

Estudo Paramétrico de Juntas Adesivas em Material Compósito

José Alexandre Baptista Pais Neto

Dissertação submetida à

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Para obtenção do grau de

Mestre em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Professor Lucas Filipe Martins da Silva

Professor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Julho de 2011

Resumo

Este trabalho teve como objectivo o estudo de juntas adesivas de simples sobreposição, tendo como substrato material compósito, com o intuito de avaliar qual o melhor método para prever a resistência de tais juntas. De facto as juntas em material compósito oferecem novos desafios em comparação com as juntas com substratos em aço ou alumínio. A resistência do material compósito nas direcções opostas às das fibras é significativamente inferior.

Também foi feita a caracterização do adesivo 7888 da SikaForce[®], nomeadamente ensaios de provetes maciços à tracção, *Double Cantilever Beam* (DCB) e *End Notch Flexure* (ENF), para se obter as propriedades mecânicas à tracção e a taxa de libertação de energia em modo I e modo II, respectivamente. As propriedades do adesivo AV138 da Huntsmann[®] foram obtidas de trabalhos anteriores.

Foram realizadas juntas adesivas em material compósito utilizando um adesivo frágil (AV138 da HUNSTMANN[®]) e um adesivo dúctil (7888 da SikaForce[®]). As juntas foram testadas em tracção e utilizaram-se vários métodos analíticos, e o método dos elementos finitos com elementos coesivos para prever a resistência dessas mesmas juntas.

Esta análise permitiu uma percepção crítica das capacidades de cada um dos métodos na previsão da resistência das juntas dependendo das características do adesivo.

Abstract

The main purpose of this work was the study of single-lap adhesively-bonded joints with composites adherents, to evaluate the best methods to predict their strength. In fact, adhesive joints in composite structures bring new challenges in comparison to the traditional ones with steel or aluminum adherents. Actually, the transverse and peel directions their strength is significant lower, as it is ruled by the matrix properties.

A comprehensive characterization of the adhesive 7888 from SikaForce[®] was initially performed, namely bulk, *Double Cantilever Beam* (DCB) and *End Notch Flexure* (ENF) tests, to obtain the mechanical proprieties such as the strength and the critical strain energy release rates in mode I and mode II, respectively. On the other hand, the relevant properties for the adhesive AV138 from Huntsmann[®] were obtained from previous works.

Adhesive joints were fabricated with a fragile (AV138 from Huntsmann[®]) and a ductile adhesive (7888 from SikaForce[®]). The joints were tested in tension and several analytical methods, and also the numerical methology of finite element analysis with cohesive zone elements, were used to predict the strength of the joints.

This analysis allowed a critical perception of the capabilities of each method in predicting the joint strength, depending on the adhesive characteristics.

Agradecimentos

Fico grato ao Professor Raul Campilho pela sua grande ajuda e disponibilidade em todos os momentos da minha dissertação, agradeço também o facto de ter criado os modelos numéricos em Abaqus[®] que sem dúvida enriqueceram este trabalho.

Agradeço ao Professor Lucas da Silva pela sua orientação e conselhos dados durante este trabalho.

Gostaria de agradecer ao Eng.º Filipe Chaves toda a disponibilidade e ajuda no fabrico e ensaio dos provetes DCB e ENF.

Agradeço também a todos os membros restantes do grupo de adesivos pela sua ajuda.

Por fim agradeço à minha família pelo seu apoio.

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Definição do problema.....	1
1.2	Objectivos	1
1.3	Metodologia utilizada	2
1.4	Plano da Tese	2
2	Recolha Bibliográfica.....	3
2.1	Introdução ao estado de arte dos adesivos estruturais	3
2.2	Adesivos.....	6
2.3	Materiais compósitos	8
2.3.1	Introdução.....	8
2.3.2	Plástico reforçado com fibras (FRP)	9
2.3.3	Propriedades mecânicas dos FRP.....	10
2.3.4	Plástico reforçado a fibras de carbono (CFRP).....	11
2.4	Previsão da resistência de juntas adesivas	13
2.4.1	Mecânica dos meios contínuos.....	13
2.4.2	Mecânica da fractura	21
2.4.3	Modelos de dano coesivo (MDC).....	25
2.4.4	Trabalhos realizados em juntas adesivas em materiais compósitos	27
3	Trabalho experimental.....	30
3.1	Fabrico de provetes para caracterização do adesivo PU 7888 VP (LP) SikaForce®	30
3.1.1	Fabrico dos provetes maciços.....	30
3.1.2	Fabrico dos provetes DCB e ENF	34
3.2	Fabrico das juntas adesivas.....	39
3.2.1	Fabrico das placas de compósito	39
3.2.2	Cura das placas	42
3.2.3	Corte das placas e acabamento final.....	44
3.2.4	Preparação das superfícies.....	45
3.2.5	Colagem dos substratos	46
3.2.6	Preparação dos provetes	46
3.2.7	Geometria dos provetes	47

3.3	Ensaio	47
3.3.1	Ensaio de caracterização do adesivo 7888 L10 (VP) da SikaForce®	47
3.3.2	Ensaio de tracção de juntas de sobreposição simples	52
4	Resultados experimentais	53
4.1	Propriedades dos Materiais	53
4.1.1	Substratos em material compósitos	53
4.1.2	Substrato em aço	53
4.1.3	Adesivo AV138 da HUNSTMAN®	53
4.1.4	Adesivo 7888 L10 (VP) da SikaForce®	55
4.2	Resultados dos ensaios de tracção dos provetes maciços do adesivo 7888 L10 (VP) SikaForce®	55
4.3	Resultados dos ensaios DCB do adesivo 7888 L10 (VP) SikaForce®	57
4.4	Resultados dos ensaios ENF do adesivo 7888 L10 (VP) SikaForce®	59
4.5	Resultados dos ensaios de tracção das juntas adesivas com o adesivo AV13860	
4.6	Resultados dos ensaios de tracção das juntas adesivas com o adesivo 7888...	62
5	Previsão da resistência das juntas de sobreposição simples	64
5.1	Métodos analíticos	65
5.2	Análise por elementos finitos	65
5.2.1	Critério tensão de corte máxima (CTCM)	65
5.2.2	Elementos coesivos	66
5.3	Resultados	69
6	Conclusões e trabalhos futuros	75
6.1	Conclusões	75
6.2	Trabalhos futuros	76
	Referências	77
	ANEXO A	80
	ANEXO B	82
	ANEXO C	84
	ANEXO D	86

Lista de Figuras

Figura 1 - Partes constituintes de um avião fixadas através do processo de colagem [3]	4
Figura 2 - Avião <i>Mosquito</i>	4
Figura 3 - Comparação da distribuição de tensões de uma junta rebitada e colada [5]....	5
Figura 4 - Representação esquemática dos modos de rotura em juntas adesivas de sobreposição simples	6
Figura 5 - Áreas envolvidas na tecnologia da adesão [5]	7
Figura 6- Betão Armado	9
Figura 7 - Carro Formula 1	12
Figura 8 - Super Desportivo Mosler MT900	13
Figura 9 - Boeing 787 Dreamliner	13
Figura 10 - Modelo de Volkersen	14
Figura 11 - Efeito momento flector modelo de Goland e Reissner	16
Figura 12 - Modos de Rotura nas Juntas Adesivas.....	21
Figura 13 - Representação esquemática do ensaio DCB	23
Figura 14 - Representação Esquemática Ensaio ENF	24
Figura 15 – Utilização de elementos coesivos para modelação da camada de adesivo numa junta de sobreposição simples	25
Figura 16 - Lei coesiva triangular	26
Figura 17 - Geometria dos provetes utilizados por Kim et al. [19]	28
Figura 18 - Junta de dupla sobreposição com ângulo de saída no adesivo [18].....	29
Figura 19 - Dimensões principais junta ondulada	30
Figura 20 - Molde utilizado para fabrico de provetes maciços	31
Figura 21 – Desmoldante Frekote® 770-NC e Acetona	32
Figura 22- Pistola, bico e adesivo 7888 LP SikaForce®	32
Figura 23 - Aplicação do adesivo por injeção.	33
Figura 24 - Série de provetes maciços Adesivo SikaForce® 7888 L10 (VP).....	34
Figura 25- Granalhadora do Laboratório de Adesivos	35
Figura 26- Localização das fitas calibradas.....	36
Figura 27 - Fitas calibradas	36
Figura 28 - Molde utilizado para fabrico provetes DCB e ENF.....	37
Figura 29 - Braços dos provetes colocados no molde com os calços de fita calibrada..	38
Figura 30 - Proвете ENF com escala colada e pintado com líquido corretor.....	39
Figura 31 - Corte do compósito.....	40
Figura 32 - Aquecimento das folhas para melhor adesão.....	41
Figura 33 - Pormenor da colocação de fita-cola ao longo da placa.....	41
Figura 34 - Colocação da placa de compósito revestido com Teflon® na prensa	42
Figura 35 - Prensa de pratos quentes INTOCO.....	43
Figura 36 - Ciclo térmico para cura das placas de pré-impregnado	43
Figura 37 - Máquina de corte de materiais compósitos.....	44
Figura 38 - Pormenor do corte da placa de compósito	45

Figura 39 - Superfícies dos substratos após lixagem.....	45
Figura 40 - Provetes durante processo de cura.....	46
Figura 41 - Remoção dos excessos de adesivo.....	47
Figura 42 - Pormenor do extensómetro montado no provete maciço	48
Figura 43 - Máquina de ensaios do LET	49
Figura 44 - Dimensões dos provetes DCB	49
Figura 45 – Registo do crescimento da fenda durante ensaio DCB	50
Figura 46 - Ensaio ENF	51
Figura 47 – Dimensões dos provete para ensaio ENF.....	51
Figura 48 - Máquina Ensaio Universal SHIMADZU	52
Figura 49 - Geometria das juntas de simples sobreposição.....	52
Figura 50 - Curvas Tensão/Deformação do adesivo AV138 [26].....	54
Figura 51 - Adesivo AV138M com endurecedor HV 998	54
Figura 52 - Dimensões provetes maciços segundo norma EN ISO 527-2	55
Figura 53- Provede maciço de adesivo 7888 após ensaio bulk.....	56
Figura 54 - Curva σ - ϵ do adesivo 7888 L10 (VP).....	56
Figura 55 - Curva P - δ típica para um ensaio DCB.....	57
Figura 56 - Rotura observada nos provetes dos ensaios DCB com adesivo SikaForce® 7888	58
Figura 57 - Sika Aktivator 205	58
Figura 58 – Curva P – δ obtida no ensaio ENF.....	59
Figura 59 - Curva R do ensaio ENF	60
Figura 60 – Rotura coesiva nas juntas com 10 mm sobreposição com adesivo AV138	61
Figura 61 - Rotura intralaminar nas juntas com 40 mm de sobreposição com o adesivo AV138	61
Figura 62 - Resultado experimentais ensaios tracção juntas com AV138	62
Figura 63 - Roturas obtidas nas juntas com comprimento de sobreposição de 50 mm..	63
Figura 64 - Rotura no compósito observado em algumas juntas de sobreposição simples com 80 mm de sobreposição	63
Figura 65 - Resultado experimentais ensaios tracção das juntas com 7888.....	64
Figura 66 - Ponto em que se atingiu a rotura no adesivo AV138 pelo critério CTCM..	66
Figura 67 – Junta de sobreposição simples modelada em ABAQUS®	66
Figura 68 - Malha utilizada no modelo $L_0 = 10$ mm	67
Figura 69 - Localização dos diferentes elementos na simulação das juntas.....	68
Figura 70 - Exemplo da Curva P - δ de uma simulação do Abaqus®	68
Figura 71 - Rotura no compósito na simulação da junta de sobreposição simples com o AV138	68
Figura 72 - Rotura no adesivo obtida por simulação na junta de sobreposição simples com adesivo 7888	69
Figura 73 - Gráfico comparativo Experimental vs Modelos Analíticos para juntas com adesivo AV138	70
Figura 74 - Gráfico comparativo valores das forças de rotura Experimental vs Numérico para as juntas com o adesivo AV138.....	71

Figura 75 - Gráfico comparativo Experimental vs Modelos Analíticos para juntas com o adesivo 7888	72
Figura 76 - Gráfico comparativo Experimental vs Numérico para as juntas de sobreposição simples com o adesivo 7888	73
Figura 77 - Gráfico da Curva P- δ ensaio DCB provete 1	80
Figura 78 - Gráfico da Curva P- δ ensaio DCB provete 2	80
Figura 79 - Gráfico da Curva P- δ ensaio DCB provete 5	81
Figura 80 - Gráfico da Curva P- δ ensaio DCB provete 6	81
Figura 81 - Gráfico Curva P- δ ensaio ENF provete 3	82
Figura 82 - Gráfico da Curva R ensaio ENF provete 3	82
Figura 83 - Gráfico Curva P- δ ensaio ENF provete 4	83
Figura 84 - Gráfico da Curva R ensaio ENF provete 4	83
Figura 85 - Curvas F-d das juntas de sobreposição simples com AV138 comprimento de sobreposição de 20 mm	84
Figura 86 - Curvas F-d das juntas de sobreposição simples com AV138 comprimento de sobreposição de 50 mm	85
Figura 87 - Superfície rotura juntas de sobreposição simples com AV138 comprimento de sobreposição de 50 mm	85
Figura 88 - Curvas F-d das juntas de sobreposição simples com 7888 comprimento de sobreposição de 40 mm	86
Figura 89 - Superfície rotura da junta com comprimento de sobreposição de 40 mm com o adesivo 7888	86
Figura 90 - Curvas F-d das juntas de sobreposição simples com 7888 comprimento de sobreposição de 70 mm	87
Figura 91 - Superfície de rotura da junta com comprimento de sobreposição de 70 mm com o adesivo 7888	87

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades típicas de fibras de reforço e polímeros para matriz [8-9].....	10
Tabela 2 – Propriedades típicas de alguns tipos de FRP e metais [8-9].....	11
Tabela 3 - Dados necessário para os cálculos pelo método de Volkersen	15
Tabela 4 - Dados necessários aos cálculos no método de Goland e Reissner	17
Tabela 5 - Dados necessários aos cálculos no modelo de Hart-Smith	19
Tabela 6 - Propriedades mecânicas das placas de CFRP [25].....	53
Tabela 7 - Propriedades dos substratos utilizados nos provetes DCB e ENF [16].....	53
Tabela 8 - Propriedades elásticas e plásticas do adesivo AV138 [26]:.....	53
Tabela 9 - Propriedades do adesivo 7888 L10 (VP):.....	55
Tabela 10 - Força rotura experimental juntas adesivas AV138.....	60
Tabela 11 - Força de rotura experimental das juntas adesivas com o adesivo SikaForce® 7888 L10 (VP).....	62
Tabela 12 - Propriedades dos adesivos para simulação em elementos finitos	67
Tabela 13 - Valores da Força de Rotura para o AV138 pelos métodos analíticos.....	69
Tabela 14 - Valores da força de rotura para o AV138 pelo critério do CTCM e MDC.	70
Tabela 15 - Forças de rotura previstos pelos métodos analíticos para o 7888	72
Tabela 16 - Valores obtidos para a previsão da resistência das juntas pelos métodos numéricos	73

1 Introdução

1.1 Definição do problema

Na procura de reduzir o peso das mais diversas estruturas a indústria recorre cada vez mais aos materiais compósitos. A utilização de materiais compósitos traz novos desafios ao engenheiro projectista quando este necessita de realizar o projecto de juntas adesivas, pois os materiais compósitos na direcção das fibras são muito resistentes e rígidos, mas as propriedades na direcção transversa e ao corte são bastante inferiores. Com a utilização de juntas adesivas com substratos em aço ou alumínio recorrendo a uma simples formulação analítica é possível chegar a uma previsão de resistência bastante válida, contudo quando os substratos são de material compósito é preciso verificar se essa mesma formulação resulta ou não com a mesma eficácia. Por esse motivo é necessário estudar as juntas adesivas em material compósito e analisar os seus modos de rotura, assim como procurar verificar se existe uma forma simples para prever a resistência destas juntas.

1.2 Objectivos

Os objectivos principais deste trabalho sobre juntas adesivas em materiais compósitos são:

- Testar juntas adesivas de sobreposição simples com um adesivo frágil (AV138) e um adesivo dúctil (7888) com substratos em material compósito;
- Verificar os modos de rotura obtidos nos testes das juntas de sobreposição simples;
- Procurar prever a força de rotura das juntas recorrendo a métodos analíticos e métodos numéricos;
- Avaliar os métodos utilizados, e verificar a aplicabilidade de cada um desses métodos;

1.3 Metodologia utilizada

Para se atingir o objectivo deste trabalho seguiu-se a seguinte metodologia:

- Caracterização do adesivo SikaForce[®] 7888, nomeadamente através de ensaios de tracção a provetes maciços, ensaios DCB e ENF, com o objectivo de se obter as propriedades deste adesivo necessárias para as simulações numéricas em ABAQUS[®];
- Fabrico de juntas de sobreposição simples em material compósito com um adesivo frágil (HUNSTAMANN[®] AV138) e um adesivo dúctil (SikaForce[®] 7888);
- Teste das juntas com o objectivo de se obter a força de rotura necessária assim como o tipo de rotura;
- Análise das tensões nas juntas recorrendo a métodos analíticos e numéricos;
- Verificação da aplicabilidade de cada um dos métodos;
- Simulação numérica em ABAQUS[®];

1.4 Plano da Tese

A estrutura da presente tese pode ser apresentada de forma sucinta da seguinte maneira:

No Capítulo 2 é feita uma introdução aos adesivos estruturas, nomeadamente através da história da tecnologia de adesão, as vantagens inerentes a esta tecnologia e os tipos de adesivos existentes. É também feita uma abordagem aos materiais compósitos quer a nível das suas propriedades, mas também da utilização dos mesmos na indústria. Neste capítulo também é feita uma abordagem teórica aos métodos analíticos de análise de tensões em juntas de simples sobreposição, assim como à teoria da mecânica da fractura que está por detrás dos ensaios DCB e ENF. Também é feita uma abordagem teórica aos modelos de dano coesivo assim como é feito um resumo de alguns trabalhos já realizados em juntas adesivas com material compósito.

O Capítulo 3 descreve os procedimentos experimentais realizados neste trabalho para o fabrico dos provetes necessários à caracterização do adesivo SikaForce[®] 7888, descreve também o fabrico das placas de material compósito assim como as subsequentes tarefas necessárias para o fabrico das juntas de sobreposição simples. Além disso também é feita uma descrição dos ensaios realizados.

No Capítulo 4 começa-se por apresentar os valores das propriedades dos materiais utilizados neste trabalho, sendo apresentado de seguida os resultados dos ensaios realizados.

O Capítulo 5 é onde é feita uma análise das tensões recorrendo a métodos analíticos e métodos numéricos. Neste capítulo é feita a comparação dos resultados experimentais com os valores de previsão de resistência das juntas obtidos por métodos analíticos e numéricos.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões resultantes do trabalho desenvolvido e sugestões para o trabalho futuro.

2 Recolha Bibliográfica

2.1 Introdução ao estado de arte dos adesivos estruturais

Desde cedo o Homem sentiu necessidade de unir diferentes materiais através de colagem, prova disso são as pedras com pontas de madeira coladas com alcatrão de casca da bétula datadas de 200.000 AC encontradas numa caverna em Itália [1].

A primeira cola composta terá surgido cerca de 60.000 AC. Foram encontradas em lanças de madeira com gumes de pedra coladas com uma cola formada por goma de planta e ocre vermelho [2].

A tecnologia de ligação por adesivos estruturais é uma tecnologia emergente que permite solucionar muitos problemas associados às técnicas tradicionais (parafusos, rebites, soldadura, etc.). A tecnologia de adesão está presente nas indústrias mais avançadas tecnologicamente (aeronáutica, automóvel, etc.), mas também nas mais tradicionais (calçado, moveis, etc.).

A indústria aeronáutica tem sido a grande responsável pelos avanços conseguidos nas juntas adesivas estruturais. Até ao século XX não se verificaram avanços significativos na tecnologia de adesão (Figura 1). Os adesivos usados nas aeronaves do início do século XX eram adesivos baseados na caseína, substância derivada do leite. Estes adesivos naturais apresentavam problemas quando eram submetidos a ambientes húmidos. A absorção de água fazia com que o adesivo se deteriorasse.

Nos anos 40 do século XX a introdução de adesivos sintéticos poliméricos veio resolver o problema de fraca durabilidade dos adesivos baseados em produtos naturais. O famoso caça britânico *Mosquito* (Figura 2) usava uma resina de ureia-formaleído para colar a sua estrutura de madeira. No entanto este tipo de resina era frágil e fracturava com facilidade.

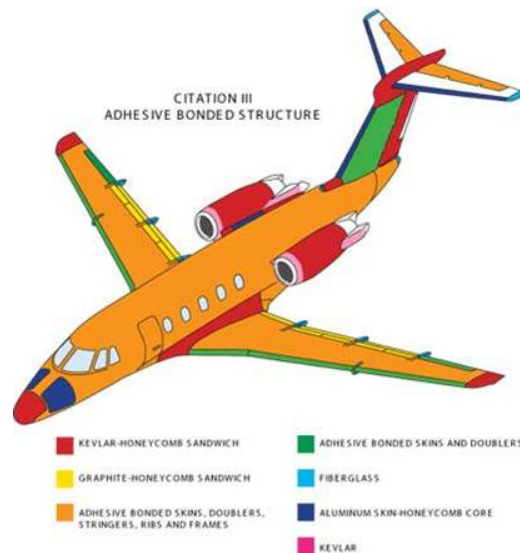


Figura 1 - Partes constituintes de um avião fixadas através do processo de colagem [3]

O problema da fragilidade foi ultrapassado pelo Dr. Bruyne e a sua equipa, que modificaram a química dos adesivos adicionando polímeros com boa tenacidade. Este avanço representou um desenvolvimento muito importante na tecnologia dos adesivos e permitiu a ligação de materiais metálicos com madeira com muito sucesso [4].



Figura 2 - Avião *Mosquito*

A utilização de adesivos estruturais tem vindo a ganhar espaço na indústria devido ao facto de ser uma tecnologia que permite uma melhor distribuição de tensões e diminui as concentrações de tensões que surgem com o uso de parafusos ou rebites [5].

De facto as juntas coladas apresentam vantagens face às uniões tradicionais. Abaixo apresenta-se algumas das principais vantagens e limitações resultantes da aplicação deste tipo de juntas [6].

As principais vantagens das ligações adesivas estruturais são:

- Distribuição praticamente uniforme das tensões na junta colada, em relação à largura, o que permite uma maior rigidez e uma melhor resistência à fadiga (Figura 3).
- Amortecimento de vibrações.
- Ligação de diferentes tipos de materiais.
- Ligação de chapas finas.
- Boa resistência à corrosão.
- Boa capacidade de vedação.
- Possibilidade de ligar formas complexas.
- Permitem ter estruturas com melhor acabamento, pois evitam furos e marcas devido à soldadura.
- Permite redução de custos, pois as ligações com adesivos tendem a ser mais económicas

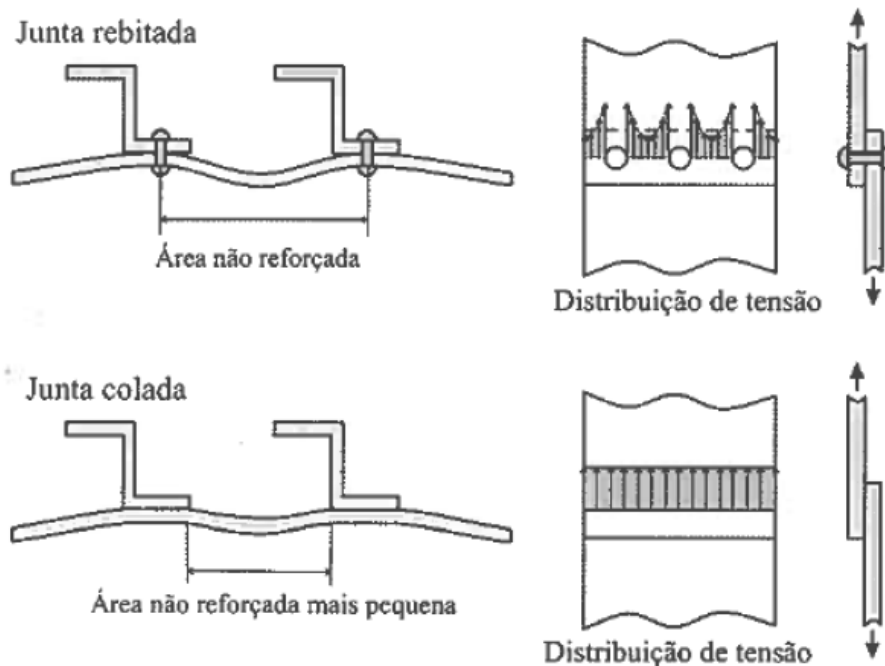


Figura 3 - Comparação da distribuição de tensões de uma junta rebitada e colada [5]

As principais desvantagens em relação à ligação com adesivos são:

- É necessário eliminar as tensões de arrancamento e clivagem.
- Problemas de toxicidade e inflamabilidade.
- Fraca resistência ao fogo e temperatura.
- Necessidade de ferramentas de fixação durante a cura do adesivo.
- Cuidados com preparação das superfícies.

- Resistência limitada a condições extremas de calor e humidade.
- Cura dos adesivos a elevada temperatura (forno ou prensa).

Quando se projecta uma junta, pretende-se que a rotura da mesma se dê pelo substrato. As principais formas de rotura (Figura 4) de uma junta adesiva são:

Rotura coesiva no adesivo: ocorre quando a rotura se dá na região do adesivo, indicando que a resistência do adesivo é menor que a resistência dos substratos e da ligação entre adesivos e substratos.

Rotura coesiva no substrato: quando a rotura ocorre no interior do substrato.

Rotura adesiva: quando a rotura ocorre na interface entre substrato e adesivo.

