



Modelação numérica de juntas adesivas estruturais com adesivos reforçados com microfibras de vidro

MIGUEL ARAUJO DA ROCHA

outubro de 2021

MODELAÇÃO NÚMERICA DE JUNTAS ADESIVAS ESTRUTURAIS COM ADESIVOS REFORÇADOS COM MICROFIBRAS DE VIDRO

Miguel Araújo da Rocha

1150500

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

MODELAÇÃO NÚMERICA DE JUNTAS ADESIVAS ESTRUTURAIS COM ADESIVOS REFORÇADOS COM MICROFIBRAS DE VIDRO

Miguel Araújo da Rocha

1150500

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e coorientação do Mestre Paulo Jorge Roque de Oliveira Nóvoa e do Doutor Isidro de Jesús Sánchez-Arce.

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Doutora Elza Maria Morais Fonseca

Professora Coordenadora, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Coorientadores

Mestre Paulo Jorge Roque de Oliveira Nóvoa

Assistente Convidado, ISEP

Doutor Isidro de Jesús Sánchez-Arce

Investigador, INEGI

Arguente

Doutor Igor André Rodrigues Lopes

Investigador, FEUP

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer ao meu Orientador Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e ao meu Coorientador Doutor Paulo Jorge Roque de Oliveira Nóvoa pela ajuda prestada e pela sabedoria que demonstraram ter ao longo deste trabalho. Aproveito para agradecer também ao Doutor Isidro Jesús Sánchez-Arce pela ajuda no desenvolvimento do mesmo.

Por último, e não menos importante, estou grato por todo o suporte que a minha família e amigos prestaram.

PALAVRAS-CHAVE

Adesivos, Modificação de adesivos, Método de Elementos Finitos, Modelos de Dano Coesivo, Microfibras de vidro.

RESUMO

A tecnologia de ligação através de adesivos estruturais permite a solução de certos problemas associados às técnicas mais tradicionais, tais como as ligações aparafusadas ou rebitadas, soldadura, entre outras. Várias indústrias têm beneficiado deste método de união, como a área do calçado, construção civil ou automóvel. Além destas, a indústria aeronáutica tem sido a principal promotora do desenvolvimento de juntas adesivas estruturais. De facto, existem vários aspetos que fazem com que esta técnica possa ter uma maior aceitação, desde a redução do peso, possibilidade de unir diferentes materiais e, mais especificamente, um melhor comportamento à fadiga ou sob cargas cíclicas. Por serem amplamente utilizados, torna-se obrigatório conhecer certas variáveis inerentes aos adesivos, tais como a tenacidade à tração (G_{IC}) e ao corte (G_{IIC}).

Este trabalho abrange a modelação numérica do comportamento de juntas adesivas estruturais com adesivos reforçados com microfibras de vidro. As juntas adesivas estão sujeitas, principalmente, a tensões de corte e arrancamento, podendo sofrer variações consideráveis ao longo do comprimento de sobreposição. Desta forma, é necessário prever o comportamento das tensões por métodos numéricos. Realizaram-se os ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) e *End-Notched Flexure* (ENF) para a caracterização à tração e ao corte, respetivamente, pretendendo-se assim a conceção de leis coesivas do adesivo com variadas concentrações de microfibras de vidro. Estas leis serão utilizadas em modelos numéricos usando Modelos de Dano Coesivo (MDC), para a previsão do comportamento e resistência das juntas adesivas. O estudo incide no efeito que a adição de microfibras de vidro possa ter na variação de G_{IC} e G_{IIC} do adesivo em questão, ou seja, o SikaForce® 803. São analisados os resultados de parâmetros como a força máxima ($P_{máx}$), o deslocamento máximo ($\delta_{máx}$) e o deslocamento da força máxima ($\delta P_{máx}$). As concentrações mássicas de fibra de vidro consideradas são 0%, 0,15%, 0,35% e 0,55%. Posteriormente, realizou-se uma análise da sensibilidade de parâmetros coesivos com o objetivo de perceber a influência que estes possam ter sobre o comportamento dos modelos numéricos em questão.

