42	1.41	1.39	1.38	1.37
1.35	1.34	1.33	1.32	1.30	1.29	1.28
1.27	1.26	1.25	1.23	1.22	1.21	1.20
1.19	1.18	1.16	1.15	1.14	1.13	1.12
1.11	1.10	1.09	1.08	1.07	1.06	1.05
1.04	1.03	1.02	1.01	1.00	0.99	0.98
0.98	0.96	0.96	0.95	0.94	0.93	0.92
0.91	0.90	0.89	0.89	0.88	0.87	0.86
0.85	0.85	0.84	0.83	0.82	0.81	0.81
0.80	0.79	0.78	0.78	0.77	0.76	0.75
0.75	0.74	0.74	0.73	0.72	0.71	0.71
0.70	0.69	0.69	0.68	0.67	0.67	0.66
0.65	0.65	0.64	0.64	0.63	0.62	0.62
0.61	0.61	0.60	0.59	0.59	0.58	0.58
0.57	0.57	0.56	0.56	0.55	0.55	0.54
0.54	0.53	0.53	0.52	0.52	0.51	0.51
0.50	0.50	0.49	0.49	0.48	0.48	0.48
0.47	0.46	0.46	0.46	0.45	0.45	0.44
0.44	0.44	0.43	0.43	0.42	0.42	0.42
0.41	0.41	0.40	0.40	0.39	0.39	0.39
0.38	0.38	0.38	0.37	0.37	0.37	0.37
0.36	0.36	0.35	0.35	0.35	0.34	0.34
0.34	0.34	0.33	0.33	0.32	0.32	0.32
0.32	0.31	0.31	0.31	0.30	0.30	0.30
0.29	0.29	0.29	0.29	0.28	0.28	0.28
0.28	0.27	0.27	0.27	0.27	0.26	0.26
0.26	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.24
0.24	0.24	0.24	0.24	0.23	0.23	0.23
0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.21	0.21
0.21	0.21	0.21	0.21	0.20	0.20	0.20
0.20	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.17
0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.16
0.16	0.16	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15
0.15	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14	0.14
0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13
0.13	0.13	0.13	0.13	0.12	0.12	0.12
0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10
0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09
0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08
0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08

ANEXO D. TABELA DE DECAIMENTO DO ISÓTOPO ^{75}SE

Source Certificate

Radionuclide: **Se75**
 ISO/ANSI Classification: **97C64515**
 IAEA Special Form Reference Number: **USA0335/S-96**
 Measured Equivalent Activity on **78.7 Ci** **2.9 TBq**

Holder/Capsule # **SE8471 / 62990M**
 Source Model: **A424-25W**
 Product Code: **SCUAE080**
 Sales Order: **18390** **SERVICIOS DE CONTROL E INSPECC**

Source Physical Size:	
Diameter	3.250 (mm) 0.128 (in)
Length	.000 0.000
Diagonal	3.524 0.139

Quality Control Tests		Jun-14-2023
Wipe Test A:	<0.00045 uCi	
Vacuum Bubble Test:	Passed	
Tensile Test:	Passed	
Wipe Test B:	<0.00045 uCi	

Decay Data:

Technician: *Bill*

Activity in Curies						Activity in Tera-Becquerels							
Date	Date +1	Date +2	Date +3	Date +4	Date +5	Date +6	Date	Date +1	Date +2	Date +3	Date +4	Date +5	Date +6
78.7	78.3	77.8	77.4	76.9	76.5	76.1	Jun-15-23	2.91	2.89	2.87	2.86	2.84	2.83
75.6	75.2	74.8	74.3	73.9	73.5	73.0	Jun-22-23	2.79	2.78	2.76	2.74	2.73	2.71
72.6	72.2	71.8	71.4	71.0	70.6	70.2	Jun-29-23	2.68	2.67	2.65	2.64	2.62	2.61
69.7	69.3	68.9	68.5	68.2	67.8	67.4	Jul-06-23	2.57	2.56	2.54	2.53	2.52	2.50
67.0	66.6	66.2	65.8	65.5	65.1	64.7	Jul-13-23	2.47	2.46	2.44	2.43	2.42	2.40
64.3	64.0	63.6	63.2	62.9	62.5	62.1	Jul-20-23	2.37	2.36	2.35	2.33	2.32	2.31
61.8	61.4	61.1	60.7	60.4	60.0	59.7	Jul-27-23	2.28	2.27	2.26	2.24	2.23	2.22
59.3	59.0	58.7	58.3	58.0	57.6	57.3	Aug-03-23	2.19	2.18	2.17	2.15	2.14	2.12
57.0	56.7	56.3	56.0	55.7	55.4	55.0	Aug-10-23	2.10	2.09	2.08	2.07	2.06	2.04
54.7	54.4	54.1	53.8	53.5	53.2	52.9	Aug-17-23	2.02	2.01	2.00	1.99	1.97	1.96
52.6	52.3	52.0	51.7	51.4	51.1	50.8	Aug-24-23	1.94	1.93	1.92	1.91	1.90	1.87
50.5	50.2	49.9	49.6	49.3	49.0	48.8	Aug-31-23	1.86	1.85	1.84	1.83	1.82	1.81
48.5	48.2	47.9	47.6	47.4	47.1	46.8	Sep-07-23	1.79	1.78	1.77	1.76	1.75	1.74
46.6	46.3	46.0	45.8	45.5	45.2	45.0	Sep-14-23	1.72	1.71	1.70	1.69	1.68	1.67
44.7	44.4	44.2	43.9	43.7	43.4	43.2	Sep-21-23	1.65	1.64	1.63	1.62	1.61	1.60
42.9	42.7	42.4	42.2	42.0	41.7	41.5	Sep-28-23	1.58	1.57	1.56	1.55	1.54	1.53
41.2	41.0	40.8	40.5	40.3	40.1	39.8	Oct-05-23	1.52	1.51	1.50	1.49	1.48	1.47
39.6	39.4	39.1	38.9	38.7	38.5	38.3	Oct-12-23	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41
38.0	37.8	37.6	37.4	37.2	36.9	36.7	Oct-19-23	1.40	1.39	1.39	1.38	1.37	1.36
36.5	36.3	36.1	35.9	35.7	35.5	35.3	Oct-26-23	1.35	1.34	1.33	1.32	1.31	1.30
35.1	34.9	34.7	34.5	34.3	34.1	33.9	Nov-02-23	1.29	1.29	1.28	1.27	1.26	1.25
33.7	33.5	33.3	33.1	32.9	32.7	32.5	Nov-09-23	1.24	1.23	1.23	1.22	1.21	1.20
32.4	32.2	32.0	31.8	31.6	31.4	31.2	Nov-16-23	1.19	1.19	1.18	1.17	1.16	1.15
31.1	30.9	30.7	30.5	30.4	30.2	30.0	Nov-23-23	1.15	1.14	1.13	1.12	1.11	1.11
29.8	29.7	29.5	29.3	29.2	29.0	28.8	Nov-30-23	1.10	1.09	1.09	1.08	1.08	1.07
28.7	28.5	28.3	28.2	28.0	27.8	27.7	Dec-07-23	1.06	1.05	1.04	1.04	1.03	1.02
27.5	27.4	27.2	27.0	26.9	26.7	26.6	Dec-14-23	1.01	1.01	1.00	0.99	0.98	0.98
26.4	26.3	26.1	26.0	25.8	25.7	25.5	Dec-21-23	0.97	0.97	0.96	0.96	0.95	0.95
25.4	25.2	25.1	24.9	24.8	24.7	24.5	Dec-28-23	0.93	0.93	0.92	0.92	0.91	0.90
24.4	24.2	24.1	24.0	23.8	23.7	23.5	Jan-04-24	0.90	0.89	0.89	0.88	0.88	0.87
23.4	23.3	23.1	23.0	22.9	22.7	22.6	Jan-11-24	0.86	0.86	0.85	0.85	0.84	0.83
22.5	22.4	22.2	22.1	22.0	21.8	21.7	Jan-18-24	0.83	0.82	0.82	0.81	0.81	0.80
21.6	21.5	21.3	21.2	21.1	21.0	20.9	Jan-25-24	0.79	0.79	0.78	0.78	0.78	0.77
20.7	20.6	20.5	20.4	20.3	20.1	20.0	Feb-01-24	0.76	0.76	0.75	0.75	0.75	0.74
19.9	19.8	19.7	19.6	19.5	19.3	19.2	Feb-08-24	0.73	0.73	0.72	0.72	0.72	0.71
19.1	19.0	18.9	18.8	18.6	18.5	18.5	Feb-15-24	0.70	0.70	0.69	0.69	0.69	0.68
18.4	18.3	18.2	18.1	17.9	17.8	17.7	Feb-22-24	0.68	0.67	0.67	0.66	0.66	0.65
17.6	17.5	17.4	17.3	17.2	17.1	17.0	Feb-29-24	0.65	0.64	0.64	0.64	0.63	0.62
16.9	16.8	16.7	16.6	16.5	16.4	16.4	Mar-07-24	0.62	0.62	0.61	0.61	0.61	0.60
16.3	16.2	16.1	16.0	15.9	15.8	15.7	Mar-14-24	0.60	0.59	0.59	0.58	0.58	0.58
15.6	15.5	15.4	15.3	15.2	15.1	15.1	Mar-21-24	0.57	0.57	0.56	0.56	0.56	0.55
15.0	14.9	14.8	14.7	14.7	14.6	14.5	Mar-28-24	0.55	0.55	0.54	0.54	0.54	0.53
14.4	14.3	14.2	14.1	14.0	13.9	13.9	Apr-04-24	0.53	0.52	0.52	0.52	0.51	0.51
13.8	13.8	13.7	13.6	13.5	13.4	13.4	Apr-11-24	0.51	0.51	0.50	0.50	0.49	0.49
13.3	13.2	13.1	13.0	12.9	12.8	12.8	Apr-18-24	0.49	0.48	0.48	0.48	0.48	0.47
12.8	12.7	12.6	12.5	12.5	12.4	12.3	Apr-25-24	0.47	0.46	0.46	0.46	0.45	0.45
12.3	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	11.8	May-02-24	0.45	0.45	0.44	0.44	0.44	0.43
11.8	11.7	11.6	11.5	11.4	11.4	11.4	May-09-24	0.43	0.43	0.42	0.42	0.42	0.42
11.3	11.2	11.1	11.0	11.0	10.9	10.9	May-16-24	0.41	0.41	0.41	0.41	0.40	0.40
10.9	10.8	10.7	10.6	10.5	10.5	10.5	May-23-24	0.40	0.39	0.39	0.39	0.38	0.38
10.4	10.4	10.3	10.2	10.1	10.1	10.1	May-30-24	0.38	0.38	0.37	0.37	0.37	0.37
10.0	10.0	9.9	9.8	9.8	9.7	9.7	Jun-06-24	0.37	0.37	0.36	0.36	0.35	0.35