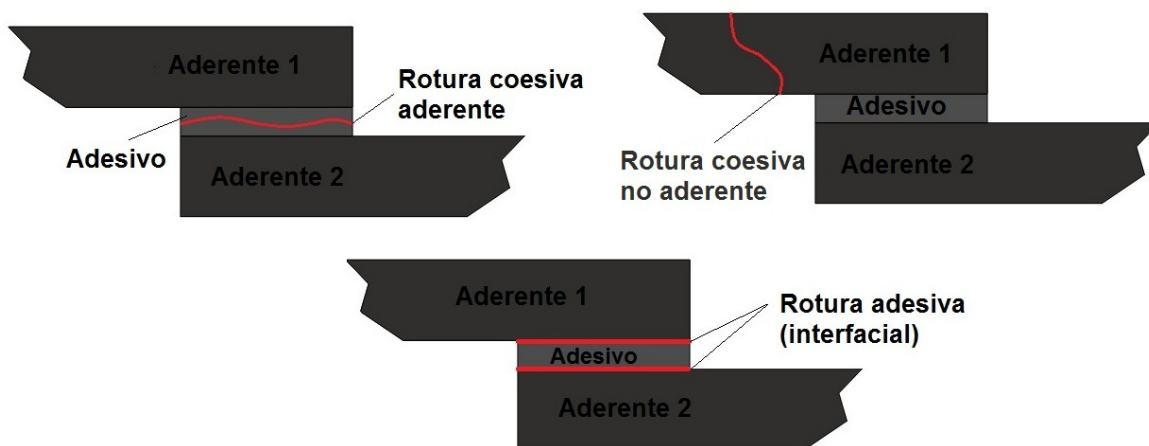


Figura 4 - Representação esquemática dos modos de rotura em juntas adesivas de sobreposição simples

Regra geral a rotura adesiva é geralmente associada a uma má preparação das superfícies dos substratos. Por vezes a rotura ocorre por uma combinação dos referidos modos designando-se por rotura mista [5].

2.2 Adesivos

A tecnologia de adesão é uma ciência que envolve o conhecimento de várias disciplinas (Figura 5). São várias as vertentes que podem influenciar a melhoria da adesão entre as superfícies. A principal função de um adesivo é a de manter ligadas as estruturas, que devem ser capazes de resistir a cargas elevadas sem grande deformação nos mais variados ambientes.

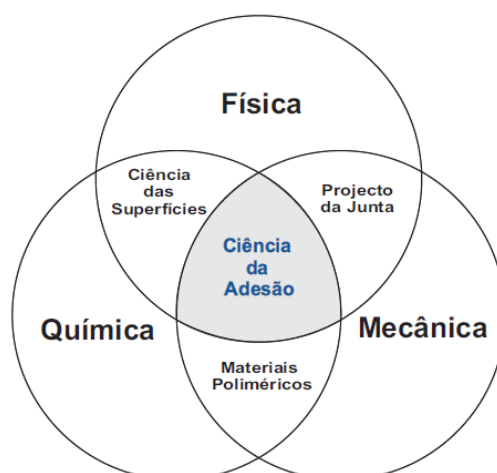


Figura 5 - Áreas envolvidas na tecnologia da adesão [5]

Os adesivos podem ser caracterizados por várias formas, nomeadamente: pela função, materiais a unir, forma física, aplicação e necessidades de cura, durabilidade em serviço e composição química.

Pelo critério da função um adesivo pode ser classificado como sendo estrutural ou não estrutural. Para um adesivo ser considerado adesivo estrutural tem de ter uma resistência ao corte superior entre 5 e 10 MPa. Caso seja inferior o adesivo é considerado adesivo não estrutural. Alguns exemplos de adesivos estruturais são por exemplo os adesivos epóxico, epóxico híbridos e os fenolicos.

Os adesivos também podem ser avaliados pela forma de aplicação e necessidades de cura. Um adesivo pode solidificar através:

- Reacção química – com um endurecedor ou reacção com uma fonte externa de energia como calor, radiação, etc.
- Perda de solvente ou perda de água – endurecido pela evaporação da água ou solvente no ar ou difusão em substratos porosos.
- Arrefecimento – geralmente os termoplásticos que derretem quando aquecidos e depois endurecem ao arrefecer.

Já quanto à composição química é possível distinguir os adesivos como:

- Adesivos termoplásticos. Os adesivos termoplásticos podem ser derretidos com aplicação de calor e posteriormente aplicados aos substratos.
- Adesivos termoendurecíveis. Ao contrário dos adesivos termoplásticos estes adesivos não podem ser plastificados com calor após a cura. Dependendo da sua tipologia, os adesivos termoendurecíveis curam à temperatura ambiente ou altas temperaturas.

- Adesivos elastómeros. Embora os adesivos elastómeros possam ser termoplásticos ou termoendurecíveis, a resina elastómera, na qual estes adesivos são baseados, permite obter grandes capacidades de extensão e compressão. Estas características fazem destes adesivos uma boa escolha para juntas adesivas que sofrem carregamentos não uniformes.
- Adesivos híbridos. O conceito dos adesivos híbridos, é conseguir combinar um ou mais dos tipos de adesivos já referidos para com essa mistura se obter um adesivo com certas propriedades melhoradas. Nem sempre é fácil de conseguir esse propósito devido ao impacto negativo que alguns químicos têm sobre outros adesivos.

Existem vários tipos de adesivos utilizados no processo de adesão, nomeadamente os adesivos epóxicos, fenólicos, acrílicos, poliuretanos, etc. [7]

Os adesivos epóxicos são talvez a família mais versátil de adesivos porque aderem bem a muitos substratos. Estes têm uma excelente resistência à tracção e ao corte mas uma fraca resistência ao arrancamento. Neste trabalho um dos adesivos usados será a Araldite[®] AV138 M do fabricante HUNTSMAN que é um adesivo epóxico.

Outro tipo de adesivo são os poliuretanos, estes adesivos podem encontrar-se 100% sólidos ou dissolvidos num solvente de uma ou duas partes. Os poliuretanos tem uma vasta gama de temperatura de cura, além disso os poliuretanos são flexíveis e tem uma relativa alta resistência ao corte e arrancamento [5]. Neste trabalho será utilizado um adesivo poliuretano, o 7888 L10 (VP), do fabricante SikaForce[®].

2.3 Materiais compósitos

2.3.1 Introdução

Os materiais compósitos são aqueles que na sua constituição possuem pelo menos dois componentes, com propriedades físicas e químicas distintas na sua composição. Quando juntos, estes componentes formam um composto com propriedades impossíveis de se obter com um só deles. Estes materiais compósitos podem surgir pela junção de metais e polímeros, metais e cerâmicos ou polímeros e cerâmicos.

Os materiais que constituem um material compósito podem ser classificados em dois tipos: matriz e reforço.

- A matriz confere estrutura ao material compósito, preenchendo os espaços vazios que ficam entre os reforços e mantendo-os em suas posições relativas

- Os reforços realçam as propriedades mecânicas, electromagnéticas ou químicas do material compósito como um todo.

Já nas civilizações antigas os materiais compósitos eram usados, através de tijolos de lama, constituídos por barro e palha. O betão armado (Figura 6), utilizado na construção civil, é outro exemplo de um material compósito, já que é constituído por cimento com varões de aço, com o intuito de aumentar a resistência à tracção.



Figura 6- Betão Armado

Um exemplo de um material compósito natural é a madeira, pois esta é constituída por células de celulose numa matriz de lenhina. Já a madeira de contraplacado é conseguida através da colagem de várias camadas de madeira. Em comparação com a madeira em bruto a madeira de contraplacado tem maior resistência à fractura, menor variação dimensional e resistência superior.

Um outro exemplo de um material compósito é o metal duro. O metal duro é um material compósito de matriz metálica de alta rigidez onde partículas de carboneto de tungsténio constituem o reforço e o cobalto forma a matriz. O metal duro é largamente utilizado em ferramentas para a indústria metalomecânica.

2.3.2 Plástico reforçado com fibras (FRP)

Um plástico reforçado com fibras (FRP) é um material compósito constituído por uma matriz polimérica reforçada com fibras. As fibras geralmente usadas são as de vidro, carbono ou aramida, os polímeros mais utilizados são o epóxido, o vinilester e o poliéster.

O desenvolvimento de FRP foi um dos maiores avanços no século XX em relação à tecnologia de materiais. Hoje em dia os FRP são usados nas mais diversas indústrias tais como aeroespacial, automóvel, marítima e construção civil.

Os FRP podem ser fabricados de várias formas entre elas, por empilhamento de pré-impregnado de resina e reforço sob forma de camadas unidireccionais ou fita unidireccional. A escolha da sequência de empilhamento permite obter características do componente em função das direcções de sollicitação. Com uma selecção cuidada da matriz, reforço, processo de fabrico e sequência de empilhamento é possível obter-se FRP muito resistente numa dada direcção pelo alinhamento das fibras, ficando menos resistente noutras direcções que sejam menos importantes. A sua utilização traz várias vantagens, nomeadamente: redução do peso, maior facilidade de operação das peças, e também a flexibilidade dos FRP. É possível fabricar peças complexas tais como pranchas de surf ou cascos de barco.

2.3.3 Propriedades mecânicas dos FRP

As propriedades dos FRP de fibras longas são bastante influenciadas pela escolha do tipo de reforço, matriz, mas também da forma com estes dois componentes são combinados (comprimento e orientação da fibra, teor de fibras e espessura do laminado). A Tabela 1 mostra algumas propriedades típicas de alguns tipos de matrizes e fibras utilizadas para fabrico de FRP.

Tabela 1 - Propriedades típicas de fibras de reforço e polímeros para matriz [8-9]

Material	Densidade ρ [kg/dm ³]	Módulo E [GPa]	Resistência σ_f [MPa]
<i>Fibras</i>			
Carbono, tipo 1	1,95	390	2200
Carbono, tipo 2	1,75	250	2700
Celulose	1,61	60	1200
Vidro (tipo E)	2,56	76	1400-2500
Kevlar [®]	1,45	125	2760
<i>Matrizes</i>			
Epóxido	1,2-1,4	2,1-5,5	40-85
Poliéster	1,1-1,4	1,3-4,5	45-85

As fibras de vidro oferecem uma resistência razoável a um custo competitivo, enquanto as fibras de carbono oferecem um melhor desempenho em termos de resistência e rigidez a uma densidade reduzida. Regra geral o aumento do comprimento das fibras leva a um aumento da eficiência do reforço para suportar as solicitações impostas, contudo é mais económico fabricar FRP de fibras curtas. Na Tabela 2 apresenta-se algumas propriedades mecânicas relevantes de três tipos de FRP comparando-os com um aço de alta resistência e uma liga de alumínio [10].

Tabela 2 – Propriedades típicas de alguns tipos de FRP e metais [8-9]

Material	Densidade ρ [kg/dm ³]	Módulo E [GPa]	Resistência σ_f [MPa]	Tenacidade K_{Ic} [MPa√m]	E/ρ	σ/ρ
<i>FRPs</i>						
CFRP, 58% TF, unidireccional, matriz de epóxido	1,5	189	1050	32-45	126	700
GFRP, 50% TF, unidireccional, matriz de poliéster	2,0	48	1240	42-60	24	620
Kevlar [®] -epoxy, 60% TF, unidireccional	1,4	76	1240	-	54	886
<i>Metais</i>						
Aço de alta resistência	7,8	207	1000	100	27	128
Liga de alumínio	2,8	71	500	28	25	179

2.3.4 Plástico reforçado a fibras de carbono (CFRP)

Neste trabalho será utilizado CFRP como substrato das juntas adesivas, mais concretamente o CFRP usado será o pre-preg da SEAL[®] Texipreg HS 160 RM. Os plásticos reforçados a fibras de carbono (CFRP) são o material de excelência em aplicações de alto desempenho como o desporto de competição ou indústria aeronáutica, onde o factor mais decisivo é a resistência e rigidez específica. A matriz dos CFRP é geralmente uma resina termoendurecível de poliéster ou epóxida. O alto desempenho destes compósitos advém das fibras de carbono que possuem uma resistência e rigidez bastante superior às fibras de vidro além de serem mais leves. O custo da resina epóxida é superior ao da resina poliéster, mas possui uma resistência e adesão às fibras mais elevadas, pelo que é bastante usada em componentes que necessitem de elevada resistência à fadiga. Estas resinas são também caracterizadas pela alta resistência a

esforços contínuos e baixa expansão térmica o que garante uma grande estabilidade dimensional muito importante a várias aplicações aeroespaciais. Estes compósitos têm vindo a ser utilizados desde os anos 70 para substituir componentes de alumínio em aviões com o objectivo de reduzir o peso e por sua vez o consumo de combustível. Outras aplicações típicas destes componentes são os automóveis super-desportivos ou de competição, artigos de desporto de competição e estruturas aeronáuticas. O CFRP é um material bastante usado na construção de chassis dos carros de Fórmula 1 (Figura 7), graças à resistência e rigidez específica, sendo fabricados por moldação manual sobre um molde projectado e optimizado em computador e fabricado por processos como a prototipagem rápida. As camadas de pré-impregnado são depositadas manualmente sobre o molde. A estrutura em *sandwich*, para se conseguir um aumento de rigidez, é constituída por laminados de CFRP nas faces exteriores, e núcleo em estrutura de alumínio em ninho de abelha. O conjunto é colocado num autoclave sob pressão e temperatura para cura dos laminados e consolidação com o ninho de abelha.



Figura 7 - Carro Formula 1

Nos carros desportivos, a utilização de CFRP pode trazer uma significativa redução de peso dos componentes. Nos dias de hoje vários carros desportivos utilizam compósitos de CFRP para redução de peso. O McLaren F1 foi o primeiro carro de produção em série com uma estrutura *monocoque* integral em CFRP, resultando num carro de 1140 kg. O super desportivo Mosler MT900 (Figura 8) é outro exemplo do fabrico da estrutura com *monocoque* integral em CFRP, fabricado por empilhamento de pré-impregnado [10].



Figura 8 - Super Desportivo Mosler MT900

Na indústria aeronáutica os CFRP também estão a ser bastante utilizados, e um bom exemplo desta utilização é o avião Boeing 787 Dreamliner (Figura 9). Desde o dia do seu lançamento mais de 835 unidades foram encomendadas por mais de 56 clientes tornando-se assim no maior sucesso comercial da indústria aeronáutica. O Boeing 787 é o primeiro avião comercial a ser fabricado primariamente com CFRP. Este avião é produzido com 50% de materiais compósitos contra os 12% utilizados na versão anterior, o Boeing 777. Este aumento da utilização de materiais compósitos leva a que o custo do transporte por milha seja 12% inferior comparativamente a aviões com o mesmo porte [11-12].



Figura 9 - Boeing 787 Dreamliner

2.4 Previsão da resistência de juntas adesivas

2.4.1 Mecânica dos meios contínuos

Na mecânica dos meios contínuos, os valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação, previstos por métodos analíticos ou por uma análise de

elementos finitos, são geralmente usados como critério de rotura e comparados com os valores suportados pelo material.

O modo mais simples de analisar as tensões numa junta de sobreposição simples baseia-se na suposição que os substratos são rígidos e que o adesivo se deforma apenas em corte. Definindo a força aplicada por P , o comprimento de sobreposição por l , e a largura do substrato por b , teremos uma tensão uniforme ao longo do adesivo obtido pela fórmula:

$$\tau = \frac{P}{b * l} \quad (1)$$

O recurso a juntas adesivas utilizando materiais compósitos, para unir diferentes superfícies, é largamente usado na indústria, pois os materiais compósitos proporcionam estruturas mais leves. Contudo o uso destas juntas permanece um desafio porque a performance das juntas é bastante influenciada pelas características dos laminados de compósito. Na direcção das fibras, compósitos unidireccionais podem ser bastante resistentes e rígidos, contudo na direcção transversa as propriedades são bastante inferiores. As juntas adesivas experimentam tensões de arrancamento, por essa razão as juntas adesivas em materiais compósitos podem sofrer roturas na direcção transversa antes de acorrer rotura no adesivo.

2.4.1.1 Volkersen

A análise de juntas começou há 70 anos. Inicialmente o método usado (Volkersen, 1938) constitui numa aproximação analítica clássica baseada num modelo simples de uma junta adesiva de sobreposição simples.

O método de Volkersen [13] introduziu o conceito de deformação diferencial. Se os substratos forem elásticos e houver continuidade da interface adesivo/substrato, os paralelogramos mostrados na junta não solicitada ficam distorcidos, como se mostra na Figura 10.

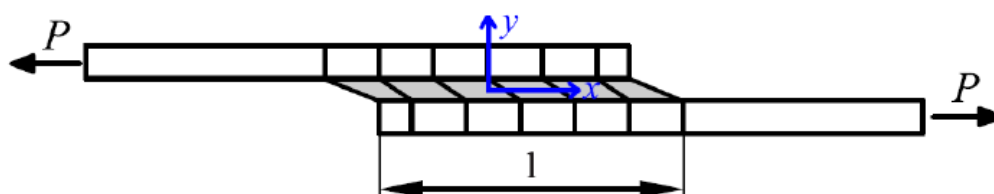


Figura 10 - Modelo de Volkersen

O modelo de Volkersen tem por base as seguintes hipóteses:

- Os materiais são isotrópicos e homogêneos;
- Comportamento linear elástico dos substratos e do adesivo;
- Flexão dos substratos desprezada;
- Placas finas;
- Hipótese de pequenas deformações;
- Análise bidimensional (efeito da largura não considerado);
- Tensões constantes através da espessura da cola;
- O adesivo é flexível em relação aos substratos;

Os dados necessários para os cálculos são dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados necessário para os cálculos pelo método de Volkersen

Dados	Nomenclatura	Unidades
Junta		
Largura da Junta	b	mm
Comprimento de sobreposição	l	mm
Espessura do substrato 1	t_1	mm
Espessura do substrato 2	t_2	mm
Espessura do adesivo	t_a	mm
Substratos		
Módulo Young do substrato 1	E_1	MPa
Módulo Young do substrato 2	E_2	MPa
Adesivo		
Módulo de corte	G_a	MPa
Solicitação		
Força aplicada	P	N

A distribuição da tensão de corte é obtida por:

$$\tau = \frac{Pw}{2b} \cdot \frac{\cosh(wx)}{\sinh\left(\frac{wl}{2}\right)} + \left(\frac{t_1 - t_2}{t_1 + t_2}\right) \cdot \left(\frac{wl}{2}\right) \cdot \frac{\sinh(wx)}{\cosh\left(\frac{wl}{2}\right)} \quad (2)$$

onde

$$w = \sqrt{\frac{G_a}{Et_1 t_a} \cdot \left(1 + \frac{t_1}{t_2}\right)} \quad (3)$$

2.4.1.2 Goland e Reissner

Goland e Reissner [14] foram os primeiros a considerar os efeitos de rotação da junta (Figura 11). Os substratos flectem e a direcção da linha de carregamento altera-se devido à rotação da junta. Os deslocamentos deixam de ser proporcionais à força aplicadas, o que quer dizer que há uma não linearidade geométrica.

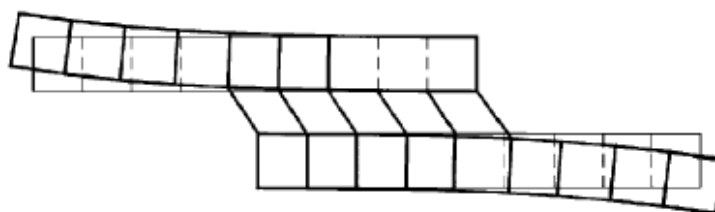


Figura 11 - Efeito momento flector modelo de Goland e Reissner

A análise desenvolvida por Goland e Reissner além de permitir obter as tensões de corte também permite obter as tensões de arrancamento.

O modelo de Goland e Reissner parte das seguintes hipóteses:

- Materiais isotrópicos e homogéneos;
- Comportamento linear elástico dos substratos e do adesivo;
- Flexão dos substratos considerada;
- Placas finas;
- Hipótese de pequenas deformações;
- Análise bidimensional (efeito da largura não considerado);
- Tensões constantes através da espessura da cola;
- Cargas pequenas e pequenas sobreposições.

Os dados necessários para os cálculos são dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados necessários aos cálculos no método de Goland e Reissner

Dados	Nomenclatura	Unidades
Junta		
Largura da junta	B	mm
Comprimento de sobreposição	L	mm
Espessura do substrato	T	mm
Espessura do adesivo	t_a	mm
Substratos		
Módulo de Young	E	MPa
Coefficiente de Poisson	N	
Adesivo		
Módulo de Young	E_a	MPa
Coefficiente de Poisson	ν_a	
Solicitação		
Força aplicada por unidade de largura	P	N/mm

A distribuição de tensão de corte do adesivo pode ser obtida pela seguinte forma:

$$\tau = -\frac{1}{8} \frac{P}{c} \left\{ \frac{\beta c}{t} \cdot (1 + 3k) \cdot \frac{\cosh\left(\frac{\beta c}{t} \cdot \frac{x}{c}\right)}{\sinh\left(\frac{\beta c}{t}\right)} + 3(1 - k) \right\} \quad (4)$$

Onde c é metade do comprimento de sobreposição e k é o factor de momento flector obtido pela seguinte expressão:

$$k = \frac{\cosh(u_2 c)}{\cosh(u_2 c) + 2\sqrt{2} \sinh(u_2 c)} \quad (5)$$

onde

$$u_2 = \sqrt{\frac{3(1 - \nu^2)}{2} \frac{1}{t} \sqrt{\frac{P}{tE}}} \quad (6)$$

e

$$\beta^2 = 8 \frac{G_a}{E} \frac{t}{t_a} \quad (7)$$

A distribuição da tensão de arrancamento pode ser calculada pela expressão:

$$\sigma = \frac{1}{4} \frac{Pt}{c^2} \left[\left(R_2 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \cosh(\lambda) \cos(\lambda) \right) \cosh\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \cos\left(\frac{\lambda x}{c}\right) + \left(R_1 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \sinh(\lambda) \sin(\lambda) \right) \sinh\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \sin\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \right] \quad (8)$$

Onde o factor de força transverso k' é calculado por:

$$k' = \frac{kc}{t} \sqrt{3(1 - \nu^2) \frac{P}{tE}} \quad (9)$$

$$\lambda = \gamma \frac{c}{t} \quad (10)$$

$$\gamma^4 = 6 \frac{E_a t}{E t_a} \quad (11)$$

$$\Delta = \frac{1}{2} (\sin(2\lambda) + \sinh(2\lambda)) \quad (12)$$

$$R_1 = \cosh(\lambda) \sin(\lambda) + \sinh(\lambda) \cos(\lambda) \quad (13)$$

$$R_2 = -\cosh(\lambda) \sin(\lambda) + \sinh(\lambda) \cos(\lambda) \quad (14)$$

2.4.1.3 Hart-Smith

As análises de Volkersen [13] e também as de Goland e Reissner [14] consideram um comportamento elástico, contudo o adesivo e os substratos podem deformar-se plasticamente. Hart-Smith [15] desenvolveu os modelos de Volkersen e Goland e Reissner tendo em conta o comportamento plástico do adesivo. A influência do adesivo na resistência é determinada apenas pela energia de deformação. Hart-Smith demonstrou que a plasticidade do adesivo aumenta a resistência de uma junta em relação a uma análise elástica. Um adesivo dúctil cede plasticamente e pode suportar uma força adicional até atingir a sua deformação de rotura [5].

Este modelo tem por base as seguintes hipóteses:

- Os materiais são isotrópicos e homogéneos;
- Comportamento linear elástico dos substratos e do adesivo;
- Flexão dos substratos considerada;
- Placas finas;
- Hipótese de pequenas deformações;
- Análise bidimensional (efeito da largura não considerado);
- Tensões constantes através da espessura da cola;
- Cargas pequenas e pequenas sobreposições;

Os dados necessários para este modelo são os apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados necessários aos cálculos no modelo de Hart-Smith

Dados	Nomenclatura	Unidades
Junta		
Largura da junta	B	mm
Comprimento de sobreposição	L	mm
Espessura do substrato	T	mm
Espessura do adesivo	t_a	mm
Substratos		
Módulo de Young	E	MPa
Coefficiente de Poisson	N	
Adesivo		
Módulo de Young	E_a	MPa
Coefficiente de Poisson	ν_a	
Solicitação		
Força aplicada por unidade de largura	P	N/mm

Segundo o modelo de Hart-Smith a distribuição da tensão de corte do adesivo $\tau(x)$ é obtida pela seguinte expressão:

$$\tau(x) = A_2 \cosh(2\lambda'x) + C_2 \quad (15)$$

Onde

$$\lambda' = \sqrt{\left[\frac{1 + 3(1 - \nu^2)}{4} \right] \frac{2G_a}{t_a E t}} \quad (16)$$

$$A_2 = \frac{G_a}{t_a E t} \left[P + \frac{6(1 - \nu^2)M}{t} \right] \frac{1}{2\lambda' \sinh(2\lambda'c)} \quad (17)$$

$$C_2 = \frac{1}{2c} \left[P - \frac{A_2}{\lambda'} \sinh(2\lambda'c) \right] \quad (18)$$

$$M = P \left(\frac{t + t_a}{2} \right) \frac{1}{1 + \xi c + \left(\frac{\xi^2 c^2}{6} \right)} \quad (19)$$

$$\xi^2 = \frac{P}{D} \quad (20)$$

$$D = \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (21)$$

A distribuição da tensão de arrancamento $\sigma(x)$ é calculada por:

$$\sigma(x) = A \cosh(Xx) \cos(Xx) + B \sinh(Xx) \sin(Xx) \quad (22)$$

$$X^4 = \frac{E_a}{2Dt_a} \quad (23)$$

$$A = -\frac{E_a M [\sin(Xc) - \cos(Xc)]}{t_a D X^2 e^{(Xc)}} \quad (24)$$

$$B = \frac{E_a M [\sin(Xc) + \cos(Xc)]}{t_a D X^2 e^{(Xc)}} \quad (25)$$

Hart-Smith também considerou a plasticidade da tensão de corte do adesivo. A rotura da junta adesiva começa assim que a zona elástica começa a plastificar. O problema desta forma é resolvido na região elástica em termos da tensão de corte pela seguinte expressão:

$$\tau(x') = A_2 \cosh(2\lambda'x') + \tau_p(1 - K) \quad (26)$$

$$\gamma(x') = \gamma_e \{1 + 2K[(\lambda'x')^2 + \lambda'x' \tanh(\lambda'd)]\} \quad (27)$$

Onde τ_p é a tensão plástica de corte do adesivo e

$$A_2 = \frac{K\tau_p}{\cosh(\lambda'd)} \quad (28)$$

K e d são obtidos através de uma aproximação iterativa obtida pelas expressões seguintes:

$$\frac{P}{l\tau_p}(\lambda'l) = 2\lambda' \left(\frac{l-d}{2} \right) + (1-K)(\lambda'd) + k \tanh(\lambda'd) \quad (29)$$

$$\left[1 + 3K(1 - \nu^2) \left(1 + \frac{t_a}{t}\right)\right] \frac{P}{\tau_p} \lambda^2 \left(\frac{l-d}{2}\right) = 2 \left(\frac{Y_p}{Y_e}\right) + K \left[2\lambda' \left(\frac{l-d}{2}\right)\right] \quad (30)$$

$$2 \left(\frac{Y_p}{Y_e}\right) = K \left\{ \left[2\lambda' \left(\frac{l-d}{2}\right) + \tanh(\lambda'd)\right] - \tanh^2(\lambda'd) \right\} \quad (31)$$

2.4.2 Mecânica da fractura

A Mecânica da Fractura assume que uma estrutura não é um meio contínuo e que pode conter defeitos, causados pelo próprio fabrico ou de outras origens. Falhas, fendas, delaminagens, descolagens, entre outros, são alguns exemplos dos defeitos que podem existir nos materiais. Estes defeitos locais podem fazer com que as tensões e deformações locais existentes possam ser susceptíveis de dar início à propagação desses defeitos e causar a rotura do componente [5].