Após a obtenção das curvas numéricas P - δ e respetiva comparação com as curvas experimentais, observou-se que estas revelavam uma aproximação razoável. Mais pormenorizadamente, os valores obtidos através do MDC triangular exibiram uma rigidez bastante semelhante aos valores obtidos através dos ensaios experimentais (especialmente o ensaio DCB), juntamente com $P_{máx}$ e $\delta P_{máx}$.

KEYWORDS

Adhesive, Adhesive Modification, Finite Element Method, Cohesive Zone Modelling, Glass Microfibers.

ABSTRACT

Joining with structural adhesives allows for the solution of certain problems associated with more traditional techniques, such as fastened, riveted, or welded joints, among others. Several industries have benefited from this joining method, such as the footwear, civil engineering, or automotive sectors. In addition to these, the aeronautical industry has been the main promoter of the development of structural adhesive joints. In fact, there are several aspects that make this technique more accepted, from weight reduction, possibility of joining different materials and, more specifically, a better fatigue behavior or under cyclic loads. As they are widely used, it is mandatory to know certain variables inherent to adhesives, such as the tensile (G_{IC}) and shear fracture toughness (G_{IIC}).

This work covers the numerical modeling of the behavior of structural adhesive joints with adhesives reinforced with glass microfibers. Adhesive joints are mainly subjected to shear and peel stresses, which may undergo considerable variations along the overlap length. Thus, it is necessary to predict the behavior of the stresses by numerical methods. The Double-Cantilever Beam (DCB) and End-Notched Flexure (ENF) tests were carried out for the characterization of tensile and shear behaviour, respectively, aiming at the design of cohesive laws of the adhesive with varied concentrations of glass microfibers. These laws will be used in numerical models using Cohesive Zone Models (CZM) to predict the behavior and strength of adhesive joints. The study focuses on the effect that the addition of glass microfibers may have on the variation of G_{IC} and G_{IIC} of the adhesive in question, i.e., SikaForce® 803. The results of parameters such as maximum load (P_{max}), maximum displacement (δ_{max}) and displacement at maximum load (δP_{max}) are analyzed. The considered fiberglass mass concentrations are 0%, 0.15%, 0.35% and 0.55%. Subsequently, a sensitivity analysis of the cohesive parameters was carried out in order to understand the influence they may have on the behavior of the numerical models in question.

After obtaining the numerical P - δ curves and comparing them with the experimental curves, it was found that these showed a reasonable approximation. In more detail, the values obtained by the triangular MDC exhibited a quite similar stiffness to the values obtained by the experimental tests (especially the DCB test), together with P_{max} and δP_{max} .

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	Duas Dimensões
4ENF	<i>Four-Point End-Notched Flexure</i>
ADCB	Asymmetric Double-Cantilever Beam
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATDCB	<i>Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam</i>
CBBM	<i>Compliance-Based Beam Method</i>
CBT	<i>Corrected Beam Theory</i>
CCM	<i>Compliance Calibration Method</i>
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Plastic</i>
CNT	<i>Carbon Nano-Tubes</i>
Curva-R	Curva resistente
CZM	<i>Cohesive Zone Model</i>
DBT	<i>Direct Beam Theory</i>
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
ELS	<i>End-Loaded Split</i>
EN	<i>European Normalization</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
EPD	Estado Plano de Deformação
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Plastic</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JSS	Junta de Sobreposição Simples
MDC	Modelos de Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MMB	<i>Mixed-Mode Bending</i>

NF	Norma Francesa
PVC	Policloreto de vinil
SDEG	<i>Stiffness Degradation</i>
TAST	<i>Thick Adherent Shear Test</i>
TDCB	<i>Tapered Double-Cantilever Beam</i>
ZPF	Zona de Processo de Fratura

Lista de Símbolos e unidades

a	Comprimento da fenda
a_0	Comprimento da pré-fenda
B	Largura do provete
C	Fator de comprimento do ensaio MMB
c	Flexibilidade
C_0	Flexibilidade inicial
C_{0corr}	Flexibilidade inicial corrigida
E	Módulo de Elasticidade
G	Módulo de Elasticidade Transversal
G_c	Taxa crítica de libertação de energia
G_I	Taxa de libertação de energia em modo I
G_{IC}	Taxa crítica de libertação de energia de deformação à tração
G_{II}	Taxa de libertação de energia em modo II
G_{IIC}	Taxa crítica de libertação de energia de deformação ao corte
k_{COH}	Matriz que relaciona as tensões e deformação em tração e corte nos elementos coesivos
L	Comprimento do provete
P	Força
$P_{máx}$	Força máxima
t_A	Espessura do adesivo
t_n	Tensão coesiva à tração