A fractura das juntas adesivas pode ocorrer segundo três modos diferentes de sollicitação, conforme Figura 12. O Modo I é o modo de abertura enquanto o Modo II e Modo III são modos de corte. No Modo II as superfícies da fenda têm movimento relativo perpendicular à frente da fenda, já no Modo III esse movimento é paralelo à frente da fenda.

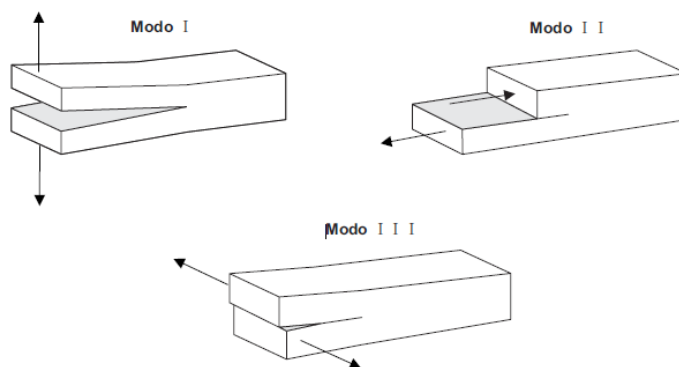


Figura 12 - Modos de Rotura nas Juntas Adesivas

Existem dois critérios de base na Mecânica da Fractura, o critério baseado no factor intensidade de tensão e um outro baseado em conceitos energéticos. O factor de intensidade de tensão K , representa um parâmetro de escala definida da alteração do estado de tensão na vizinhança da extremidade da fenda, motivado pela existência de tensões infinitas nessas zonas. O factor de intensidade de tensão K é definido por:

$$K = Y\sigma_r\sqrt{\pi a} \quad (32)$$

onde Y é um factor adimensional que depende da geometria e da distribuição de tensões, σ_r é a tensão remota aplicada na direcção perpendicular aplicada á direcção da fenda e a representa o comprimento da fenda. É assumido que a propagação da fenda ocorre quando K atinge o seu valor crítico (K_c).

$$K_c = \sigma_u \sqrt{\pi a} \quad (33)$$

em que σ_u representa a resistência do material. O critério energético é baseado na hipótese de que a propagação de um defeito interno ocorrerá quando a energia disponível na extremidade desse defeito (G – taxa de libertação de energia) igualar a energia necessária à propagação da fenda, (G_c - taxa critica de libertação de energia) devido ao carregamento aplicado. A taxa critica de libertação de energia, G_c , é uma propriedade do material. Portanto, a condição critica de não propagação da fenda, resultante do balanço energético pode expressar-se por:

$$G \leq G_c \quad (34)$$

A taxa de libertação de energia é dada por:

$$G = \frac{\partial(W - U)}{\partial A} \quad (35)$$

sendo W o trabalho realizado pelas forças exteriores, U a energia interna de deformação do corpo e A a área da fissura.

2.4.2.1 Modo I

A obtenção da taxa de libertação de energia de juntas adesivas em modo I puro é a mais estudada na literatura. O ensaio mais utilizado é o *Double Cantilever Beam* (DCB), que está normalizado para a medição de G_{Ic} em juntas coladas (**ASTM D3433-99**). As grandes vantagens deste método incluem a sua simplicidade e a possibilidade de obter G_{Ic} por fórmulas matemáticas usando a teoria das vigas.

O provete DCB (Figura 13) é constituído por dois braços de igual comprimento e espessura constante. O ensaio consiste em solicitar os braços do provete em abertura a velocidades de solicitação compreendidas entre 0,5 e 3 mm/min, dependendo da geometria e das características dos materiais a serem testadas. Durante o ensaio regista-se a carga P e o deslocamento δ para os correspondentes valores de comprimento de fenda a .

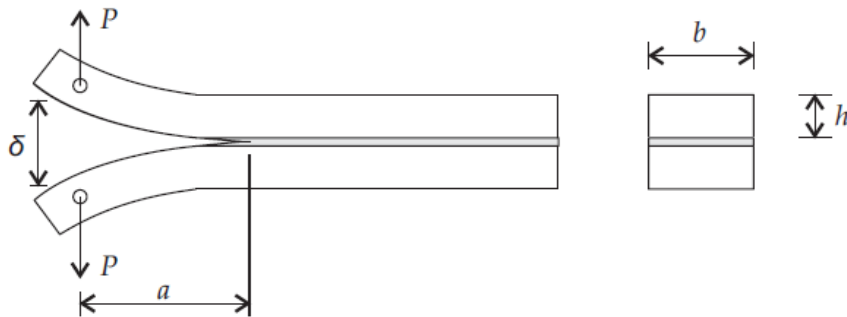


Figura 13 - Representação esquemática do ensaio DCB

Um método para se obter o valor de G_I é o CCM (*Compliance Calibration Method*). Este método é baseado na equação de Irwin-Kies.

$$G_I = \frac{P^2 dC}{2b da} \quad (36)$$

em que P é a força aplicada, b a largura do provete, a o comprimento da fenda e C a flexibilidade do substrato.

A teoria das vigas também é usada para medir o G_I pelo método DBT (*Direct Beam Theory*).

$$G_I = \frac{12a^2P^2}{b^2t_p^3E} \quad (37)$$

Onde t_p é a espessura média dos substratos.

O G_I também pode ser calculado pelo método CBT (*Corrected Bram Theory*).

$$G_I = \frac{3P\delta}{2b(a + |\Delta|)} \quad (38)$$

Já o CBBM (*Compliance-Based Beam Method*) é baseado no conceito de fenda equivalente, dependendo unicamente da flexibilidade do provete durante o ensaio. O G_I pode ser calculado pela expressão:

$$G_{IC} = \frac{6P^2}{b^2t_p} \left(\frac{2a_{eq}^2}{t_p^2E_f} + \frac{1}{5G} \right) \quad (39)$$

Em que a_{eq} é o comprimento de fenda equivalente, obtido pela flexibilidade verificada durante o ensaio e E_f o módulo de flexão corrigido.

2.4.2.2 Modo II

Existem alguns ensaios utilizados para a determinação da tenacidade em Modo II (G_{IIc}), por exemplo o *End Notched Flexure* (ENF) (Figura 14), o *End Loaded Split* (ELS) e o *Four-Point End Notched Flexure* (4ENF). Existem algumas vantagens e desvantagens em relação a cada um dos métodos enunciados, sendo que o método mais utilizado é o ENF devido à sua simplicidade.

Os provetes para ensaio ENF de juntas adesivas consistem em dois braços de espessura constante colados entre si, e simplesmente apoiados nas extremidades. A meio vão é aplicada uma carga pontual com o objectivo de causar um modo de corte no adesivo.

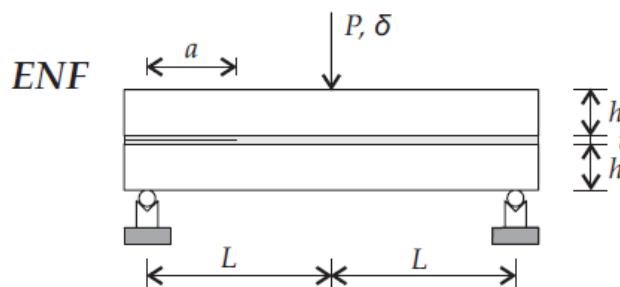


Figura 14 - Representação Esquemática Ensaio ENF

Para avaliar G_{IIc} , foi desenvolvido o modelo *Corrected Beam Theory* (CBT) descrito pela equação:

$$G_{IIc} = \frac{9P^2(a + |\Delta_{II}|)^2}{16b^2h^3E} \quad (40)$$

onde Δ_{II} é a correcção ao comprimento da fenda que tem em conta a rotação de raiz existente na extremidade da fenda [16],

$$\Delta_{II} = 0.42\Delta_I \quad (41)$$

O CBBM também foi desenvolvido para os ensaios ENF pelo que para calcular G_{II} por este método utiliza-se a seguinte expressão:

$$G_{II} = \frac{9P^2a_{eq}^2}{16b^2E_f t_p^3} \quad (42)$$

2.4.3 Modelos de dano coesivo (MDC)

Os critérios para previsão de resistência baseados na mecânica da fractura linear elástica (MFLE) apresentam algumas desvantagens. Na realidade eles dependem da existência ou não de um defeito inicial e comprimento característico. Contudo, em muitas aplicações o local da iniciação do dano não é óbvio, nem o comprimento do dano é fácil de determinar. Por outro lado a MFLE já demonstrou a sua aplicabilidade na modelação de propagação de fendas. Os modelos coesivos (MDC) (Figura 15) ultrapassaram estas limitações e exploraram as vantagens da mecânica da fractura. Estes modelos têm sido largamente utilizados para simular iniciação de fendas e propagação em delaminações em compósitos, e também roturas coesivas de camadas de adesivo e na interface. Os MDC são baseados no pressuposto que uma ou múltiplas interfaces/regiões de fractura podem ser artificialmente introduzidas em estruturas. Esta técnica consiste no estabelecimento de leis tracção-separação para modelar interfaces ou regiões finitas. A grande vantagem dos MDC são poderem ser incorporados em softwares convencionais de elementos finitos, o que permite modelar a fractura em vários materiais, incluindo juntas adesivas.



Figura 15 – Utilização de elementos coesivos para modelação da camada de adesivo numa junta de sobreposição simples

A modelação de juntas adesivas utilizando MDC contém algumas limitações, nomeadamente: o significado físico do processo da fractura é de alguma forma perdido, porque as separações coesivas reais são geralmente acompanhadas com comportamentos plásticos localizados através do adesivo. Outra limitação é o facto de os MDC serem dependentes da geometria da estrutura, porque estes afectam bastante o tamanho da zona de processo de fractura e plasticidade à volta da extremidade da fenda.

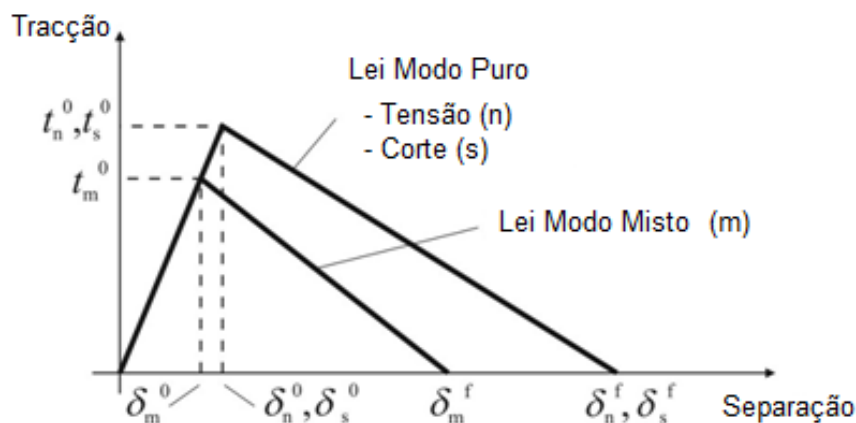


Figura 16 - Lei coesiva triangular

2.4.3.1 Modelo coesivo triangular

As leis coesivas triangulares (Figura 16) são as mais utilizadas devido à sua simplicidade, reduzido número de parâmetros a serem determinados e resultados geralmente aceites para a maioria das aplicações reais.

Em modo puro, a propagação do dano ocorre num par específico de nós quando os respectivos valores de t_n ou t_s são atingidos na respectiva lei de dano. No tramo inicial a lei coesiva é definida por uma relação linear entre as tensões coesivas, \mathbf{t} , e deformações, $\boldsymbol{\varepsilon}$ de cada par de nós dos elementos coesivos.

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{ns} & K_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{\text{COH}} \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (43)$$

O início do dano sob modo misto pode ser especificado por diferentes critérios. Um desses critérios é o critério quadrático de tensão para a iniciação do dano.

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1. \quad (44)$$

Após t_m^0 (Figura 16) ser atingido quando a condição anterior é verificada, a rigidez do material inicia um processo de amaciamento. Isto é simulado pela energia libertada na zona coesiva à frente da ponta da fenda. A separação completa é prevista por uma equação linear que requer as energias para a rotura nos modos puros [17].

$$\frac{G_n}{G_n^c} + \frac{G_s}{G_s^c} = 1. \quad (45)$$

2.4.4 Trabalhos realizados em juntas adesivas em materiais compósitos

Os materiais compósitos apresentam excelentes propriedades ao nível da resistência e da rigidez por unidade de massa, ou seja, uma aplicação em material compósito para substituir um componente em aço de alta resistência pode significar uma redução de peso na ordem dos 70%. Em relação ao alumínio a utilização de materiais compósitos permite uma redução na ordem dos 60%.

Na procura de reduzir o peso dos aviões, a indústria aeronáutica tem recorrido cada vez mais a componentes em material compósito. É aceite que a melhor tecnologia para unir componentes em material compósito é a tecnologia da adesão, já que os furos originam concentrações de tensões. Por outro lado os parafusos ou rebites criam descontinuidades nas fibras que podem afectar gravemente a capacidade de resistência da estrutura. Contudo a união de materiais compósitos por adesivos permanece um desafio devido ao comportamento altamente anisotrópico dos materiais compósitos. De facto, na direcção das fibras, os laminados unidireccionais podem ser bastante resistente e rígidos, já as propriedades ao corte são bastantes inferiores. As juntas adesivas sofrem tensões de arrancamento pelo que nas juntas adesivas em material compósito a rotura provavelmente ocorre pelo compósito antes de ocorrer no adesivo [18].

Nos últimos anos têm sido feitos alguns trabalhos com juntas adesivas em matérias compósitos. O trabalho realizado por Kim *et al.* [19] apresenta uma comparação experimental em termos de rotura e resistência de provetes de sobreposição simples solicitados à tracção com diversas formas de ligação entre as duas placas. Neste trabalho foi considerada a ligação com cura em simultâneo entre placas sem adesivo, cura em simultâneo com adesivo e ligação após cura das placas. A geometria e as dimensões dos provetes utilizados encontram-se representadas na Figura 17.

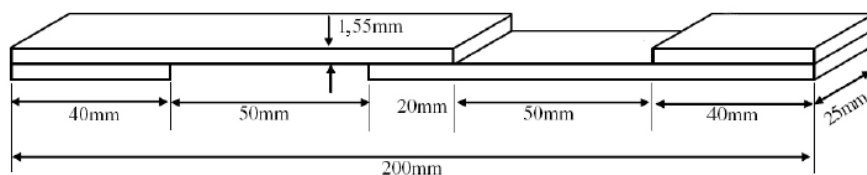


Figura 17 - Geometria dos provetes utilizados por Kim et al. [19]

No caso dos provetes com cura em simultâneo com o adesivo, foi usado um processo em que o filme de adesivo foi colocado na posição durante o processo de empilhamento manual, sendo depois o conjunto curado em simultâneo. Para os provetes com ligação após cura, as placas foram curadas em primeiro lugar, sendo depois ligadas por um adesivo de alta viscosidade. Nesta situação a ligação incluiu uma preparação prévia da superfície, mistura e aplicação do adesivo, montagem, compressão das duas placas a ligar e finalmente cura do adesivo à temperatura ambiente. Nestes últimos provetes realizaram-se variação de vários parâmetros, como diferentes valores de pressões de contacto durante a cura do adesivo para se obter diferentes espessuras do adesivo, tal como diferentes valores de rugosidade superficial das superfícies das placas em contacto com o adesivo e utilização ou não de filetes de diferentes dimensões.

Nos provetes fabricados com diferentes métodos de colagem a rotura evidenciou um misto de rotura adesiva e coesiva. Observou-se o arranque de algumas fibras de carbono das camadas superficiais, sendo este fenómeno influenciado pelo grau de rugosidade das superfícies de ligação das placas ao adesivo, na medida em que os valores superiores de rugosidade conduzem a um maior arranque de fibras. Para os provetes curados em simultâneo, não se presenciou a iniciação e crescimento da fenda, sendo a rotura abrupta iniciada nas extremidades da zona de sobreposição. Nos provetes sem utilização de adesivo, observou-se a rotura pela interface entre as duas placas. Ao analisar os provetes curados em simultâneo com o filme de adesivo, constatou-se uma rotura intralaminar, ou seja, delaminação entre camadas adjacentes das placas. Este facto é justificado pelas elevadas propriedades de resistência do adesivo utilizado.

No trabalho de da Silva LFM et al. [18], os autores estudaram uma junta constituída por dois adesivos, um melhor a baixa temperatura (-55 °C) e o outro melhor a altas temperaturas (200°C). Foi demonstrada que a técnica utilizada permite obter juntas com uma maior resistência que uma junta apenas com um adesivo, especialmente em situações com substratos de diferentes materiais. A junta estudada neste trabalho foi a junta de dupla sobreposição (Figura 18), onde os substratos exteriores usados eram de titânio e o substrato interior era CFRP. Inicialmente foi considerado um design básico, o qual foi modificado com o objectivo de aumentar a resistência da junta mantendo o comprimento de sobreposição. Uma das modificações estudadas foi modificar a geometria do substrato exterior criando um ângulo. Também foi estudada o uso de um ângulo na saída do adesivo. A combinação destas duas situações também foi avaliada. Deste estudo resultou que a utilização de um ângulo na saída do adesivo aumenta

consideravelmente a resistência da junta. Este ângulo de saída permite um alívio da concentração de tensões e a tensão de arrancamento é distribuída mais uniformemente.

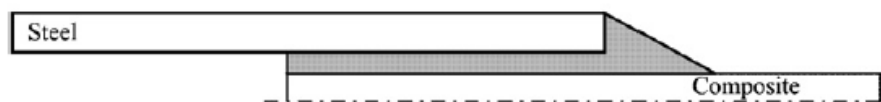


Figura 18 - Junta de dupla sobreposição com ângulo de saída no adesivo [18]

Os autores estudaram também outras situações tendo chegado à conclusão que o uso de um ângulo de saída do adesivo assim como um ângulo no substrato aumenta a resistência da junta caso as tensões térmicas não forem importantes.

Na investigação de Li *et al.* [20] foi utilizado um modelo de dano coesivo para simular o modo misto de fractura em juntas adesivas de sobreposição simples com substratos de GFRP. Neste trabalho foi assumido uma rotura interfacial (adesivo/substrato). As leis foram determinadas experimentalmente e posteriormente utilizadas na simulação numérica. Estas leis tiveram como objectivo simular a rotura interfacial seguida de arrancamento de fibras que foi observada experimentalmente para rotura em modo I. As simulações numéricas mostraram em todos os casos um crescimento da fenda constante antes de a rotura ocorrer. Os resultados experimentais mostraram que a rotura dos provetes foi puramente interfacial tal como foi assumido nas simulações numéricas. As curvas experimentais e numéricas demonstraram um excelente compromisso.

O trabalho de Ávila *et al.* [21] teve como objectivo estudar a performance de um novo design para juntas de simples sobreposição para laminados compósitos, chamado de junta ondulada. Para se atingir o objectivo deste trabalho, foram fabricados e testados uma série de provetes segundo a norma ASTM D 5868-01 [22].

A junta ondulada (Figura 19) tem um design que evita a excentricidade do carregamento, comum nas juntas de sobreposição simples. Este trabalho permitiu concluir que a junta ondulada permite obter juntas com maior resistência em comparação com as juntas de sobreposição simples.

A existência de tensões de arrancamento nas extremidades da sobreposição é crítica para o adesivo. Segundo Adams *et al.* [23], os adesivos tem um bom comportamento à compressão e corte, mas ao arrancamento tem uma fraca performance.

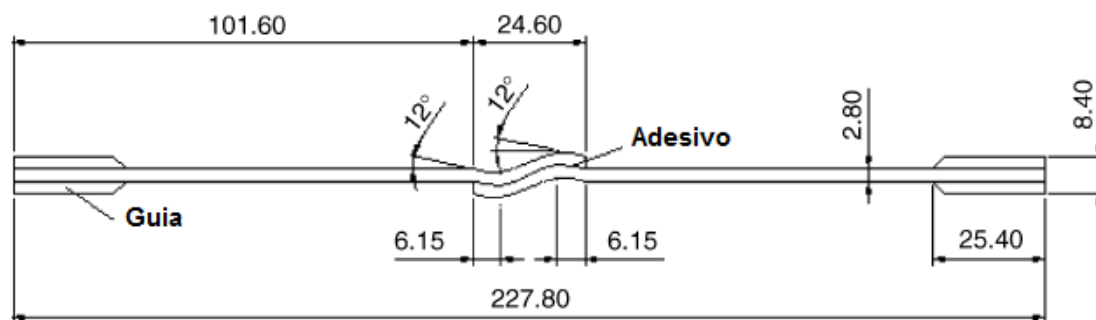


Figura 19 - Dimensões principais junta ondulada

Neste trabalho concluiu-se que o valor máximo de carregamento das juntas onduladas foi superior 41% que nas juntas convencionais de simples sobreposição. A razão pode ser atribuída à tensão de compressão desenvolvida no interior da junta.

3 Trabalho experimental

O trabalho experimental consistiu na caracterização do adesivo 7888 e no fabrico de juntas de sobreposição simples com material compósito com dois adesivos diferentes, o AV138 e o SikaForce[®] 7888. Posteriormente realizaram-se testes de tracção aos provetes a fim de obter a força de rotura das respectivas juntas com os diferentes comprimentos de sobreposição.

3.1 Fabrico de provetes para caracterização do adesivo PU 7888 VP (LP) SikaForce[®]

Para a caracterização do adesivo 7888 da SikaForce[®] realizaram-se provetes maciços para ensaios de tracção e provetes DCB e ENF para caracterizar o adesivo em Modo I e Modo II, respectivamente.

3.1.1 Fabrico dos provetes maciços

A fim de determinar as características à tracção do adesivo PU produziu-se três séries de 3 provetes maciços, totalizando 9 provetes maciços. A determinação das propriedades do adesivo à tracção pode ser executada através do ensaio previsto na norma EN ISO 527-2 Tipo 5A [5].

3.1.1.1 Preparação do molde

Tendo em conta que este adesivo é um adesivo dúctil fabricaram-se provetes de dimensões reduzidas utilizando um molde apropriado para esse efeito (Figura 20). Este molde é constituído pela base de apoio, pelo molde com a forma dos provetes e pela tampa de fecho. Estas partes são seguras entre si por meio de parafusos.



Figura 20 - Molde utilizado para fabrico de provetes maciços

Começou-se por limpar todas as superfícies com papel embebido em acetona para ajudar a remover quaisquer sujidades presentes nos moldes. De seguida passou-se uma lixa fina pelas superfícies dos moldes, inclusive os furos. Limpou-se mais uma vez as superfícies com acetona e colocaram-se os moldes na prensa hidráulica de pratos quentes a uma temperatura de 45°C. Ao fim de 10 minutos, retiram-se as partes constituintes do molde e aplicou-se o desmoldante Frekote[®] 770-NC da Loctite (Figura 21) nas superfícies do molde, tendo atenção de colocar também nos furos. Repetiu-se esta operação 3 vezes, e deixou-se arrefecer o molde até à temperatura ambiente.



Figura 21 – Desmoldante Frekote® 770-NC e Acetona

3.1.1.2 Aplicação do adesivo

O adesivo 7888 LP10 da SikaForce® é fornecido em cartuchos de 200ml, com separação de componentes e bico de mistura. A sua aplicação é feita utilizando uma pistola accionada por ar comprimido (Figura 22).



Figura 22- Pistola, bico e adesivo 7888 LP SikaForce®

Após o arrefecimento do molde, iniciou-se a aplicação (Figura 23) do adesivo com recurso à pistola accionada por ar comprimido. Na primeira série de 3 provetes utilizou-se duas formas diferentes de fabricar esses mesmos provetes, por deposição e por injeção (Figura 23).

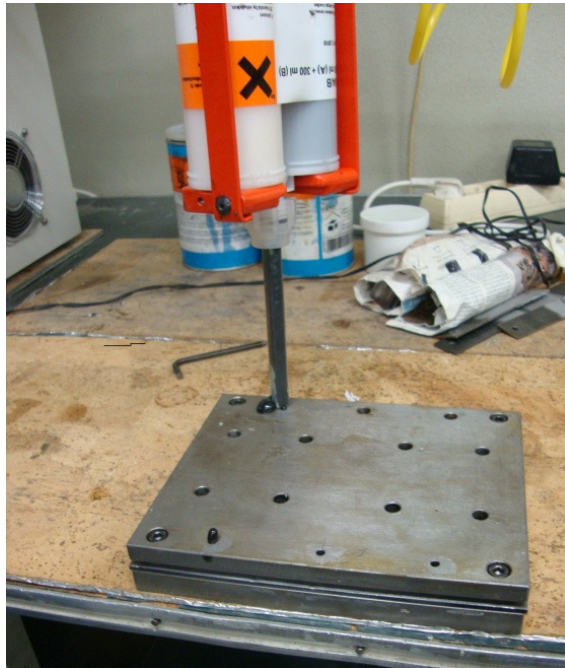


Figura 23 - Aplicação do adesivo por injeção.

No final da aplicação do adesivo deixou-se os provetes curar à temperatura ambiente por 24h. Na primeira série, produziu-se 2 provetes por deposição e 1 por injeção. Constatou-se que o provete fabricado por injeção apresentou melhor acabamento superficial, contudo este tinha um pequeno vazio, pelo que foi excluído para ensaio. Desta primeira série decidiu-se utilizar a injeção como meio de produzir a segunda e terceira série, mas com o cuidado de reduzir a pressão de injeção do adesivo, para tentar evitar vazios no provete maciço, decorrentes de um preenchimento de adesivo demasiado rápido na cavidade do molde. Após a cura obteve-se 6 provetes maciços com bom acabamento superficial (Figura 24).

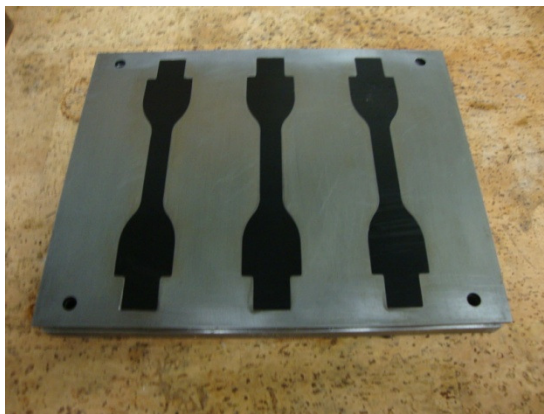


Figura 24 - Série de provetes maciços Adesivo SikaForce® 7888 L10 (VP)

Retiraram-se os provetes do molde, com cuidado para não os partir, e cortaram-se as zonas exteriores dos maciços com recurso a uma serra.

3.1.2 Fabrico dos provetes DCB e ENF

3.1.2.1 Preparação dos substratos

A preparação da superfície dos substratos para posterior preparação dos provetes é uma operação que requer bastante cuidado e que deve ser executada com todo o cuidado para se obterem resultados satisfatórios. O objectivo desta etapa é garantir que a adesão seja tal que o ponto mais fraco da junta seja o adesivo ou o substrato, reduzindo a hipótese de rotura na interface. A selecção dos métodos para preparação da superfície recaiu sobre processos passivos mecânicos e químicos. Os processos passivos envolveram a abrasão mecânica e a granalhagem, o processo químico consistiu em limpar as superfícies com acetona. A abrasão mecânica consistiu em passar com a rebarbadora pelas superfícies para remover as camadas grossas de óxidos e outras camadas fracas existentes nas superfícies dos substratos. De seguida, todos os substratos foram granalhados a seco com jacto de areia (SiO_2) na granalhadora existente no Laboratório de Adesivos – LA (Figura 25). O processo de granalhagem consiste na projecção das partículas de areia sobre as superfícies dos substratos em que será feita posteriormente a colagem. De seguida o provete é limpo com o auxílio de um jacto de ar comprimido. Após a granalhagem as superfícies apresentam uma rugosidade uniforme permitindo uma boa molhagem, o que resulta numa junta mais resistente.



Figura 25- Granalhadora do Laboratório de Adesivos

Para garantir uma limpeza perfeita dos substratos, no final da granalhagem todos os substratos foram limpos vigorosamente com papel embebido em acetona. Foram feitas várias passagens para garantir que de facto a superfície de encontrava limpa.

3.1.2.2 Preparação dos calços

De modo a garantir uma espessura constante do adesivo de $t=0,2$ mm ao longo de todo o comprimento da junta, foram colocados calços feitos de fita de aço calibrada da respectiva espessura em dois locais distintos do provete.

Os calços feitos de fita calibrada (Figura 26) colocados na extremidade dos provetes tem como função garantir a espessura do adesivo, a fita calibrada de aço colocada na pré-fenda tem como função garantir a espessura do adesivo e simular um defeito inicial.

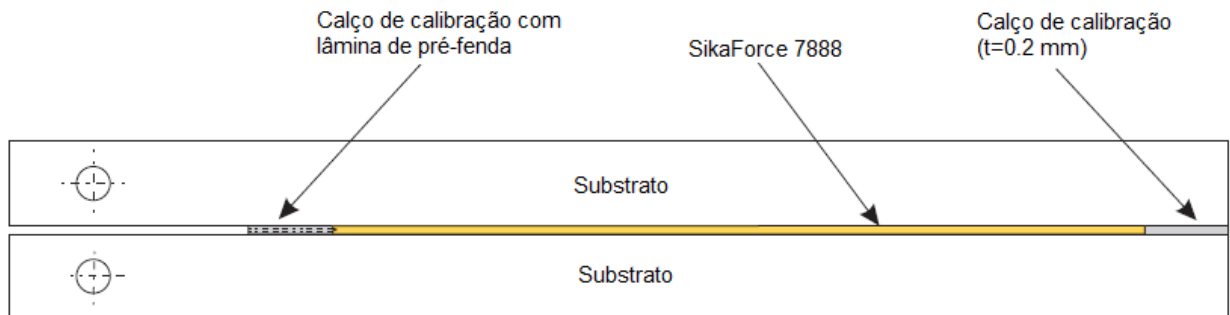


Figura 26- Localização das fitas calibradas

O início do dano é iniciado pela pré-fenda, que consiste num arranjo composto por uma lâmina de 0,1 mm de espessura e duas fitas calibradas de 0,05 mm (Figura 27). Começou-se por cortar a fita calibrada e a lâmina no comprimento pretendido. De seguida com a lâmina colocada sob uma superfície limpa aplicam-se pequenas gotas de cianoacrilato. Coloca-se a fita calibrada de forma que apenas o gume da lâmina fique visível, pressionando-a para fazer a colagem entre as superfícies. Aplica-se novamente pequenas gotas de cianoacrilato na superfície livre e coloca-se outra fita calibrada.



Figura 27 - Fitas calibradas

3.1.2.3 Preparação do molde

Os provetes foram produzidos utilizando um molde para as dimensões específicas do provete (Figura 28) existente do Laboratório de Adesivos. Este molde permite produzir seis provetes em simultâneo. O bloco inferior tem pinos de guiamento que garantem o perfeito alinhamento dos substratos e blocos posicionadores que permitem controlar o comprimento de sobreposição quando se fabrica juntas de sobreposição simples. O molde também possui quatro pinos de alinhamento que garantem o alinhamento das duas partes constituintes do molde.

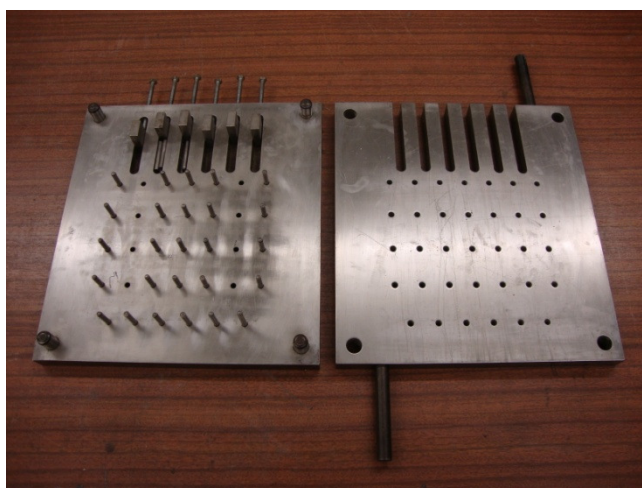


Figura 28 - Molde utilizado para fabrico provetes DCB e ENF

O molde deve encontrar-se limpo, antes de se colocar os provetes. Deve-se remover todos os restos de adesivo que possam existir no molde, com recurso a uma espátula de alumínio. Depois deve-se limpar o molde com papel embebido em acetona, removendo a sujidade e pó que possam existir nas superfícies do molde. Após a limpeza do molde colocou-se o mesmo na prensa de pratos quentes a uma temperatura aproximadamente de 45 °C. Após 10 minutos retira-se o molde da prensa com o auxílio de umas luvas térmicas. Depois aplicou-se o desmoldante por todas as superfícies do molde com a ajuda de um pincel. O desmoldante tem como objectivo garantir que o adesivo não adere ao molde. Esta operação foi repetida por três vezes, com atenção para não falhar passagens em nenhuma superfície. O desmoldante utilizado foi o FREKOTE[®] 770NC da LOCTITE.

3.1.2.4 Preparação do adesivo e deposição nos substratos

Após as tarefas já descritas procedeu-se ao fabrico das juntas coladas para os ensaios DCB e ENF. Começou-se por colocar os braços inferiores dos provetes (Figura 29) entre os pinos de guiamento, garantindo o perfeito encosto à base do molde e ao pino de topo. Colocaram-se as fitas calibradas nas devidas posições, e para evitar que o adesivo dos diferentes provetes entre em contacto colocaram-se barreiras de cartão entre cada um desses provetes. Desta forma a separação dos provetes após a cura será facilitada.

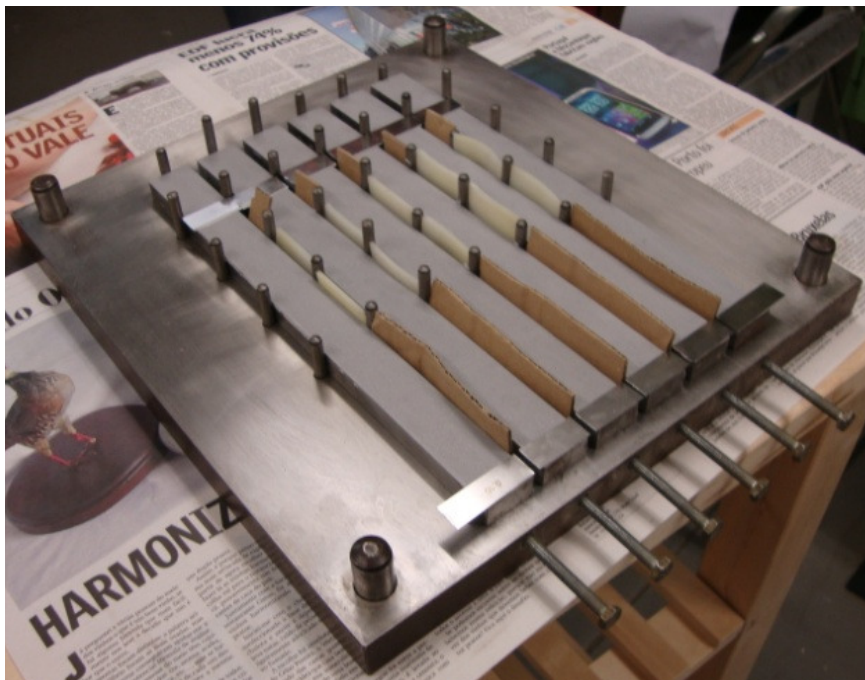


Figura 29 - Braços dos provetes colocados no molde com os calços de fita calibrada

De seguida aplicou-se o adesivo SikaForce[®] 7888 L10 com o auxílio de uma pistola accionada por ar comprimido. Após a deposição do adesivo sob os braços inferiores do provetes colocam-se os braços superiores, com cuidado para evitar a deslocação das fitas calibradoras. Aplicou-se pressão sob os braços superiores de forma a garantir uma homogeneização e o transbordo do adesivo excedente. Por fim coloca-se a parte superior do molde com a ajuda dos pernos roscados tendo cuidado de não deslocar as juntas coladas.

3.1.2.5 Processo de cura

Depois da aplicação do adesivo e montagem dos substratos realizou-se o processo de cura do adesivo. Colocou-se o molde na prensa de pratos quentes existente no Laboratório de Adesivos a uma pressão de 4 bar à temperatura ambiente, durante 24h.

3.1.2.6 Preparação pós-cura

No fim do processo de cura retirou-se o molde da prensa. Para abrir o molde foi necessário retirar os pinos de alinhamento, e para este efeito utilizou-se um punção e um martelo. Depois de retirar os provetes do molde foi necessário retirar os excessos de

adesivo. A maior parte deste adesivo foi removido utilizando uma barra de alumínio afiada, sendo o restante removido com o auxílio de um x-acto.

A preparação final dos provetes para os ensaios de fractura envolveu duas etapas. A primeira consistiu em pintar de branco com fluido de correcção todo o comprimento da junta adesiva (Figura 30), para realçar a propagação da fenda durante o ensaio. A segunda etapa consistiu na colagem de régua milimétrica de papel nos lados dos provetes para ajudar na medição do comprimento da fenda durante os ensaios de fractura.



Figura 30 - Provede ENF com escala colada e pintado com líquido corretor

3.2 Fabrico das juntas adesivas

3.2.1 Fabrico das placas de compósito

Fabricaram-se placas de compósito de carbono-époxydo para posteriormente se cortar os provetes necessários. Foi utilizado pré-impregnado unidireccional da SEAL[®] (Texipreg HS160 RM) para fabrico das placas com uma sequência de empilhamento de 0°. O fabrico das placas seguiu os seguintes passos:

1. Retirou-se o rolo de compósito de carbono-époxydo da arca congeladora, deixando-o estabilizar à temperatura ambiente por alguns minutos.
2. Depois de dimensionar as folhas (300x600mm) cortaram-se 8 placas com o auxílio de um x-acto (Figura 31).



Figura 31 - Corte do compósito

3. Após se terem 8 folhas (300x600mm) cortaram-se estas placas a meio de modo a obterem-se 16 folhas (300x300mm).
4. De seguida efectuou-se o empilhamento, tendo em atenção que no presente caso a sequência de empilhamento de todas as camadas é 0°.
5. A colocação de cada folha deve ser feita com cuidado, de modo a evitar que se formem bolhas de ar no interior das camadas. Para retirar essas bolhas de ar pode-se utilizar uma espátula, que também tem como função facilitar a adesão entre camadas.
6. Para melhor adesão entre camadas efectuou-se um ligeiro aquecimento das folhas (Figura 32).



Figura 32 - Aquecimento das folhas para melhor adesão

7. No final do empilhamento, colocou-se fita-cola nas duas extremidades paralelas à direcção das fibras (Figura 33), com o objectivo de evitar a saída da resina perpendicularmente às fibras e evitar o seu deslocamento durante a cura.



Figura 33 - Pormenor da colocação de fita-cola ao longo da placa

8. Finalmente colocou-se um filme de revestimento em Teflon[®] a revestir a placa de compósito (Figura 34), cuja função é de servir como desmoldante. Também foram colocadas duas barras calibradas ao longo da placa orientadas na direcção das fibras, para garantir a espessura desejada para a placa e evitar a saída da resina perpendicularmente às fibras.

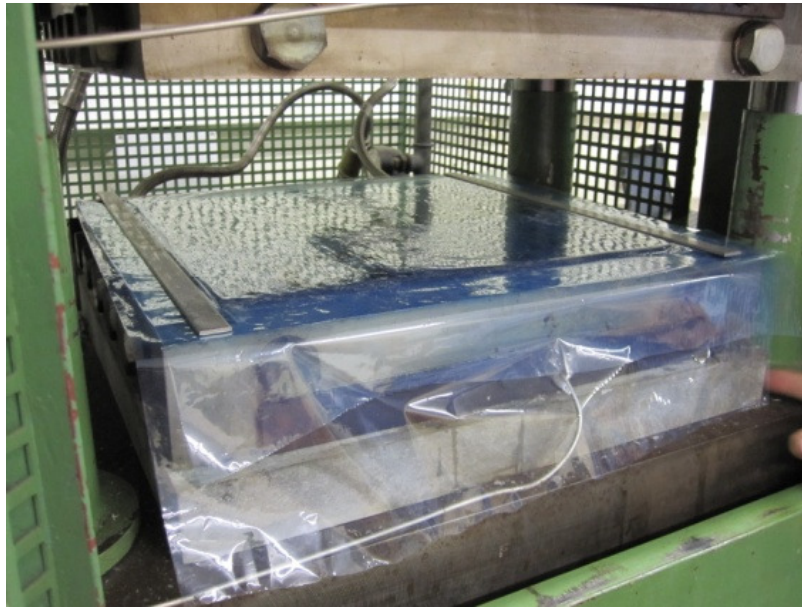


Figura 34 - Colocação da placa de compósito revestido com Teflon® na prensa

3.2.2 Cura das placas

As placas foram colocadas na prensa de pratos quentes (Figura 35), para serem submetidas a um ciclo térmico, tendo como parâmetros de controlo a pressão e a temperatura. As placas foram submetidas a um ciclo térmico (Figura 36), recomendado pelo fabricante a uma pressão de 4 bar durante 1h a uma temperatura de 130°C. Após esse tempo inicia-se o processo de arrefecimento, em que se coloca a temperatura da prensa a 20°C. O aquecimento e arrefecimento foram realizados a 4°C/min. Durante o arrefecimento, assim que a temperatura na prensa atingiu os 60°C retirou-se a placa do interior da prensa, retirou-se a folha de Teflon® e deixou-se arrefecer ao ar até à temperatura ambiente.



Figura 35 - Prensa de pratos quentes INTOCO

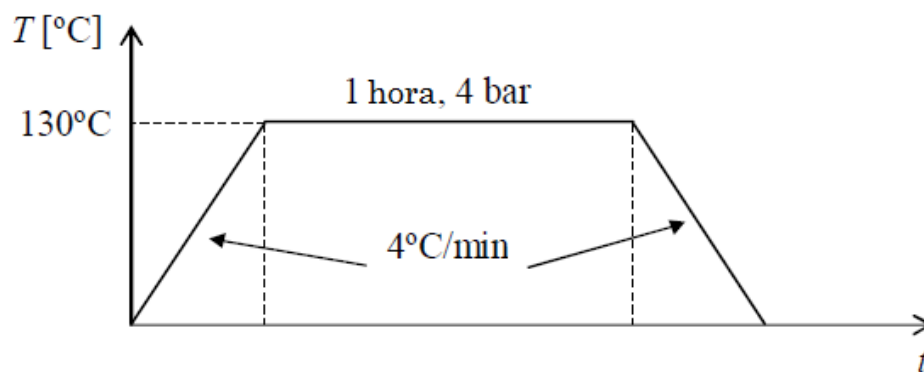


Figura 36 - Ciclo térmico para cura das placas de pré-impregnado

3.2.3 Corte das placas e acabamento final

As placas de compósito foram cortadas com as dimensões finais necessárias para os provetes. Para este efeito utilizou-se a máquina de corte de materiais compósitos existente nas Oficinas Mecânicas do ISEP (Figura 37). Esta máquina é constituída por um disco de corte com revestimento de diamante refrigerada a água e uma mesa deslizante. Começou-se por dar uns cortes nas placas de compósitos, para se obter duas arestas a 90°, e após essa operação realizaram-se cortes dos provetes. Para garantir que os provetes ficavam com a mesma espessura colocou-se um calço para servir de apoio de encosto conforme Figura 38. Após o respectivo corte os provetes foram então lixados para eliminar fibras soltas.



Figura 37 - Máquina de corte de materiais compósitos

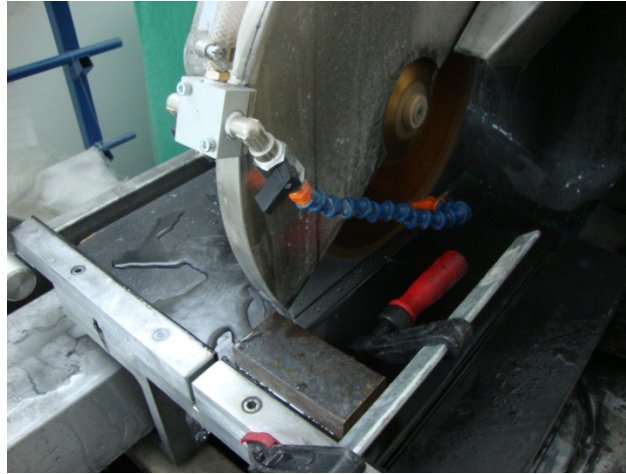


Figura 38 - Pormenor do corte da placa de compósito

3.2.4 Preparação das superfícies

A colagem dos provetes foi feita com o adesivo Araldite® AV138 e o adesivo SikaForce® 7888. O adesivo Araldite® AV138 é fornecido em duas embalagens: a resina e o acelerador da cura. A preparação consiste na mistura de dois componentes na razão de 10 g de resina para 4 g de acelerador de cura. O adesivo SikaForce® 7888 é fornecido em embalagens de bicomponente e a sua aplicação é feita com recurso a uma pistola accionada por ar comprimido. As superfícies de ligação foram preparadas por abrasão manual com lixa grossa. Após a remoção da película superficial (Figura 39), passou-se papel embebido em acetona com bastante vigor e repetidamente por essas superfícies até o papel não apresentar qualquer sujidade. Esta operação é da maior importância pois é crítica para se obter uma adesão óptima entre os substratos e o adesivo.

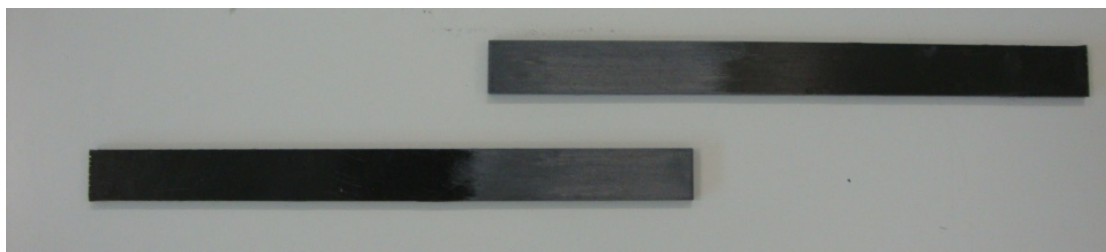


Figura 39 - Superfícies dos substratos após lixagem

3.2.5 Colagem dos substratos

Após a aplicação do adesivo no substrato inferior é necessário posicionar o substrato superior com o maior cuidado. A espessura do adesivo é assegurada por duas folhas de gramagem 80 g/m², que conferem uma espessura de 0,2 mm. Para manter os substratos unidos durante o tempo de cura utilizam-se molas (Figura 40). A cura dos provetes foi feita à temperatura ambiente. Os ensaios de tracção só foram realizados após uma semana de cura, assim como a limpeza dos excessos de adesivo.



Figura 40 - Provetes durante processo de cura

3.2.6 Preparação dos provetes

Após a cura dos provetes foi necessário remover os excessos de adesivo que se encontravam no exterior da junta. Para se realizar essa remoção recorreu-se a uma furadora vertical à qual foi aplicada uma fresa de topo (Figura 41).



Figura 41 - Remoção dos excessos de adesivo

3.2.7 Geometria dos provetes

Os provetes produzidos para os ensaios de tracção utilizando o adesivo AV138 e o adesivo PU 7888 são geometricamente iguais. Realizaram-se provetes com comprimentos de sobreposição de 10 mm até 80 mm, com intervalos de 10 mm. Em ambos os casos a espessura de adesivo usada foi 0,2 mm.

3.3 Ensaios

3.3.1 Ensaios de caracterização do adesivo 7888 L10 (VP) da SikaForce®

3.3.1.1 Ensaios tracção dos provetes maciço

Os ensaios de tracção dos provetes maciços foram realizados na máquina servo-hidráulica MTS 810 que se encontra no Laboratório de Ensaios Tecnológicos – LET na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Após o aperto do provete maciço nas amarras da máquina de ensaios universal colocou-se um extensómetro na zona de

menor dimensão do provete no provete para que a extensão fosse medida ao longo do ensaio (Figura 42). A aquisição de dados foi feita pelo computador de aquisição de dados por forma a obter as curvas $P - \delta$. Os ensaios foram realizados a uma velocidade de 1 mm/min.



Figura 42 - Pormenor do extensómetro montado no provete maciço

3.3.1.2 Ensaio DCB

Realizaram-se ensaios DCB a 6 provetes recorrendo à máquina servo-hidráulica MTS810 presente no LET da FEUP (Figura 43). Os provetes foram ensaiados a uma velocidade de solitação de 0,5 mm/min. As principais dimensões dos provetes DCB constam na Figura 44.



Figura 43 - Máquina de ensaios do LET

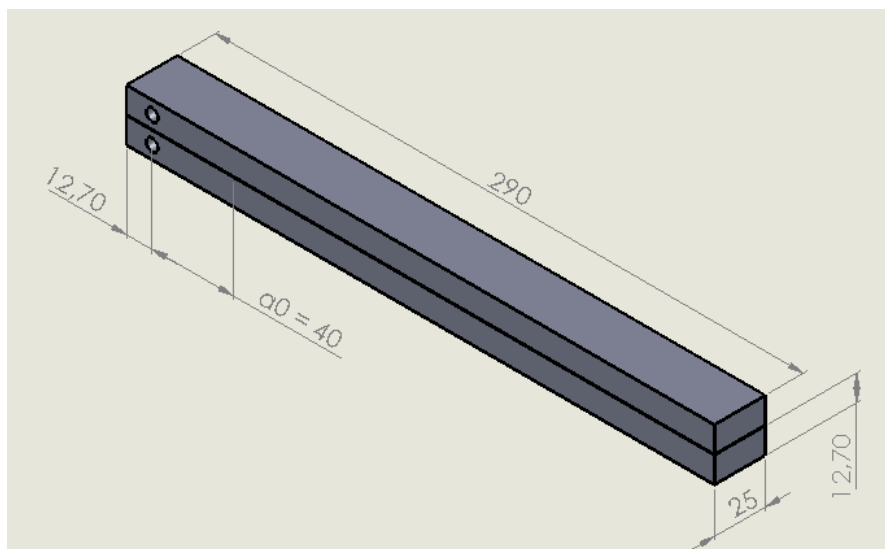


Figura 44 - Dimensões dos provetes DCB

Foi colocada uma máquina fotográfica digital direcionada para o provete DCB de modo a registar fotograficamente o crescimento da fenda durante o ensaio (Figura 45), a máquina fotográfica utilizada tem uma função que permite que a máquina tire fotografias automaticamente de 10 em 10 s. O relacionamento entre os valores do comprimento de fenda e da curva $P-\delta$, foi conseguido através da relação entre o tempo decorrido entre fotografias e a velocidade de ensaio. Os provetes foram fixos às amarras de carga através de pinos de aço (\varnothing 6mm). O apoio simples da extremidade direita foi conseguido por uma peça metálica rigidamente ligada à coluna do lado direito da máquina MTS.



Figura 45 – Registo do crescimento da fenda durante ensaio DCB

Durante os ensaios, as curvas $P-\delta$ foram registadas pelo sistema de aquisição de dados do computador. O tratamento dos dados foi realizado recorrendo ao Microsoft Excel®.

3.3.1.3 Ensaio ENF

Para os ensaios ENF (Figura 46) o setup experimental é modificado para uma configuração que permita o ensaio da viga de viga simplesmente apoiada com uma carga pontual a meio vão. Para isso foi usado um dispositivo de flexão constituído por dois rolos que definem a distância entre apoios, e a carga é aplicada por intermédio de um rolete de carga. As dimensões dos provetes utilizados são apresentadas na Figura 47.