t_n^0	Resistência coesiva à tração
t_p	Espessura do substrato
t_s	Tensão coesiva ao corte
t_s^0	Resistência coesiva ao corte
γ_f	Deformação de rotura ao corte
δ	Deslocamento
$\delta_{\text{máx}}$	Deslocamento máximo
δ_n^0	Deslocamento de carga máxima à tração
δ_n^f	Deslocamento de rotura à tração
$\delta P_{\text{máx}}$	Deslocamento de força máxima
ε	Deformação
ε_f	Deformação de rotura à tração
ε_n	Deformação em tração
ε_s	Deformação em corte
ν	Coeficiente de Poisson
σ	Tensão
$\sigma_{0,2}$	Tensão de proporcionalidade a 0,2%
σ_r	Tensão limite de elasticidade
σ_y	Tensão de cedência
τ_f	Tensão de rotura ao corte
τ_y	Tensão de cedência ao corte

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Constituintes da junta adesiva [7]	9
Figura 2 - Exemplos de aplicação de adesivos em aviões [9]	11
Figura 3 - Exemplo de esforços de tração [6]	14
Figura 4 - Exemplo de esforços de compressão [6]	14
Figura 5 - Exemplo de esforços de corte [6]	15
Figura 6 - Exemplo de esforços de arrancamento [6]	15
Figura 7 - Exemplo de esforços de clivagem [6]	15
Figura 8 - Modos de rotura [6]	16
Figura 9 - Exemplos de configurações de junta [11]	17
Figura 10 - Dimensões do provete segundo a norma NF T 76-142 (dimensões em mm) [14]	19
Figura 11 - Dimensões dos provetes segundo a norma EN ISO 527-2: a) provete longo e b) provete curto [15]	19
Figura 12 - Típica curva tensão-deformação de um adesivo [5]	20
Figura 13 - Determinação do módulo de Young [18]	21
Figura 14 - Geometria da junta de sobreposição simples segundo a norma ASTM D1002 (dimensões em mm) [19]	21
Figura 15 - Geometria do provete Arcan (dimensões em mm)	22
Figura 16 - Geometria do provete e respetiva carga aplicada para o ensaio Iosipescu (dimensões em mm) [5]	23
Figura 17 - Geometria do ensaio TAST segundo a norma ISO 11003-2 (dimensões em mm) [22]	23
Figura 18 - Extensómetro utilizado no ensaio TAST, segundo a norma ISO 11003-2 [5]	24
Figura 19 - Modos de rotura em juntas adesivas [23]	24
Figura 20 – Representação esquemática do provete DCB [1]	25
Figura 21 - Representação esquemática do provete TDCB [13]	25
Figura 22 - Representação esquemática do provete ENF [13]	26
Figura 23 - Representação esquemática do provete 4ENF [13]	26
Figura 24 - Representação esquemática do provete ELS [13]	27
Figura 25 - Representação esquemática do provete ADCB [27]	27