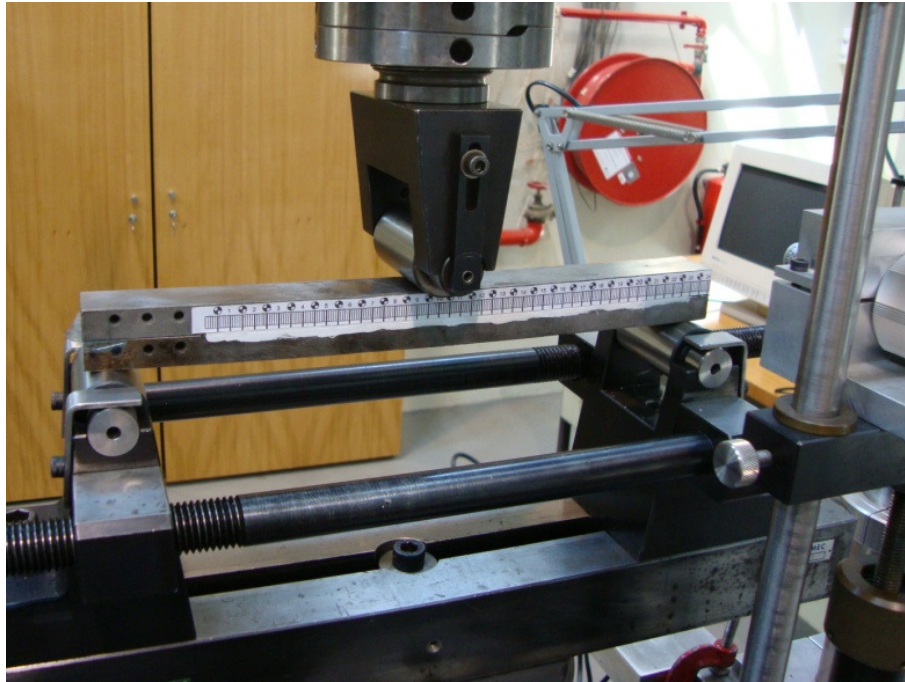


Figura 46 - Ensaio ENF

Estes ensaios foram realizados na máquina servo-hidráulica MTS 810 do LET da FEUP. Os ensaios foram realizados a uma velocidade de ensaio de 0,5 mm/min. Na pré-fenda foi colocado duas folhas de Teflon[®], com uma espessura de 25 μ m, separadas por uma gota de óleo, para que o escorregamento relativo dos braços dos provetes existente durante o ensaio ocorra com o menor atrito possível. Os apoios foram colocados a 10 mm de cada extremidade do provete ENF, sendo a distância entre apoios de 270 mm.

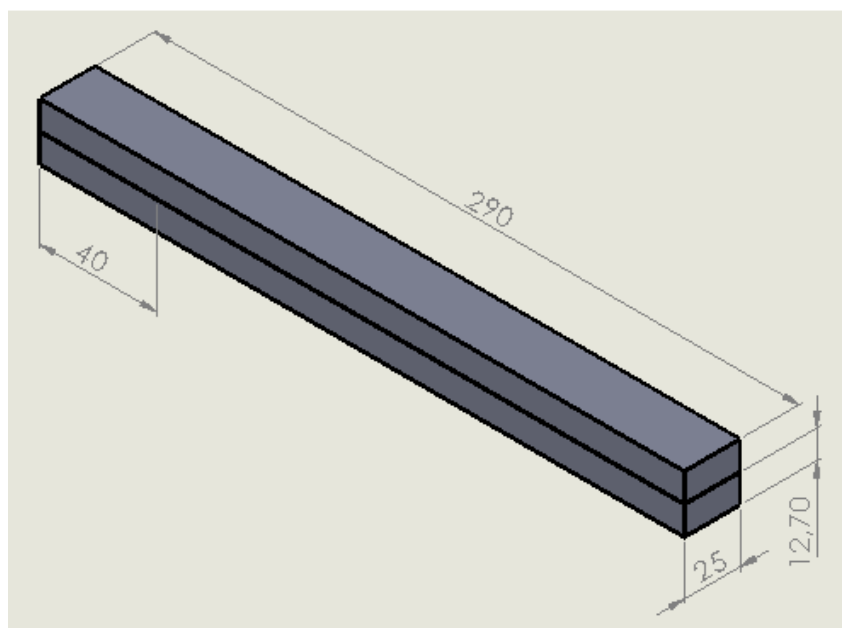


Figura 47 – Dimensões dos provete para ensaio ENF

3.3.2 Ensaios de tracção de juntas de sobreposição simples

Com o objectivo de determinar a resistência das juntas em materiais compósitos, realizou-se ensaios numa máquina servo-hidraulica, SHIMADZU (Figura 48), equipada com uma célula de carga de 100 kN, existente no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Instituto Superior de Engenharia do Porto. Os ensaios foram realizados a uma velocidade de 1,0 mm/min. Foram ensaiados 5 provetes por cada comprimento de sobreposição totalizando 35 juntas de sobreposição simples com o adesivo AV138 e outras 35 juntas com o adesivo 7888. As dimensões das juntas de simples sobreposição são apresentadas na Figura 49.



Figura 48 - Máquina Ensaios Universal SHIMADZU

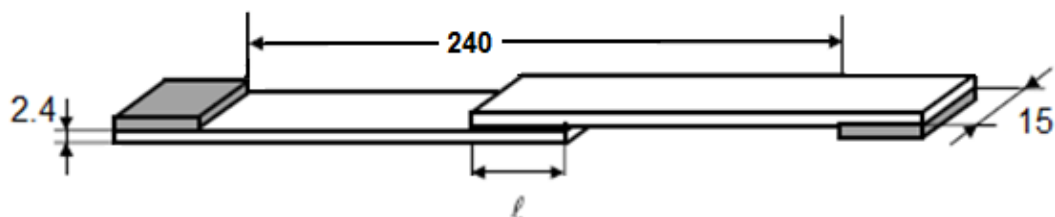


Figura 49 - Geometria das juntas de simples sobreposição

4 Resultados experimentais

4.1 Propriedades dos Materiais

4.1.1 Substratos em material compósitos

As propriedades das placas de compósito utilizado nas juntas adesivas fabricadas são descritas na Tabela 6, determinadas anteriormente no trabalho de Campilho, R.D.S.G. [25].

Tabela 6 - Propriedades mecânicas das placas de CFRP [25]

$E_x=1,09E+05\text{MPa}$	$\nu_{xy}=0,342$	$G_{xy}=4315\text{MPa}$
$E_y=8819\text{MPa}$	$\nu_{xz}=0,342$	$G_{xyz}=4315\text{MPa}$
$E_z=8819\text{MPa}$	$\nu_{yz}=0,380$	$G_{yz}=3200\text{MPa}$

4.1.2 Substrato em aço

O material usado para substrato dos provetes DCB e ENF foi o aço DIN 40CrMnNiMo7. Algumas das propriedades deste aço constam na Tabela 8.

Tabela 7 - Propriedades dos substratos utilizados nos provetes DCB e ENF [16]

Propriedades	Aço DIN 40CrMnNiMo7
Módulo de Young, E [GPa]	205
Tensão de cedência, σ_y [MPa]	900
Tensão de rotura, σ_f [MPa]	1000
Deformação de rotura, ϵ_f [%]	15

4.1.3 Adesivo AV138 da HUNSTMAN®

O adesivo AV138/HV988 é um adesivo frágil conforme se pode observar-se no gráfico Tensão / Deformação conforme Figura 50. As propriedades deste adesivo são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades elásticas e plásticas do adesivo AV138 [26]:

Propriedades	AV138
Módulo de Young, E [GPa]	4.89±0.81
Coefficiente de Poisson, ν^*	0.35
Tensão de cedência, σ_y [MPa]	36.49±2.47
Tensão de rotura, σ_f [MPa]	39.45±3.18
Deformação de rotura, ϵ_f [%]	1.21±0.10
Módulo de corte, G [GPa]	1.56±0.01
Tensão de cedência de corte, τ_y	25.1±0.33
Tensão de rotura de corte, τ_f	30.2±0.40
Deformação de rotura de corte, γ_f	7.8±0.7

* Dados do fabricante

Este adesivo trata-se de uma pasta adesiva de époxydo constituída por uma mistura de dois componentes (Figura 51). Este tipo de adesivo apresenta uma boa resistência à temperatura elevada (120°C).

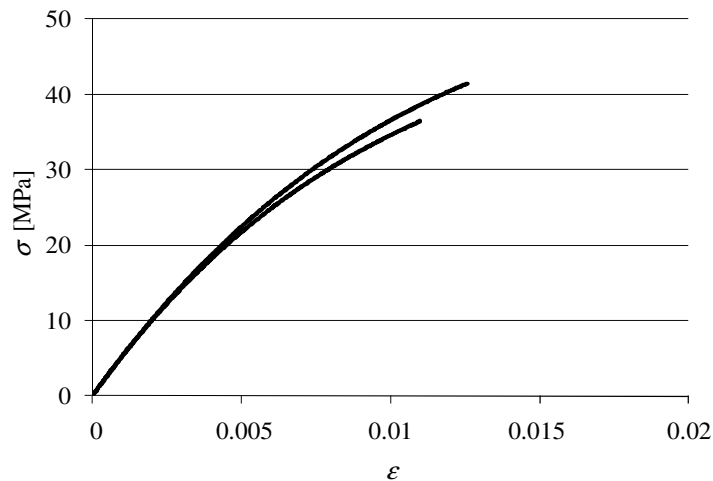


Figura 50 - Curvas Tensão/Deformação do adesivo AV138 [26]

A mistura dos componentes resina/endurecedor faz-se numa razão de 100/40 respectivamente. A mistura é feita recorrendo-se a um ‘‘vidro de relógio’’, uma balança digital e uma espátula. O adesivo foi aplicado nos substratos com a espátula, mas antes deve-se garantir a perfeita homogeneidade da resina com o endurecedor.

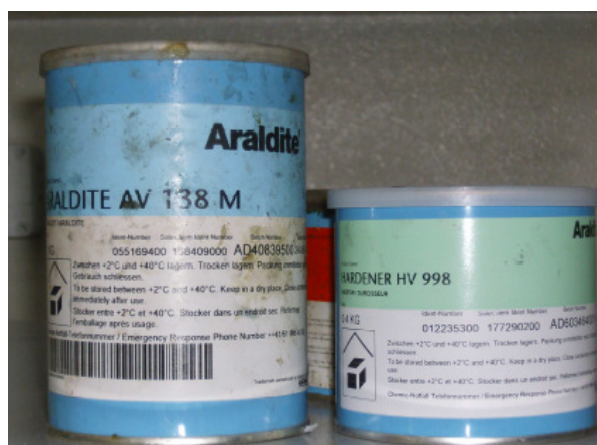


Figura 51 - Adesivo AV138M com endurecedor HV 998

4.1.4 Adesivo 7888 L10 (VP) da SikaForce®

O SikaForce® 7888 trata-se de um adesivo de base poliuretano fornecido em bi-componente de 600 ml (Componente A+B) altamente estrutural, que cura por reacção química dos dois componentes para formar um polímero.

Tabela 9 - Propriedades do adesivo 7888 L10 (VP):

Propriedade	7888
Módulo de Young, E [GPa]	1.89±0.248
Tensão de cedência, σ_y [MPa]	13.2±4.83
Tensão de rotura, σ_f [MPa]	28.6±2.0
Deformação à rotura, ϵ_f [%]	43.0±0.6

4.2 Resultados dos ensaios de tracção dos provetes maciços do adesivo 7888 L10 (VP) SikaForce®

Os provetes maciços (Figura 52) foram fixos nas amaras da máquina MTS810 do LET da FEUP. O extensómetro (com um comprimento de referência de $L_0 = 25\text{mm}$), montado na zona de menor secção do provete, registou os valores da Força (N) e da Deformação (ϵ) ao longo do ensaio até ocorrer a rotura do provete (Figura 53). Os provetes foram ensaiados a um velocidade de 1 mm/min. As propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 7888 L10 (VP) obtidas são apresentadas na Tabela 9 apresentada na Página 55.

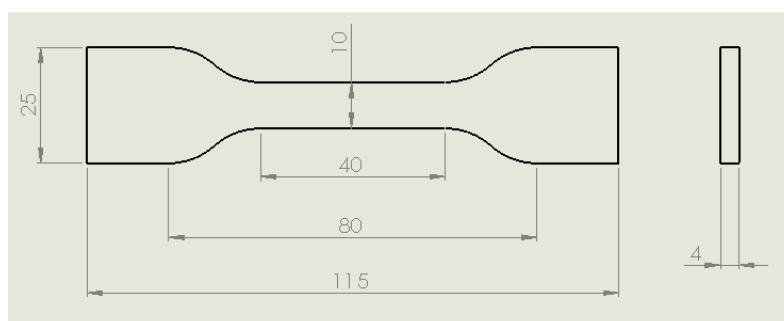


Figura 52 - Dimensões provetes maciços segundo norma EN ISO 527-2



Figura 53- Provete maciço de adesivo 7888 após ensaio bulk

Após se terem os valores obtidos no ensaio, trataram-se os dados no software Microsoft Excel[®]. Sabendo que $\sigma=F/A$, dividiu-se a força de solicitação registada durante o ensaio pela área dos provetes (10 mm de largura x 4 mm de espessura). A Figura 54 é uma curva típica Tensão (σ) – Deformação (ϵ) para o adesivo SikaForce[®] 7888.

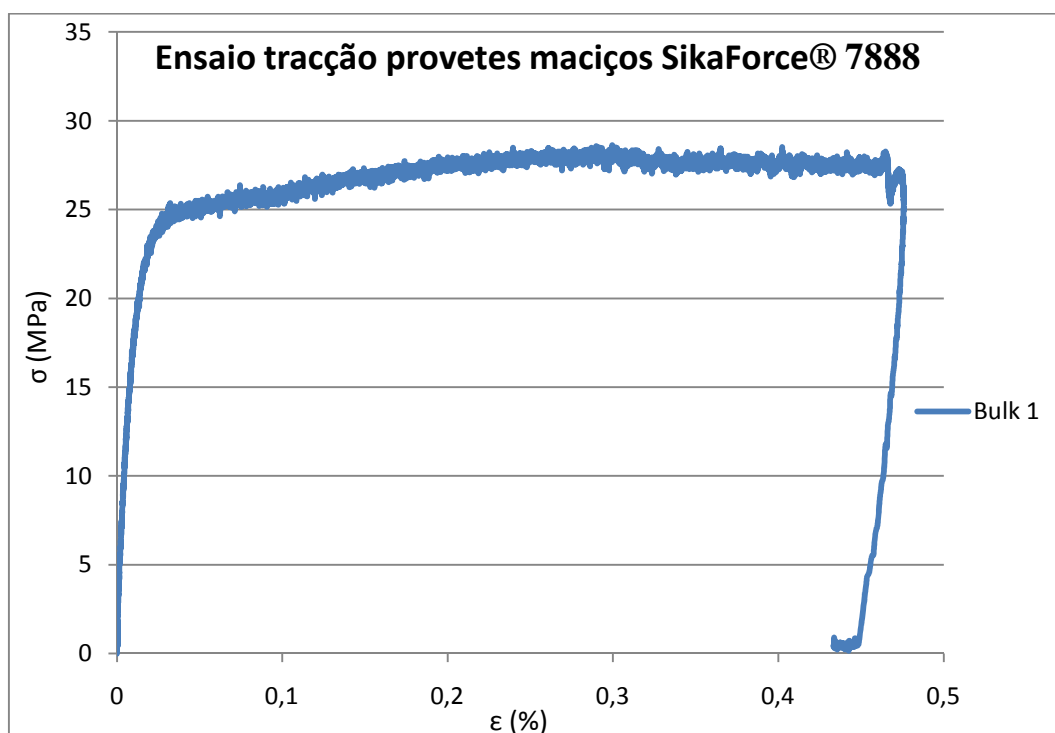


Figura 54 - Curva σ - ϵ do adesivo 7888 L10 (VP)

Para a obtenção do Módulo de Young não se consulta qualquer norma. O valor do Módulo de Young E foi obtido seleccionando dois pontos da curva na zona elástica. Após se ter inserido a curva tangente a passar na zona elástica da curva Tensão/Deformação, obteve-s o Módulo de Young, visto este ser o declive dessa mesma recta. A tensão de cedência foi obtida a 0,2% da recta tangente à curva Tensão/Deformação na zona elástica. Para efeitos de simulação numérica a tensão de cedência foi considerada como sendo igual à tensão de rotura.

4.3 Resultados dos ensaios DCB do adesivo 7888 L10 (VP) SikaForce®

O ensaio DCB foi usado, com braços em aço, para determinar a taxa crítica de libertação de energia em modo I, G_{IC} . Durante o ensaio, os valores da força P e do deslocamento aplicado, δ , foram registados. Os provetes foram ensaiados a uma velocidade de 0,5 mm/min.

Uma curva P - δ típica obtida para os ensaios DCB é apresentada na Figura 55. Inicialmente, à medida que a carga aplicada aumenta, a energia elástica armazenada no provete aumenta até que a energia armazenada iguale a energia necessária para dar início à propagação da fenda, G_{IC} . A iniciação da fenda caracteriza-se por uma diminuição da carga aplicada. À medida que a fenda progride nota-se uma relaxação da carga aplicada acompanhada de uma diminuição da energia elástica armazenada.

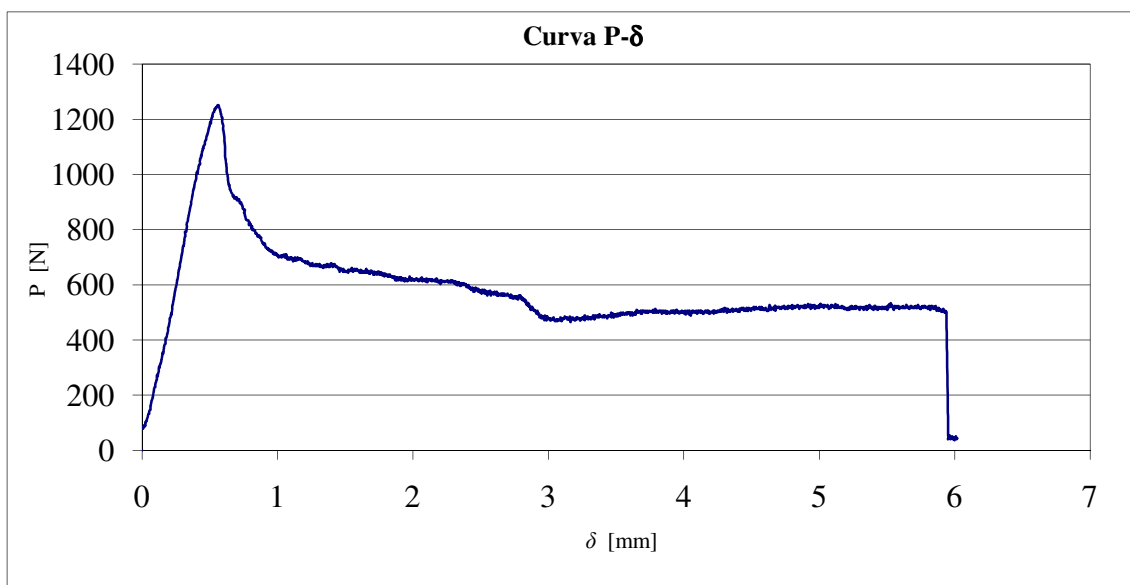


Figura 55 - Curva P - δ típica para um ensaio DCB

No ANEXO A constam as curvas P - δ referente aos provetes validados pelo ensaio DCB. A força máxima obtida nestes ensaios foi de:

$$F_{m\acute{a}x} = 1183 \pm 174 \text{ N}$$

Após os ensaios verificaram-se que as roturas ocorreram conforme Figura 56, em que é possível observar adesivo em ambas as superfícies do provete.



Figura 56 - Rotura observada nos provetes dos ensaios DCB com adesivo SikaForce® 7888

Face à superfície de rotura observada nos ensaios DCB realizados com o adesivo SikaForce® 7888, decidiu-se fazer uma nova série de 4 provetes DCB em que se aplicou o Sika® Aktivator 205 (Figura 57). Este produto é uma solução alcoólica que contém uma substância que melhora a adesão das superfícies tais como metais, plásticos, vidros e superfícies pintadas.

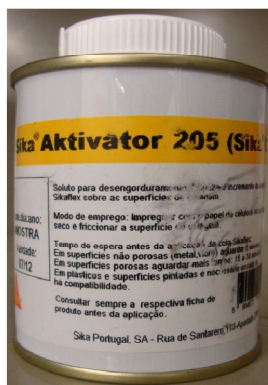


Figura 57 - Sika Aktivator 205

Os ensaios realizados aos provetes DCB em que se utilizou o Sika® Aktivator 205 devolveram valores inferiores aos obtidos sem a utilização do Sika® Aktivator, pelo que estes valores foram desconsiderados.

O método utilizado para avaliar de G_{Ic} foi o CBBM (pág. 23). Por este método obteve-se o seguinte valor:

$$G_{Ic} = 0,7023 \pm 0,075 \text{ N/mm}$$

No **ANEXO B** são apresentadas as curvas $P-\delta$ e as curvas R dos ensaios ENF.

4.4 Resultados dos ensaios ENF do adesivo 7888 L10 (VP) SikaForce®

O ensaio ENF foi usado para determinar a taxa crítica de libertação de energia em modo II, G_{IIc} . Registaram-se os valores da força P e do deslocamento aplicado, δ (Figura 58). Os provetes foram ensaiados a uma velocidade de 0,5 mm/min.

Para se obter a taxa crítica de libertação de energia foi apenas usado o método CBBM. Este método apenas requer o conhecimento de cada curva $P - \delta$.

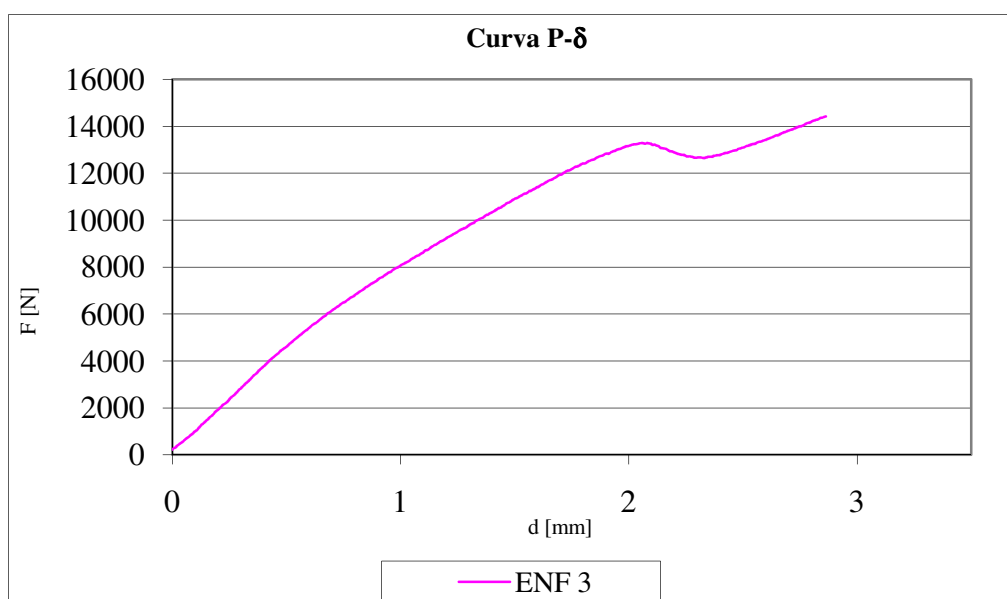


Figura 58 – Curva $P - \delta$ obtida no ensaio ENF

A análise da curva $P - \delta$ mostra que a carga P aumenta até uma zona de carga máxima, onde se dá início à propagação da fenda. Nesse instante, a carga decresce porque a fenda atingiu a energia necessária, para iniciar a sua propagação estável.

Através da curva R (Figura 59), é possível observar o patamar que nos dá o valor da taxa crítica de libertação de energia.

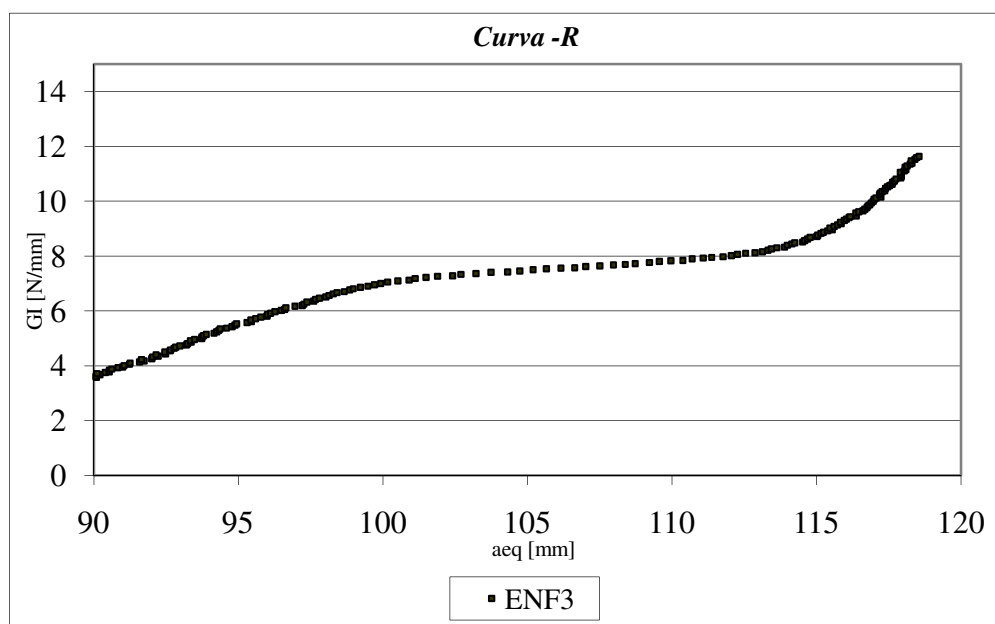


Figura 59 - Curva R do ensaio ENF

Dos ensaios ENF validados obteve-se o seguinte valor para a taxa crítica de libertação de energia:

$$G_{IIc} = 8,72 \pm 1,22 \text{ N/mm}$$

4.5 Resultados dos ensaios de tracção das juntas adesivas com o adesivo AV138

A força de rotura obtida experimentalmente nas juntas adesivas com o adesivo AV138 vem apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 - Força rotura experimental juntas adesivas AV138

Comprimento de sobreposição L (mm)	Nº provetes ensaiados	Nº provetes validados	F rotura (N)	Desvio Padrão (N)
10	5	4	4175	236
20		4	4208	241
30		5	4667	232
40		5	5378	440
50		4	5872	612
60		5	6669	450
70		3	7055	833
80		3	8106	460

Verificou-se que as juntas com um comprimento de sobreposição de 10 e 20 mm tiveram uma rotura coesiva (Figura 60). Nas juntas com comprimento de sobreposição

de 30 até 80 mm observou-se uma rotura intralaminar (Figura 61). Da análise visual a rotura intralaminar ocorre primeiro no compósito e depois ocorre no adesivo.



Figura 60 – Rotura coesiva nas juntas com 10 mm sobreposição com adesivo AV138

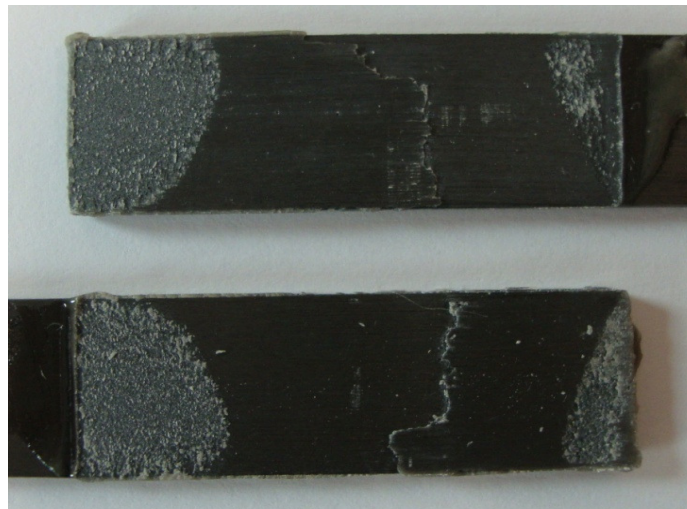


Figura 61 - Rotura intralaminar nas juntas com 40 mm de sobreposição com o adesivo AV138

A Figura 62 mostra os valores obtidos dos ensaios de juntas adesivas com AV138 em material compósito.

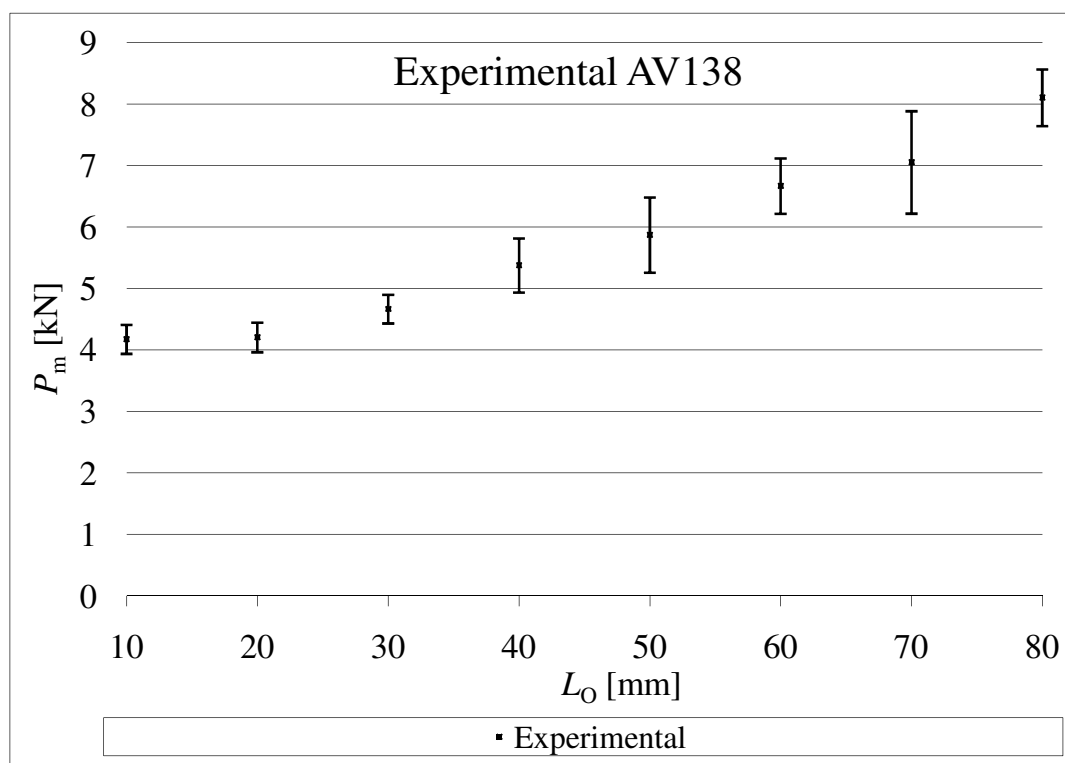


Figura 62 - Resultado experimentais ensaios tracção juntas com AV138

Os resultados experimentais resultantes dos ensaios de tracção, das juntas de simples sobreposição com o adesivo AV138, mostram que a força de rotura vai sendo sucessivamente maior à medida que o comprimento de sobreposição aumenta. No ANEXO C são apresentadas as curvas $P-\delta$ obtidas nos ensaios experimentais das juntas de sobreposição simples (comprimento de sobreposição 20 e 50 mm).

4.6 Resultados dos ensaios de tracção das juntas adesivas com o adesivo 7888

A força de rotura nas juntas adesivas com o adesivo 7888 L10 (VP) obtida pelo teste de tracção das juntas vem apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 - Força de rotura experimental das juntas adesivas com o adesivo SikaForce® 7888 L10 (VP)

Comprimento de sobreposição L (mm)	Nº provetes ensaiados	Nº provetes validados	F rotura (N)	Desvio Padrão (N)
10	5	5	4663	947
20		5	7948	939
30		5	12822	1103
40		5	17328	1348
50		5	21040	1462
60		5	24973	1510
70		4	28623	2502
80		2	31306	78

Nos ensaios das juntas com este adesivo observaram roturas coesivas desde o comprimento de sobreposição de 10 mm até 80 mm (Figura 63), contudo verificou-se que algumas das juntas com comprimento de sobreposição de 80 mm sofreram roturas no compósito o que evidencia proximidade de alteração no modo de rotura das juntas para rotura axial nos substratos, devido à magnitude das tensões axiais desenvolvidas. No entanto, nos casos em que a rotura é a evidenciada na Figura 64, esta ocorrência deve-se a um ligeiro desalinhamento das fibras com a direcção longitudinal do provete, resultante do processo de empilhamento ou durante o corte.



Figura 63 - Roturas obtidas nas juntas com comprimento de sobreposição de 50 mm



Figura 64 - Rotura no compósito observado em algumas juntas de sobreposição simples com 80 mm de sobreposição

A Figura 65 mostra os valores obtidos dos ensaios de juntas adesivas com 7888.

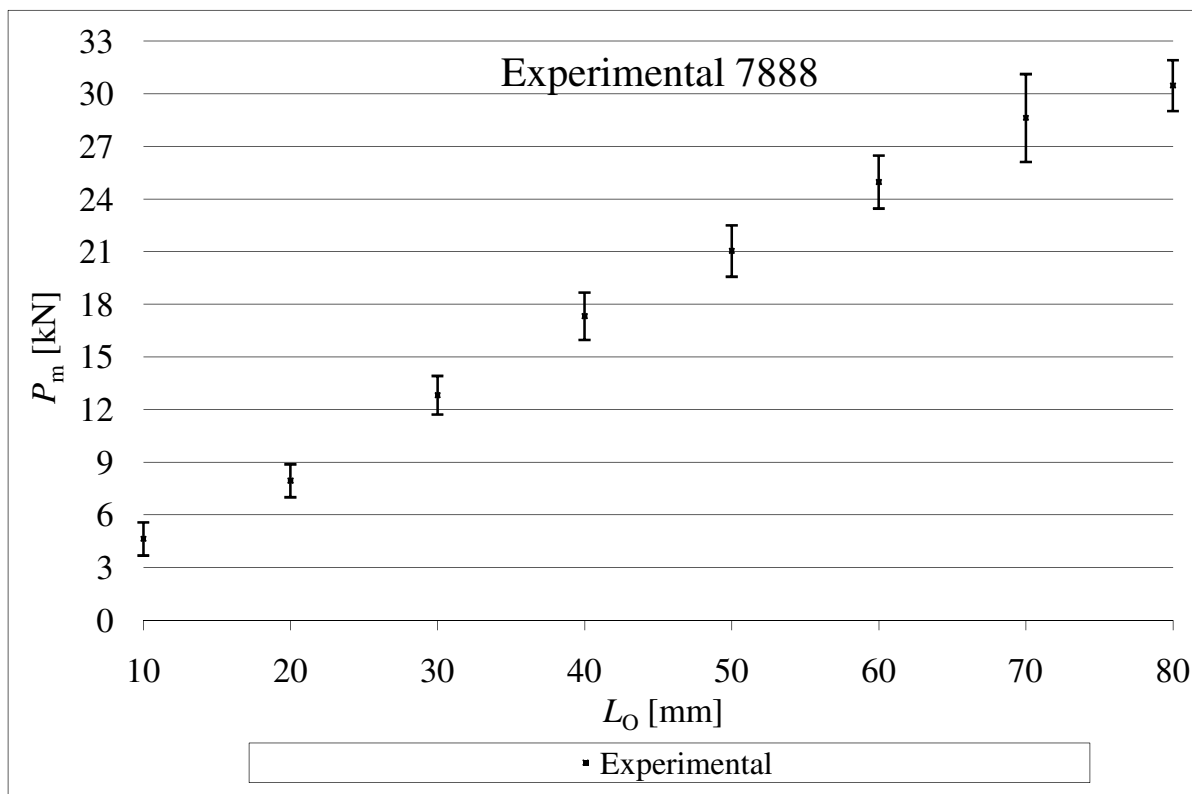


Figura 65 - Resultado experimentais ensaios tracção das juntas com 7888

Os resultados experimentais resultantes dos ensaios de tracção, das juntas de simples sobreposição com o adesivo 7888, mostram que à semelhança com os resultados com o adesivo AV138 a força de rotura vai sucessivamente sendo maior com o aumento da força de sobreposição. No **ANEXO D** são apresentadas duas das curvas $P-\delta$ (comprimento de sobreposição de 40 e 70 mm) obtidas nos ensaios de tracção das juntas adesivas com o adesivo 7888, assim como a superfície de rotura obtida.

5 Previsão da resistência das juntas de sobreposição simples

Um dos objectivos deste trabalho foi o de avaliar as tensões nas juntas e de tentar prever a resistência das mesmas. Para tal analisou-se as juntas adesivas recorrendo a métodos analíticos e a elementos finitos.

5.1 Métodos analíticos

Analisaram-se as tensões nas juntas recorrendo a vários modelos analíticos. O primeiro deles foi o critério Cedência Generalizada. Segundo este critério o adesivo entra em rotura quando o adesivo entra totalmente em plasticidade. A Força de Rotura (P_m) é calculada por:

$$P_m = \tau_f \times b \times L_o \quad (46)$$

Em que b é a largura da junta, L_o é o comprimento de sobreposição e τ_f é a tensão admissível de corte do adesivo. Calculou-se a força de rotura por este método à tensão de corte de rotura do adesivo (τ_f).

Também se recorreu ao modelo analítico de Hart-Smith, usando a análise elástica recorrendo à tensão de arrancamento no compósito e à tensão de corte do adesivo. Com a análise elástica com a tensão de arrancamento τ_a determinou-se a força para qual se atinge a tensão de arrancamento do compósito ($\tau_a = 42,60 \text{ MPa}$) [25] supondo que existe uma continuidade de tensões na zona entre o compósito e o adesivo, ou seja, considerou-se que a tensão de arrancamento no adesivo é igual à do compósito. Também se utilizou esta mesma formulação com a tensão de corte do adesivo τ_f . Como meio de suporte para este método analítico utilizou-se um ficheiro em Maple® que determina esse mesmo valor inserindo os valores das propriedades do substrato, adesivo e respectivas dimensões dos provetes.

5.2 Análise por elementos finitos

5.2.1 Critério tensão de corte máxima (CTCM)

Também se tentou prever a resistência da junta recorrendo ao Critério da Tensão de Corte Máxima (CTCM). Este critério considera que a rotura ocorre quando a tensão de corte na junta adesiva (τ_c) iguala a tensão de corte de corte do adesivo (τ_f).

Para se obter os valores utilizando este critério recorreu-se ao software ABAQUS®. Na utilização deste critério considerou-se o adesivo era modelado por elementos sólidos convencionais, com 4 nós de integração reduzida (CPE4R).

Após se correr o modelo, analisou-se em que incremento a tensão de corte de rotura do adesivo foi atingida. Para isso recorreu-se a uma análise visual, colocando como limite na barra de distribuição de cores a tensão de corte do adesivo. Após se

verificar o incremento em que a tensão de rotura ao corte do adesivo era atingida, zona a cinzento, (Figura 66), obteve-se a força de rotura como sendo a observada nesse ponto.

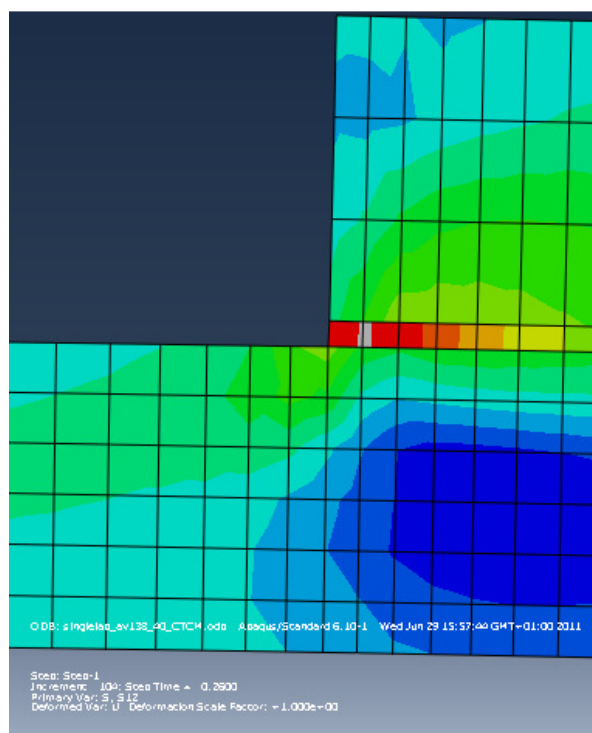


Figura 66 - Ponto em que se atingiu a rotura no adesivo AV138 pelo critério CTCM

5.2.2 Elementos coesivos

Utilizou-se também os elementos finitos com recurso a elementos coesivos, com o objectivo de prever a resistência das juntas adesivas de simples sobreposição.

As juntas de sobreposição simples (Figura 67) foram modeladas com as dimensões tal como os provetes usados nos ensaios experimentais. As propriedades dos substratos e dos adesivos usadas foram os já publicados em trabalhos anteriores ou no caso do adesivo SikaForce® 7888 L10 (VP) as propriedades utilizadas foram as obtidas pelos ensaios realizados para caracterização na secção 4.1.4. e estão descritos na Tabela 12.



Figura 67 – Junta de sobreposição simples modelada em ABAQUS®

Tabela 12 - Propriedades dos adesivos para simulação em elementos finitos

	PROPRIEDADES			
	AV138	Unidades	7888	Unidades
t_n^0	39,45	MPa	28,60	MPa
t_s^0	30,20	MPa	20,00	MPa
E	4890	MPa	1890	MPa
G	1560	GPa	727	GPa
G_n^c	0,20	N/mm	0,723	N/mm
G_s^c	0,38	N/mm	8,72	N/mm

Outro passo a que se deu atenção na construção deste modelo numérico foi a definição da malha. Conforme se analisou através dos modelos analíticos para distribuição de tensões nas juntas as zonas das extremidades estão sujeitas a maiores tensões pelo que se utilizou uma malha mais refinada nessas zonas (Figura 68).

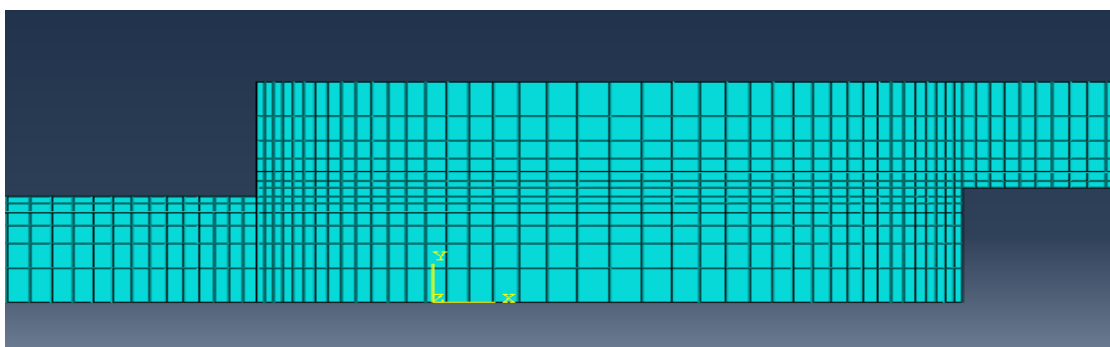


Figura 68 - Malha utilizada no modelo L0 =10 mm

Durante os ensaios experimentais com as juntas ligadas com o adesivo AV138 verificou-se que a partir do comprimento de sobreposição de 30 mm a rotura acontecia no compósito, ou seja, ocorreu uma rotura intralaminar. Para permitir esta possibilidade na simulação numérica, foi necessário introduzir no modelo elementos coesivos no substrato (Figura 69). Os elementos coesivos para simular a rotura intralaminar foram posicionados a uma distância de 0,05 mm do adesivo (estimativa feita por observação dos provetes fracturados e respectiva comparação com o seu estado inicial). As propriedades destes elementos foram obtidas no trabalho de Campilho, RDSG [25] por uma metodologia inversa aplicada ao mesmo material e idêntica sequência de empilhamento.

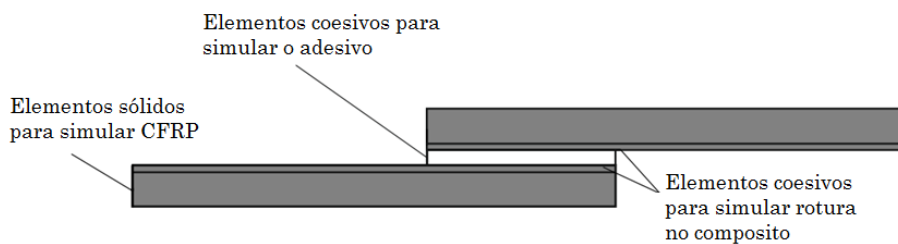


Figura 69 - Localização dos diferentes elementos na simulação das juntas

Depois se o modelo ter terminado a simulação, é necessário manipular a informação de força a obter-se a curva P- δ (Figura 70) da simulação. A força máxima obtida é a previsão força de rotura da junta.

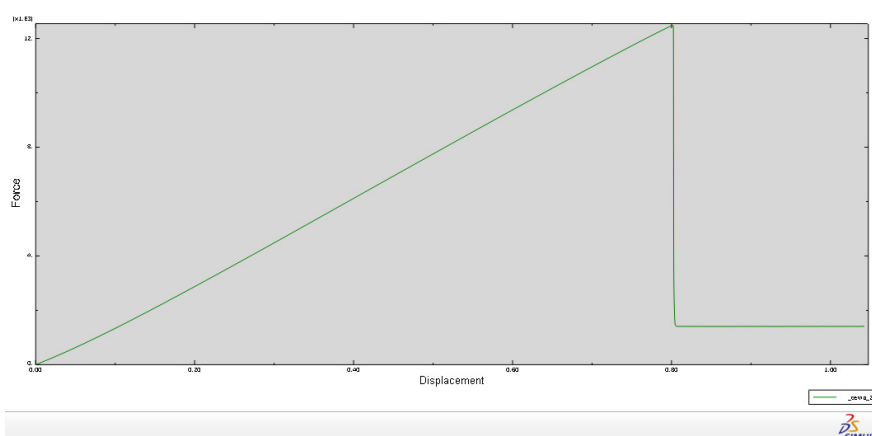


Figura 70 - Exemplo da Curva P- δ de uma simulação do Abaqus®

As simulações realizadas em ABAQUS® devolveram roturas no compósito (Figura 71) com o adesivo AV138 e roturas no adesivo (Figura 72) com o adesivo 7888 conforme foi observado nos ensaios experimentais destas juntas.

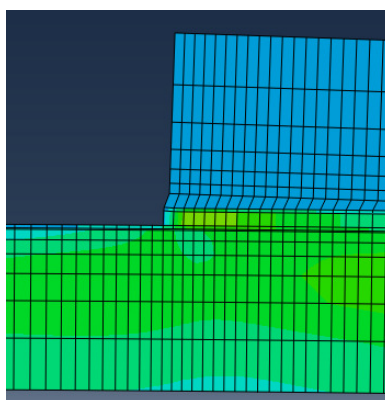


Figura 71 - Ruptura no compósito na simulação da junta de sobreposição simples com o AV138

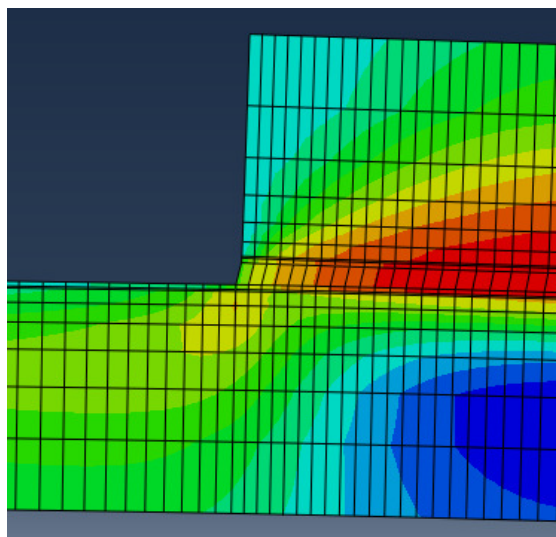


Figura 72 - Rotura no adesivo obtida por simulação na junta de sobreposição simples com adesivo 7888

5.3 Resultados

Nesta sub-secção serão apresentados os valores obtidos pelos diferentes critérios usados assim como será feita a comparação dos valores experimentais para a resistência das juntas adesivas com os valores previstos pelos diversos métodos usados.

O adesivo Araldite® AV138 da HUNSTMANN, é um adesivo frágil, os valores obtidos pelos métodos analíticos abordados são apresentados de seguida na Tabela 13.

Tabela 13 - Valores da Força de Rotura para o AV138 pelos métodos analíticos

L (mm)	AV138		
	Força Rotura (kN)		
	Cedência Generalizada τ_f	Hart-Smith Elástica Arrancamento τ_a	Hart-Smith Elástica Corte τ_f
10	4,53	1,92	1,96
20	9,06	2,25	2,18
30	13,59	2,64	2,39
40	18,12	3,12	2,61
50	22,65	3,74	2,83
60	27,00	4,53	3,05
70	27,00	5,56	3,27
80	27,00	6,96	3,49

Para comparação de valores colocou-se os valores experimentais e valores para a rotura das juntas previstos pelos métodos analíticos na Figura 73.

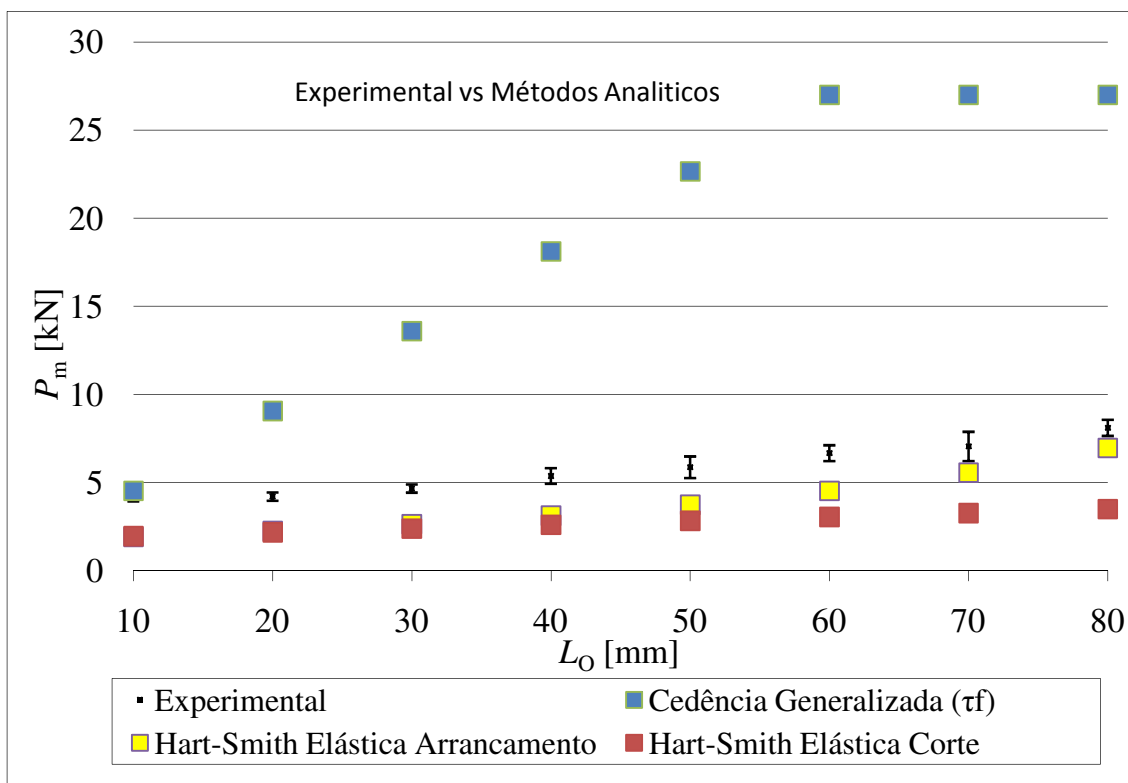


Figura 73 - Gráfico comparativo Experimental vs Modelos Analíticos para juntas com adesivo AV138

Já recorrendo à simulação numérica determinou-se os seguintes valores para a força de rotura das juntas, tanto pelo critério CTCM como utilizando o MDC, que se apresentam na Tabela 14.

Tabela 14 - Valores da força de rotura para o AV138 pelo critério do CTCM e MDC

L (mm)	AV138	
	Força Rotura (kN)	
	CTCM	MDC
10	2,33	2,23
20	2,87	3,87
30	3,23	5,20
40	3,82	6,31
50	4,04	7,36
60	4,34	8,39
70	4,51	9,35
80	4,90	10,20

Colocou-se os valores da força de rotura das juntas com o adesivo AV138 na Figura 74 para comparar com as previsões obtidas pelos métodos de simulação numérica.