Figura 26 - Representação esquemática do provete ATDCB [29].....	28
Figura 27 - a) Geometria do provete MMB e b) condições de carga [31]	28
Figura 28 - Exemplos de diferentes reforços de materiais à base de carbono [40]	29
Figura 29 - Resistência à tração com diferentes percentagens mássicas [32]	31
Figura 30 - Variação do módulo de elasticidade em função da fração de volume [50]	31
Figura 31 - Tendência da tenacidade à fratura em função da fração volúmica [32]	32
Figura 32 - Elementos coesivos para a) simulação de caminho de rotura com espessura zero: abordagem local e b) modelação de uma camada fina de adesivo: abordagem contínua [59]	33
Figura 33 - Lei triangular de modo puro e misto [1].....	34
Figura 34 - Adesivo SikaForce® 803	40
Figura 35 - Microfibra de vidro LANXESS MF 7980 [71]	41
Figura 36 - Folhas de carbono-epóxico cortadas	42
Figura 37 - Aquecimento das folhas carbono-epóxico.....	43
Figura 38 - Placa após compressão e empilhamento de 20 camadas	43
Figura 39 - Configuração da prensa de pratos quentes.....	44
Figura 40 - Limpeza manual dos substratos de acetona	45
Figura 41 - Calços frontais e traseiros	45
Figura 42 - Disposição dos calcos	45
Figura 43 - Espaçadores aplicados nos aderentes	46
Figura 44 - Pesagem dos componentes.....	46
Figura 45 - Fixação dos grampos	47
Figura 46 - Geometria do provete DCB [72]	47
Figura 47 - Geometria do provete ENF [72]	48
Figura 48 - Provete com a escala instalada	48
Figura 49 – Máquina universal Shimadzu AG-X 100.....	49
Figura 50 - Configuração do ensaio DCB	49
Figura 51 - Código do Arduino.....	50
Figura 52 - Esquema do intervalómetro	51
Figura 53 - Ligação do cabo Jack de 2,5 mm à entrada da ligação do comando	52
Figura 54 - Configuração do provete ENF na máquina Shimadzu AG-X 100	52
Figura 55 – Modo de correção do comprimento de fenda Δ [75]	53

Figura 56 - Esquematização da FPZ e fenda equivalente [74]	54
Figura 57 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios DCB com adesivo SikaForce® 803 e 0%, 0,15%, 0,35% e 0,55% de fibra de vidro	55
Figura 58 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios DCB com 0% de concentração de fibra de vidro...	56
Figura 59 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios DCB com 0,15% de concentração de fibra de vidro	57
Figura 60 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios DCB com 0,35% de concentração de fibra de vidro	57
Figura 61 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios DCB com 55% de concentração de fibra de vidro.	58
Figura 62 - Curva- R do provete DCB C0_3	58
Figura 63 - Curva- R do provete DCB C015_2	59
Figura 64 - Curva- R do provete DCB C035_2	59
Figura 65 - Curva- R do provete DCB C055_1	59
Figura 66 - Variação de G_{IC} através dos vários métodos em estudo	62
Figura 67 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios ENF com adesivo SikaForce® 803 e com 0%, 0,15%, 0,35% e 0,55% de fibra de vidro	64
Figura 68 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios ENF com 0% de concentração de fibra de vidro ...	64
Figura 69 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios ENF com 0,15% de concentração de fibra de vidro	65
Figura 70 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios ENF com 0,35% de concentração de fibra de vidro	65
Figura 71 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios ENF com 0,55% de concentração de fibra de vidro	65
Figura 72 - Inexistência de propagação da fenda do provete ENF C0_1	66
Figura 73 - Rotura total do provete ENF C0_1.....	66
Figura 74 – Propagação da fenda do provete ENF C035_1	66
Figura 75 - Curva- R do provete ENF C0_3	67
Figura 76 - Curva- R do provete ENF C015_2	67
Figura 77 - Curva- R do provete ENF C035_1	68
Figura 78 - Curva- R do provete ENF C055_3	68
Figura 79 – Variação de G_{IIIC} através dos vários métodos	71
Figura 80 - Malha do provete DCB	72
Figura 81 - Variação do refinamento da malha na zona da pré-fenda para o provete DCB.....	72