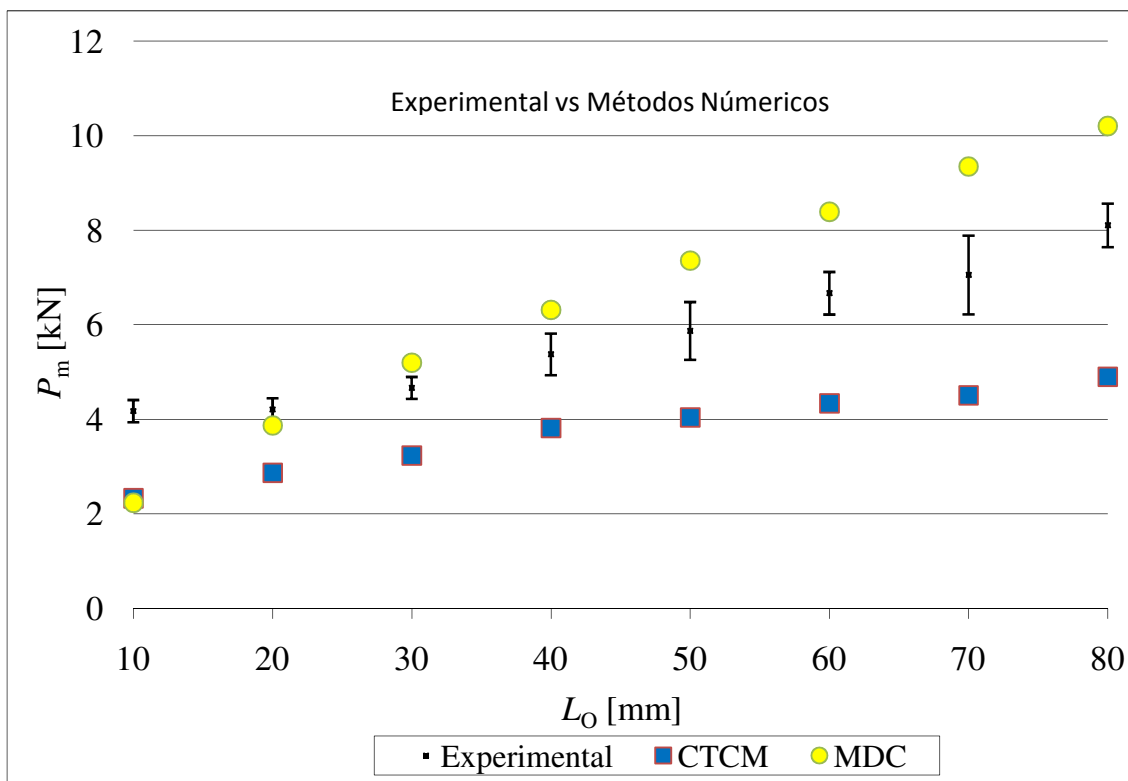


Figura 74 - Gráfico comparativo valores das forças de rotura Experimental vs Numérico para as juntas com o adesivo AV138

O CTCM apresentou valores inferiores à resistência das juntas daquele que foi obtido experimentalmente, já o MDC começou por devolver valores inferiores mas a partir do comprimento de sobreposição de 30 mm devolveu valores superiores aos registados nos ensaios das juntas. De entre estes dois métodos o MDC foi o que devolveu valores mais próximos do valor experimental, sendo a maior diferença registada na junta com comprimento de sobreposição de 10 mm e a menor na junta com comprimento de sobreposição de 20 mm.

Apesar da boa correspondência entre os valores experimentais e numéricos (MDC), as diferenças observadas devem-se à aproximação efectuada na derivação das leis coesivas do adesivo e do compósito, nomeadamente em termos de formato da lei (forma triangular) para modelação de roturas dúcteis. De facto, as leis triangulares possuem uma porção descendente que normalmente é incluída no modelo para facilitar a convergência da solução, apesar de não corresponder ao comportamento real do adesivo. Por outro lado, o adesivo foi caracterizado em condições tipicamente diferentes das quais foi simulado, pois algumas propriedades foram obtidas por ensaios ao adesivo

em bruto, sabendo-se que as propriedades dos adesivos variam bastante conforme se encontrem em bruto ou em camada fina de adesivo. Apesar destes factores, as previsões de rotura foram semelhantes às roturas observadas experimentalmente.

Os valores obtidos pelos métodos analíticos para os ensaios de juntas adesivas com o adesivo dúctil SikaForce® 7888 são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Forças de rotura previstos pelos métodos analíticos para o 7888

7888	
Força Rotura (kN)	
L (mm)	Cedência Generalizada σ_r
10	3,00
20	6,00
30	9,00
40	12,00
50	15,00
60	18,00
70	21,00
80	24,00

A Figura 75 permite comparar os resultados experimentais com os previstos pelos métodos analíticos.

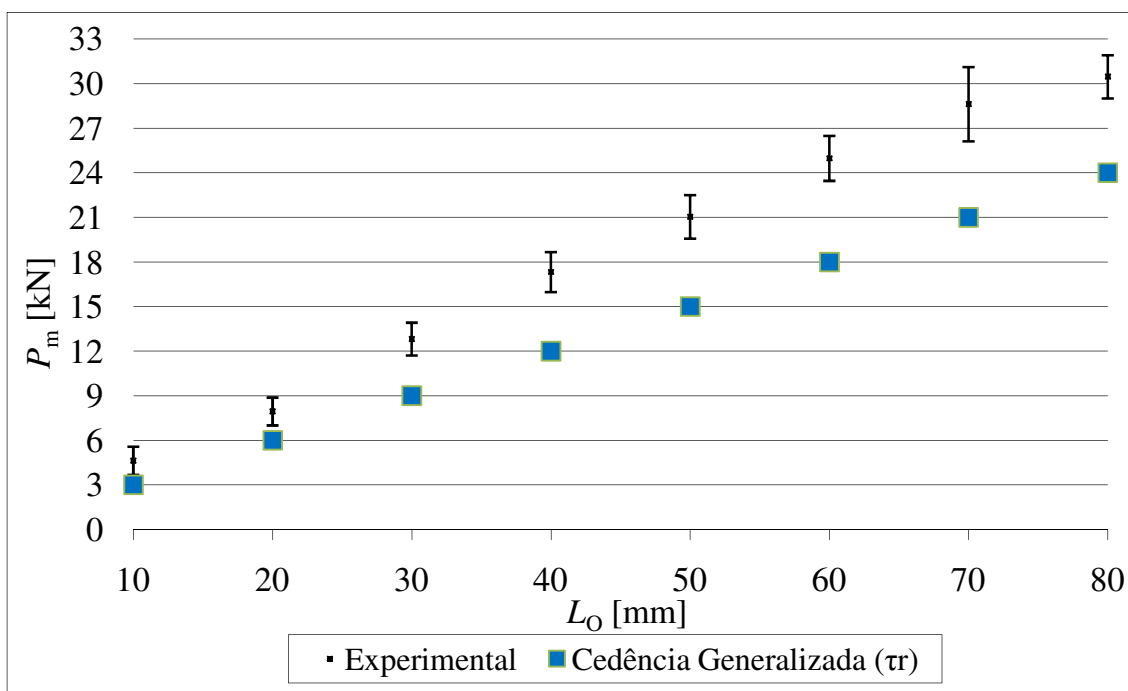


Figura 75 - Gráfico comparativo Experimental vs Modelos Analíticos para juntas com o adesivo 7888

A análise das tensões pelos métodos analíticos para o adesivo 7888, permitiu observar que o método de Cedência Generaliza que utiliza a τ_r , como critério, devolve previsões próximas do experimental. Este critério devolveu para este adesivo forças de rotura mais baixas que o observado no experimental, esta diferença situou-se na ordem dos 28 %.

A análise pelos métodos numéricos devolveu os seguintes valores para as forças de rotura das juntas adesivas com o adesivo 7888 apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 - Valores obtidos para a previsão da resistência das juntas pelos métodos numéricos

L (mm)	7888	
	Força Rotura (kN)	
	CTCM	MDC
10	1,55	2,93
20	1,96	5,63
30	2,22	8,25
40	2,54	10,58
50	2,74	12,48
60	2,93	14,25
70	3,10	15,73
80	3,32	17,00

A Figura 76 apresenta o gráfico para comparação Experimental vs Numérico.

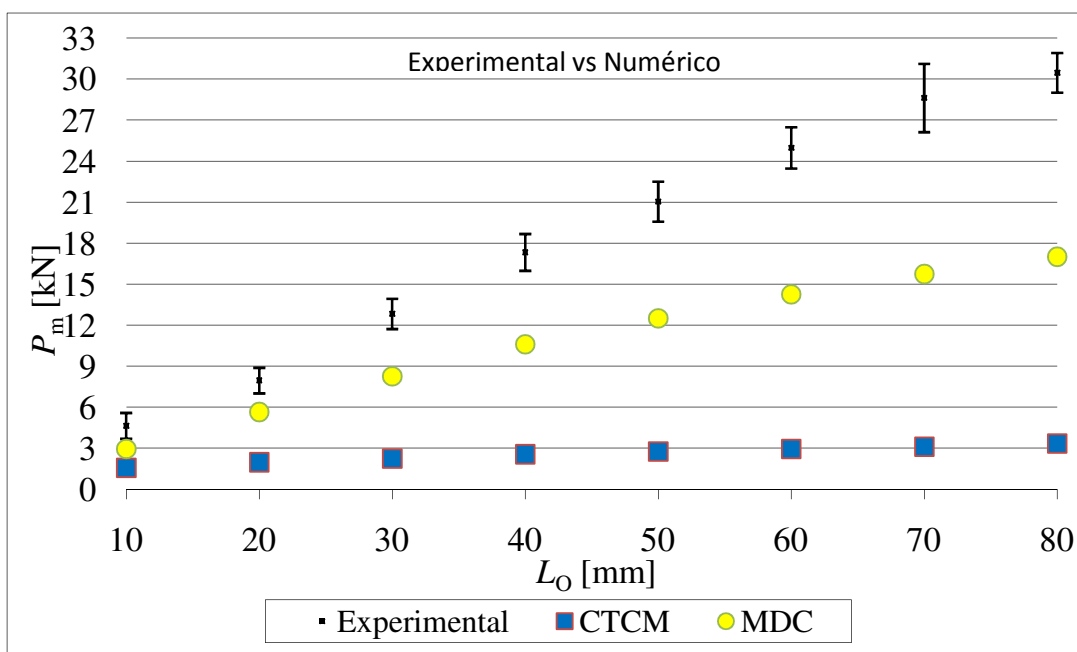


Figura 76 - Gráfico comparativo Experimental vs Numérico para as juntas de sobreposição simples com o adesivo 7888

Os valores obtidos pela simulação numérica para a resistência das juntas com o adesivo 7888, mostraram que o CTCM previu valores bastante abaixo do obtido experimentalmente, já com o MDC obteve-se valores inferiores aos obtidos nos ensaios das juntas, entre o comprimento de 10 mm e 40 mm a diferença anda na ordem dos 30%, enquanto entre o comprimento de sobreposição de 50 mm a 80 mm a diferença é maior sendo de 40%. Em média o diferença entre os valores obtidos com o modelo de dano coesivo e os valores experimentais andaram na ordem dos 39%.

A subprevisão dos valores experimentais de rotura que se obteve pelos MDC é em grande parte devida à utilização de uma lei coesiva de forma triangular para a simulação de um adesivo de elevada ductilidade. De facto, para os valores de t_n^0 , t_s^0 , G_n^c e G_s^c utilizados, devido aos elevados valores de G_n^c e G_s^c , as leis coesivas apresentam uma zona de amaciamento de tensões de dimensões consideráveis em que o nível de tensões reduz linearmente para 0 quando na realidade deveria existir um patamar de tensões. Como tal, aquando da rotura, o nível de tensões e de transmissão de esforços pelo adesivo é inferior ao real, o que provoca a diferença observada na resistência máxima das juntas. Por outro lado, observou-se que esta diferença aumenta gradualmente com o comprimento de sobreposição, o que é facilmente explicável pelas distribuições de tensões de corte no adesivo (que governam o processo de rotura), na medida em que os gradientes destas tensões aumentam gradualmente com o comprimento de sobreposição, por causa dos efeitos conhecidos de aumento de deformação diferencial dos substratos na zona de sobreposição devido à maior sobreposição e aumento dos esforços transmitidos. Assim, para sobreposições reduzidas, tem-se um nível de tensões aproximadamente constante, o que leva a que a previsão da rotura dependa maioritariamente dos valores de t_n^0 e t_s^0 , das leis coesivas e a previsão é aceitável. Ao aumentar o comprimento de sobreposição, no instante de rotura vai haver elementos no adesivo na zona de amaciamento, com níveis de tensão inferior ao real (patamar de tensões), levando a uma subprevisão cada vez maior da resistência das juntas.

6 Conclusões e trabalhos futuros

6.1 Conclusões

Neste trabalho foram estudadas juntas de sobreposição simples com aderentes de compósito de carbono-époxy, com dois adesivos, um bastante frágil (AV138) e um bastante dúctil (7888). Também foi realizado a caracterização do adesivo 7888 recorrendo a ensaios de tracção de provetes maciços, DCB e ENF, para utilização das propriedades nos modelos de previsão. Para o adesivo AV138 tal procedimento não foi necessário, pois o adesivo já se encontrava caracterizado em trabalhos anteriores.

Para uma melhor compreensão da capacidade dos modelos de previsão disponíveis para este tipo de junta, foram testados alguns modelos analíticos e um numérico, que apresentam resultados diferentes em função do tipo de adesivo utilizado.

O modelo numérico baseou-se em elementos finitos do Abaqus[®] e elementos coesivos que permitem simular a iniciação do dano e a propagação do mesmo.

O trabalho experimental permitiu concluir que a força de rotura para juntas de simples sobreposição em material compósito aumenta à medida que o comprimento de sobreposição aumenta. Este aumento da força de rotura em função do comprimento de sobreposição é tanto maior quanto maior for a ductilidade do adesivo.

A previsão da força de rotura pelos métodos analíticos para o adesivo frágil (AV138) permite observar que o critério de plasticidade generalizada não permite obter previsões razoáveis. Para os métodos analíticos as previsões recorrendo aos modelos de Hart-Smith Elástica considerando a tensão de arrancamento e a tensão de corte obtêm-se valores bastante razoáveis. De entre estes dois critérios o critério de Hart-Smith Elástica de Arrancamento é o que devolve melhores previsões, abaixo dos valores experimentais na ordem dos 37 %. Verifica-se que até o comprimento de sobreposição em que a rotura foi coesiva (20 mm) o critério de Hart-Smith Elástica de Arrancamento e Hart-Smith Elástica de Corte devolve resultados idênticos, contudo a partir do comprimento de sobreposição de 30 mm, altura em que se começa a verificar uma rotura no compósito os valores devolvidos pelo critério de Hart-Smith Elástica de Corte começa a divergir do valor experimental à medida que o comprimento de sobreposição aumenta. Por outro lado o critério de Hart-Smith Elástica de Arrancamento continua a devolver valores que acompanham os valores experimentais.

Relativamente aos métodos numéricos, estes apresentam uma previsão consideravelmente melhor relativamente aos métodos analíticos, sendo que recorrendo ao MDC temos uma previsão inferior ao experimental para o comprimento de sobreposição de 10 mm de cerca de 45%, contudo com o comprimento de sobreposição de 80 mm já obtemos uma previsão de rotura por excesso na ordem dos 26 %.

Já analisando a força de rotura pelo critério de Cedência Generalizada utilizando a tensão de corte de rotura τ_r para o adesivo dúctil (7888), chega-se a uma previsão de rotura inferior à obtida experimentalmente na ordem dos 28 %.

Em relação aos métodos numéricos o MDC é mais uma vez aquele que devolve uma melhor previsão, sendo a diferença entre a previsão do modelo e o experimental na ordem dos 39%.

Este estudo de juntas adesivas de sobreposição permite concluir que com métodos simples de previsão de resistência de juntas tais como, Hart-Smith ou Cedência Generalizada, foi possível obter melhores resultados que com métodos numéricos complexos.

6.2 Trabalhos futuros

Como sugestão de trabalho a desenvolver no futuro indica-se o seguinte:

- Fabricar juntas de simples sobreposição com material compósito com outros parâmetros, aos utilizados neste trabalho, nomeadamente com outros adesivos, com espessura de adesivo diferentes ou com uma espessura de substrato diferente, para averiguar as variações de modos de rotura e resistência nestas condições.
- Prever a resistência das juntas de simples sobreposição com o adesivo SikaForce[®] 7888 recorrendo ao modelo de dano coesivo utilizando uma lei trapezoidal.
- Realizar novos ensaios de tracção a provetes maciços de adesivo SikaForce[®] 7888 e seguir a norma para obtenção do Módulo de Young (E), visto neste trabalho a norma não ter sido consultada.
- Realizar ensaio de caracterização do adesivo SikaForce[®] ao corte, por exemplo através de um ensaio TAST (*Thick Adherend Shear Test*).

Referências

1. Mazza, P; Martini, F; Sala, B; Magi, M; Colombini, M; Giachi, G; Landucci, F; Lemorini, C *et al.* (2006). A new Palaeolithic discovery: tar-hafted stone tools in a European Mid-Pleistocene bone-bearing be,. *Journal of Archaeological Science* **33**: 1310
2. Wadley, L; Hodgskiss, T; Grant, M (2009). From the Cover: Implications for complex cognition from the hafting of tools with compound adhesives in the Middle Stone Age, South Africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **106** (24): 9590–4
3. Worlton, D.C. 'Experimental Confirmation of Lamb Waves at Megacycle Frequencies', *Journal of Applied Physics*, Vol. 32, (1961), pp 967-971.
4. Adams, R. D. e Comyn, F. (2000). Joining using adhesives, *Assembly Automation* **20**(2): 109-117.
5. da Silva, L. F., de Moura, M. F. S. F. e de Magalhães, A. G. (2007). *Juntas Adesivas Estruturais*, Publindústria, Porto.
6. Tong, L. e Steven, G. P. (1999), *Analysis and Design of Structural Bonded Joints*, Kluwer Academic publishers, Boston/Dordrecht/London.
7. Chaves, Filipe José Palhares, *Aplication of Adhesive Bonding in PVC Windows*, FEUP, 2005
8. Ashby MF, Jones DRH. *Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing and Design*. Butterworth Heinemann, Oxford, United Kingdom, 1999.
9. Ashby MF, Jones DRH. *Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing and Design*. Butterworth Heinemann, Oxford, United Kingdom, 1999.
10. Mazumdar, S.K., *Composites Manufacturing Materials, Product and Process Engineering*, (2002), CRC Press, London
11. <http://www.boeing.com/commercial/787family/background.html>

12. <http://www.environmentalgraffiti.com/sciencetech/boeing-dreamliner-composites-trial-part-ii/13303>
13. Volkersen O. Niekraftverteilung in zugbeanspruchten mit konstantenlaschenquerschnitten. Luftfahrtforschung 1938;15:41–7.
14. Goland M, Reissner E. The stress in cemented joints. J Appl. Mech.1944;11: A17–27.
15. Hart-Smith, L. J., “Adhesive-Bonded Single-Lap Joints”, NASA CR-112236, January 1973.
16. Esteves, V. H. C. (2010), Determinação da Tenacidade de um Adesivo em Solicitações em Modo Misto (I+II), Tese de Mestrado, Departamento Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
17. da Silva, L. F., Campilho, R. D. S. G.. Advances in numerical modelling of adhesive joints
18. da Silva, L. F., Adams, R. D., (2007). *Techniques to reduce the peel stress in adhesive joints with composites*, International Journal of Adhesion & Adhesives
19. Kim KS, Yoo JS, Yi YM, Kim CG. *Failure mode and strength of uni-directional composite single lap bonded joints with different bonding methods*. Composite Structures 2006;72: 477-485
20. Li S, Thouless MD, Waas AM, Schroeder JA, Zavattieri PD. *Mixed-mode cohesive-zone models for fracture of an adhesively bonded polymer–matrix composite*. Engineering Fracture Mechanics 2006;73: 64-78.
21. Ávila AF, Bueno PO. *Stress analysis on a wavy-lap bonded joint for composites*. International Journal of Adhesion & Adhesives 2004;24:407-414.
22. ASTM D 5868-01, Standard test method for lap shear adhesion for fiber reinforced plastic (FRP) bonding. In: Annual Book of American Society for Testing Materials, 2001, 15.06. p. 518–19.
23. Adams R.D., Comyn J., Wake W.C. Structural adhesive joints in engineering. London: Chapman-Hall; 1997

24. Campilho, R.D.S.G. (2005), *Modelação da Execução de Reparações em Materiais Compósitos*, Mc. Thesis, Porto, Portugal, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
25. Campilho, R.D.S.G., *Repair of Composite and Wood Structures*, Ph.D., Porto, Portugal, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
26. Campilho, R.D.S.G., Pinto, A.M.G., Banea, M.D., Silva, R.F. and da Silva, L.F.M., *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*, ACE-X 2010
27. da Silva, L.F.M., da Silva, R.A.M., Chousal, J.A.G., Pinto, A.M.G., *Adhesion Sci. Technol.***22**, 15 (2008)

ANEXO A

Ensaio DCB

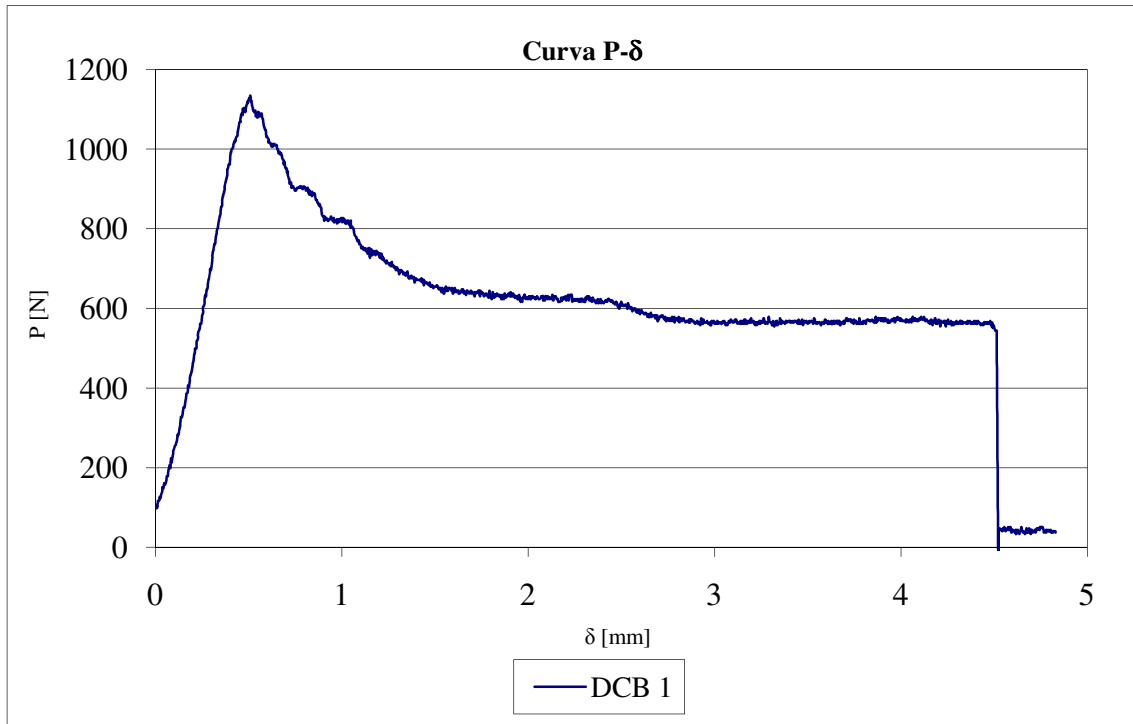


Figura 77 - Gráfico da Curva P- δ ensaio DCB provete 1

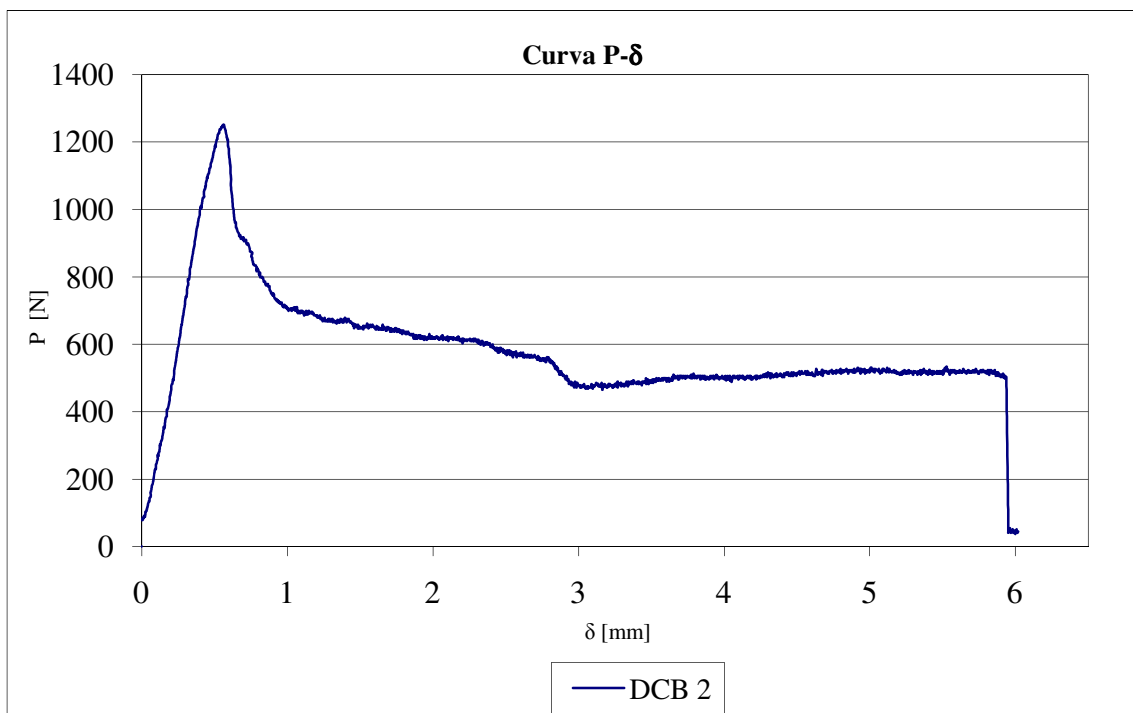


Figura 78 - Gráfico da Curva P- δ ensaio DCB provete 2

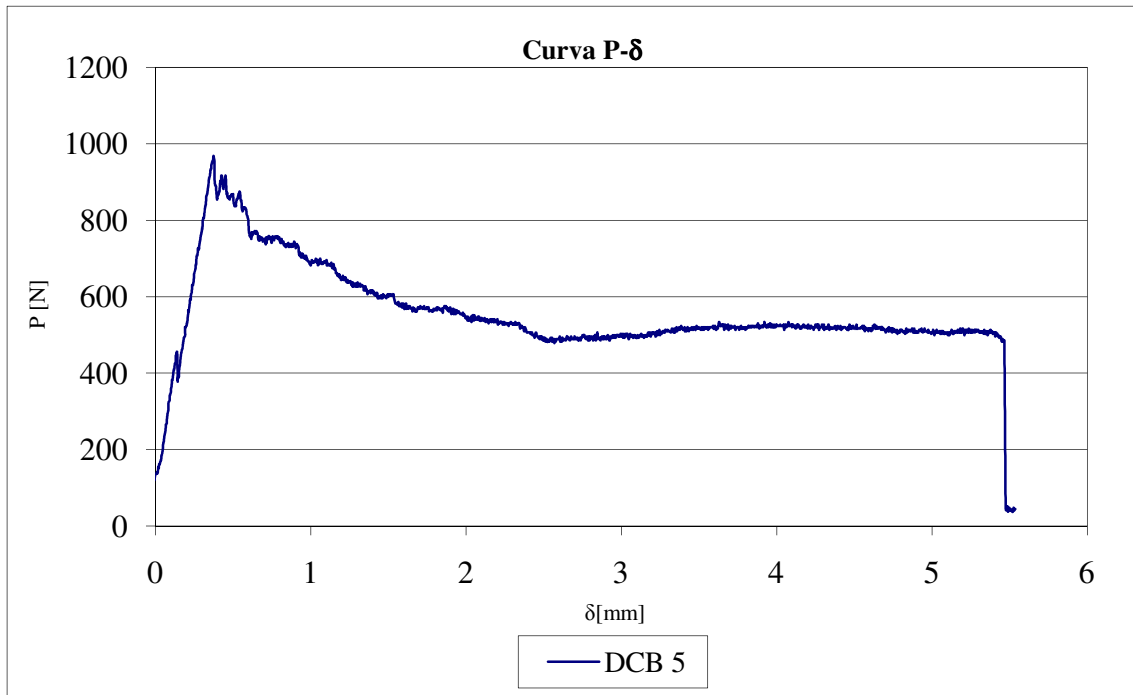


Figura 79 - Gráfico da Curva P- δ ensaio DCB provete 5

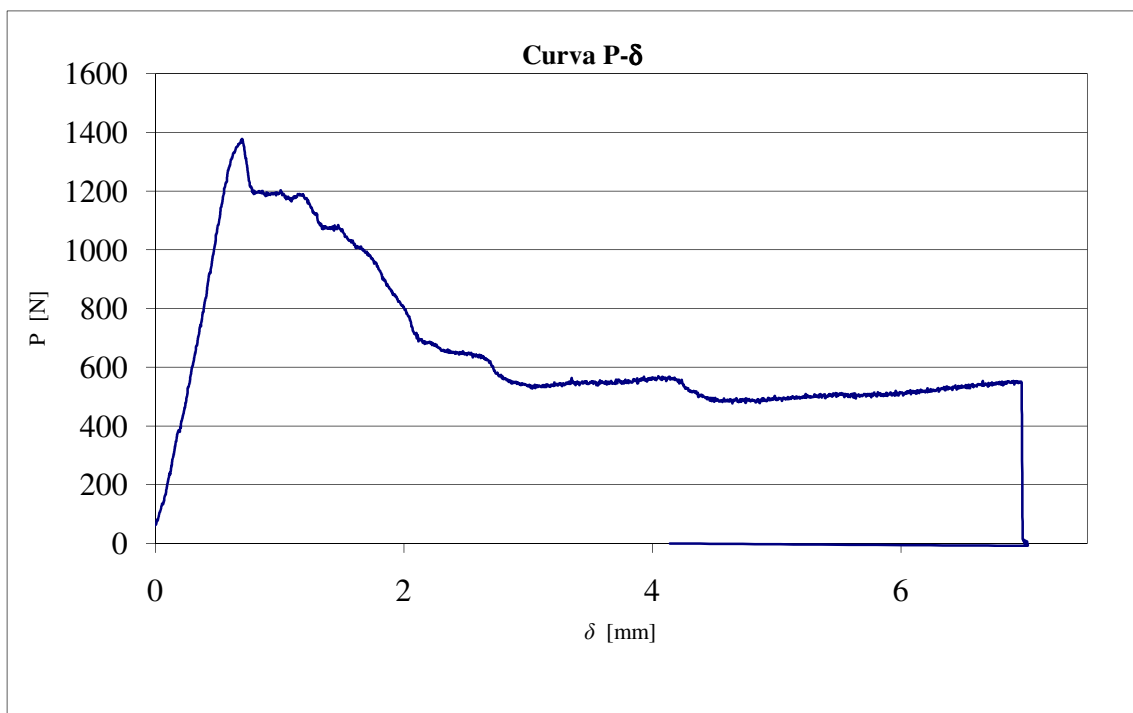


Figura 80 - Gráfico da Curva P- δ ensaio DCB provete 6

ANEXO B

Ensaio ENF

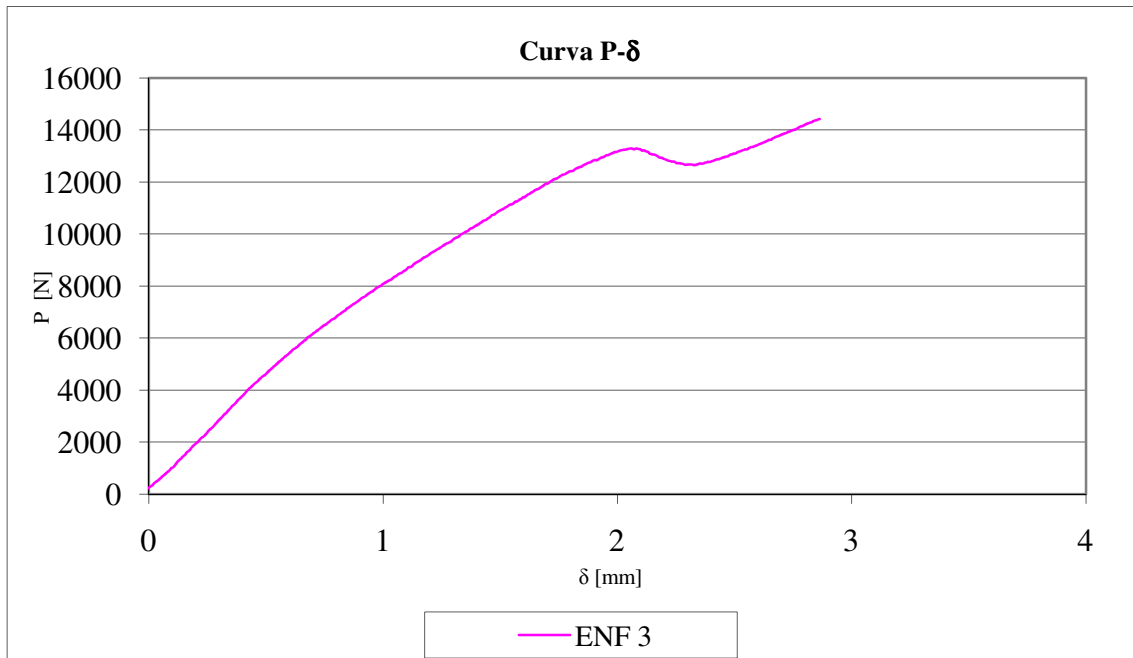


Figura 81 - Gráfico Curva P- δ ensaio ENF provete 3

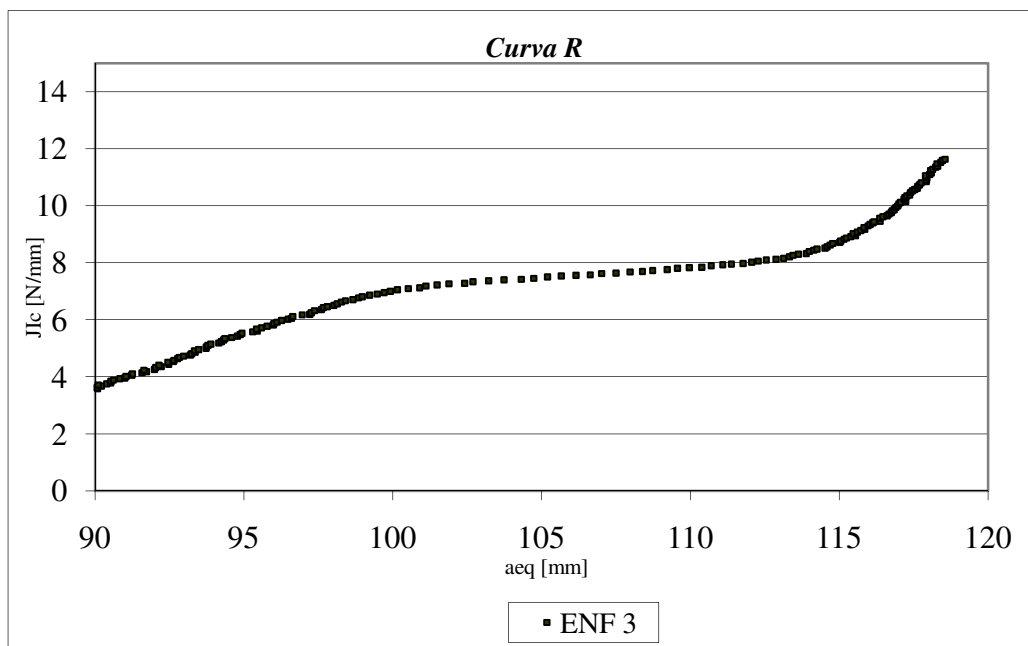


Figura 82 - Gráfico da Curva R ensaio ENF provete 3

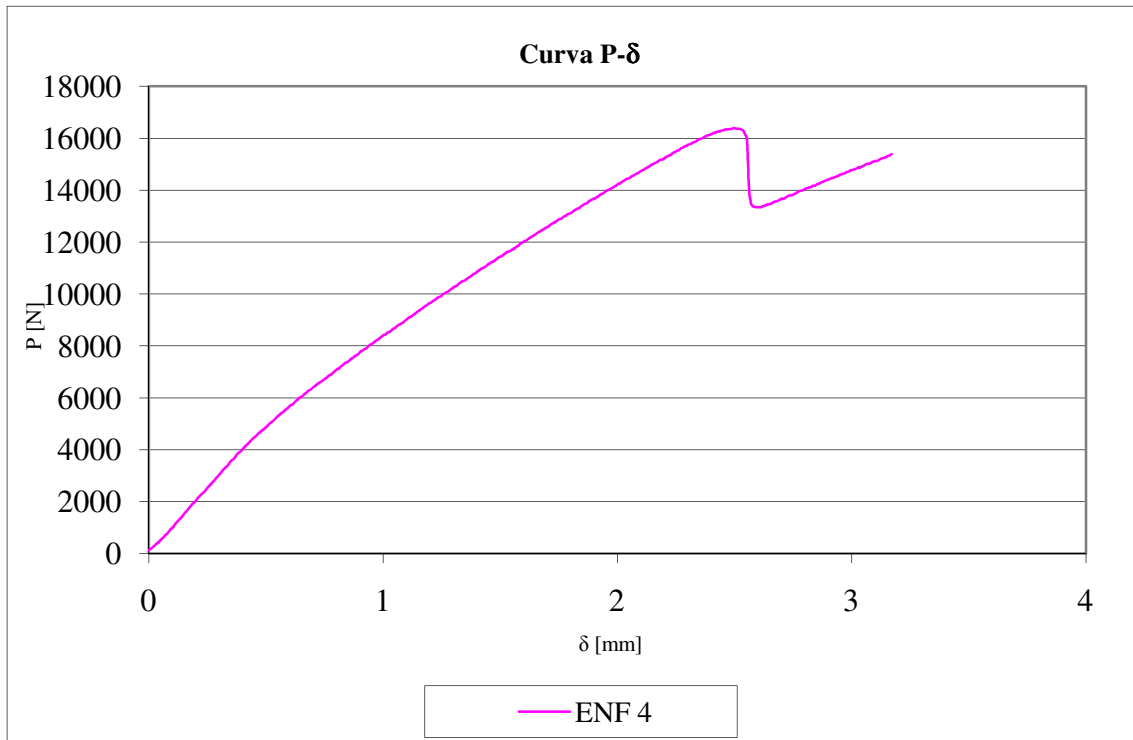


Figura 83 - Gráfico Curva P- δ ensaio ENF provete 4

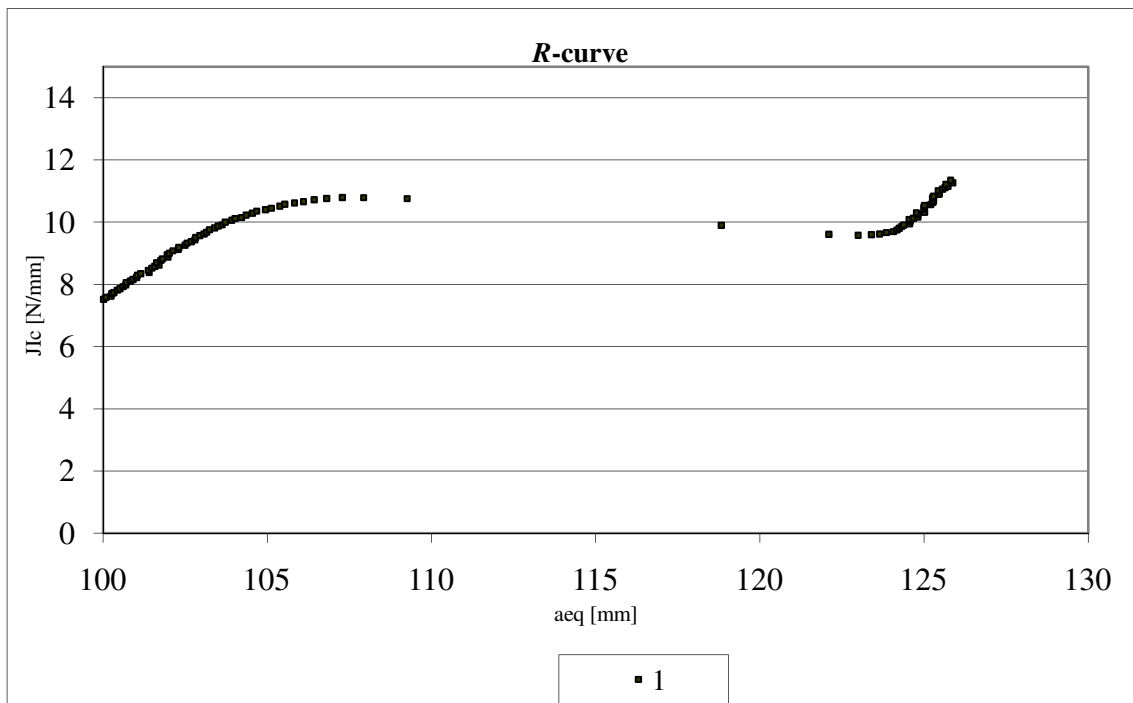


Figura 84 - Gráfico da Curva R ensaio ENF provete 4

ANEXO C

Ensaio Tracção Juntas Adesivas AV138

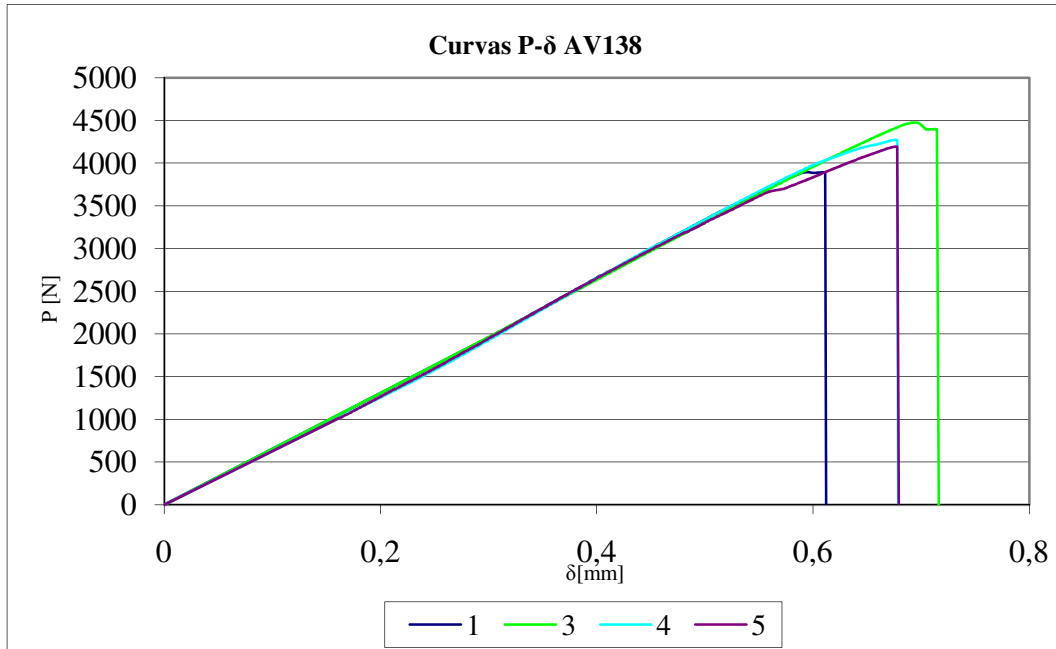


Figura 85 - Curvas F-d das juntas de sobreposição simples com AV138 comprimento de sobreposição de 20 mm

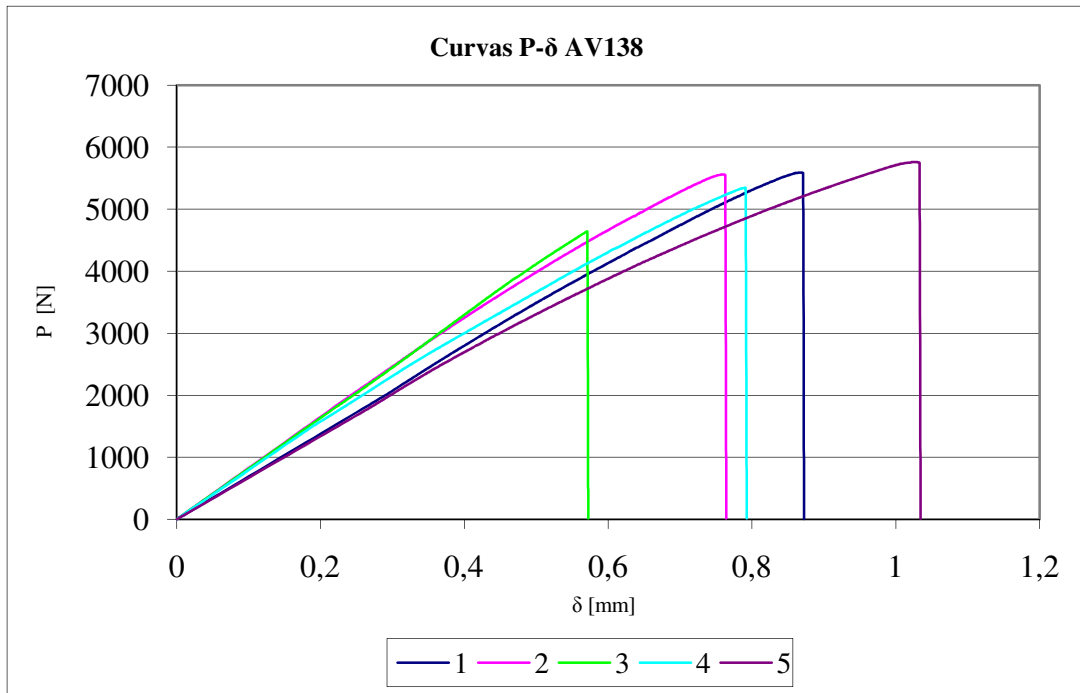


Figura 86 - Curvas F-d das juntas de sobreposição simples com AV138 comprimento de sobreposição de 50 mm



Figura 87 - Superfície rotura juntas de sobreposição simples com AV138 comprimento de sobreposição de 50 mm

ANEXO D

Ensaio Tracção Juntas Adesivas 7888

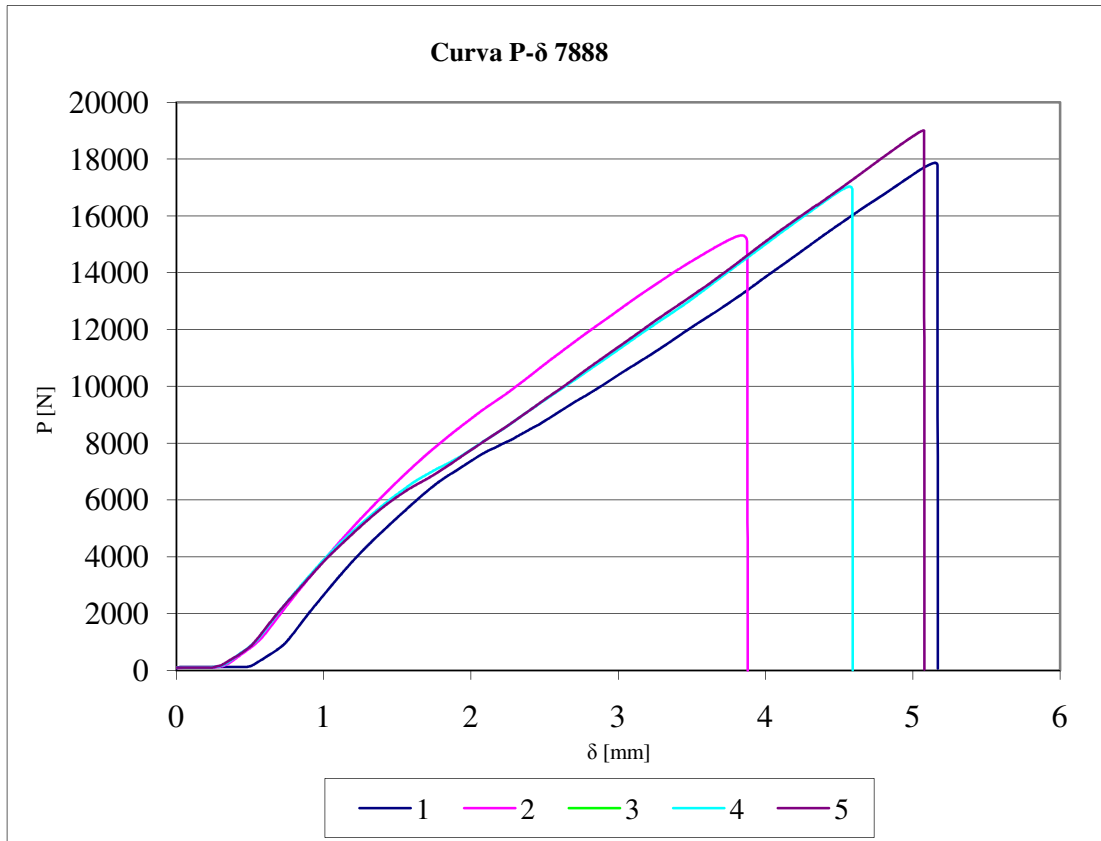


Figura 88 - Curvas F-d das juntas de sobreposição simples com 7888 comprimento de sobreposição de 40 mm



Figura 89 – Superfície rotura da junta com comprimento de sobreposição de 40 mm com o adesivo 7888

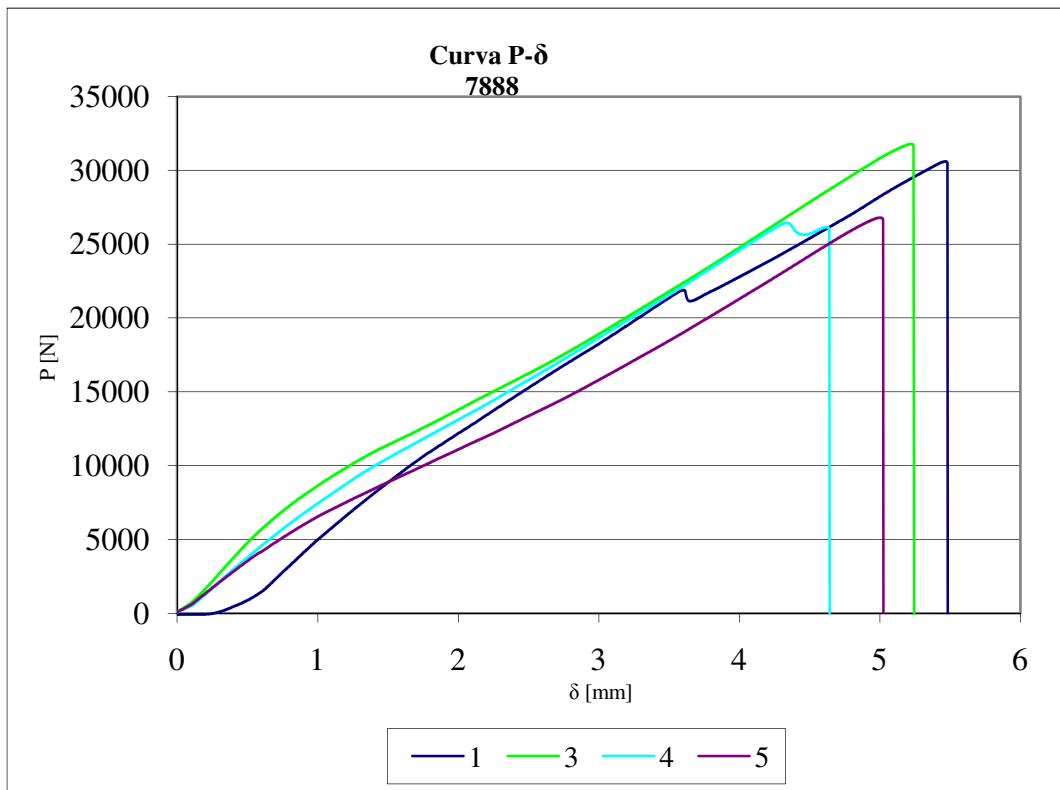


Figura 90 - Curvas F-d das juntas de sobreposição simples com 7888 comprimento de sobreposição de 70 mm



Figura 91 – Superfície de ruptura da junta com comprimento de sobreposição de 70 mm com o adesivo 7888