Figura 82 - Malha do provete ENF	73
Figura 83 - Refinamento da malha ENF quando em contacto com os cilindros: a) cilindro de suporte e b) cilindro de carregamento.....	73
Figura 84 - Curvas $P-\delta$ obtidas no estudo de convergência de malha para o ensaio DCB.....	76
Figura 85 - Curva $P_{máx}$ obtida no estudo de convergência de malha para o ensaio DCB.....	76
Figura 86 - Curva $\delta P_{máx}$ obtida no estudo de convergência de malha para o ensaio DCB	77
Figura 87 - Curva $\delta m_{máx}$ obtida no estudo de convergência de malha para o ensaio DCB.....	77
Figura 88 - Curvas $P-\delta$ obtidas no estudo de convergência de malha para o ensaio ENF	78
Figura 89 - Curva $P_{máx}$ obtida no estudo de convergência de malha para o ensaio ENF	79
Figura 90 - Curva $\delta P_{máx}$ obtida no estudo de convergência de malha para o ensaio ENF	79
Figura 91 - Curva $P-\delta$ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete DCB C0_1	81
Figura 92 - Curva $P-\delta$ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete DCB C0_2	82
Figura 93 - Curva $P-\delta$ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete DCB C0_3	82
Figura 94 - Lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803 com 0% de concentração de fibra de vidro, para o ensaio DCB	84
Figura 95 - Curva $P-\delta$ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete DCB C015_1	85
Figura 96 - Curva $P-\delta$ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete DCB C015_2	85
Figura 97 - Lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803 com 0,15% de concentração de fibra de vidro, para o ensaio DCB	87
Figura 98 - Curva $P-\delta$ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete DCB C035_1	88
Figura 99 - Curva $P-\delta$ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete DCB C035_2	88
Figura 100 - Lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803 com 0,35% de concentração de fibra de vidro, para o ensaio DCB	90
Figura 101 - Curva $P-\delta$ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete DCB C055_1	91
Figura 102 - Curva $P-\delta$ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete DCB C055_2	91

Figura 103 - Lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803 com 0,55% de concentração de fibra de vidro, para o ensaio DCB.....	93
Figura 104 - Curva $P-\delta$ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete ENF C0_1	94
Figura 105 - Lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803 com 0% de concentração de fibra de vidro, para o ensaio ENF	95
Figura 106 - Curva $P-\delta$ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete ENF C015_2	96
Figura 107 - Lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803 com 0,15% de concentração de fibra de vidro, para o ensaio ENF	97
Figura 108 - Curva $P-\delta$ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete ENF C035_1	98
Figura 109 - Lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803 com 0,35% de concentração de fibra de vidro, para o ensaio ENF	99
Figura 110 - Curva $P-\delta$ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete ENF C055_1	100
Figura 111 - Curva $P-\delta$ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete ENF C055_3	101
Figura 112 - Lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803 com 0,55% de concentração de fibra de vidro, para o ensaio ENF	102
Figura 113 - Variação de E nas curvas $P-\delta$ para os provetes DCB.....	104
Figura 114 - Variação de G_{IC} nas curvas $P-\delta$ para os provetes DCB	104
Figura 115 - Variação de t_n^0 nas curvas $P-\delta$ para os provetes DCB.....	105
Figura 116 - Variação de G nas curvas $P-\delta$ para os provetes ENF.....	106
Figura 117 - Variação de G_{IIC} nas curvas $P-\delta$ para os provetes ENF.....	107
Figura 118 - Variação de t_s^0 nas curvas $P-\delta$ para os provetes ENF	107

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens das ligações adesivas [8]	10
Tabela 2 - Propriedades de vários adesivos estruturais [6]	12
Tabela 3 - Estudos de aplicação a juntas adesivas	34
Tabela 4 - Estudos da determinação de parâmetros coesivos	35
Tabela 5 - Propriedades elásticas ortotrópicas do compósito reforçado com fibras de carbono, alinhado unidireccionalmente [68]	39
Tabela 6 - Propriedades do adesivo SikaForce® 803 [69]	40
Tabela 7 – Propriedades mecânicas à tração e ao corte do adesivo SikaForce® 803	41
Tabela 8 - Propriedades técnicas da fibra LANXESS MF 7980 [71]	42
Tabela 9 - Dimensões teóricas dos provetes DCB [73]	48
Tabela 10 – Dimensões teóricas dos provetes ENF [72]	48
Tabela 11 - Valores de G_{IC} com 0% de concentração de fibra de vidro	60
Tabela 12 - Valores de G_{IC} com 0,15% de concentração de fibra de vidro	61
Tabela 13 - Valores de G_{IC} com 0,35% de concentração de fibra de vidro	61
Tabela 14 - Valores de G_{IC} com 0,55% de concentração de fibra de vidro	61
Tabela 15 - Valores de G_{IIC} com 0% de concentração de fibra de vidro	69
Tabela 16 - Valores de G_{IIC} com 0,15% de concentração de fibra de vidro	69
Tabela 17 - Valores de G_{IIC} com 0,35% de concentração de fibra de vidro	70
Tabela 18 - Valores de G_{IIC} com 0,55% de concentração de fibra de vidro	70
Tabela 19 - Dados de entrada dos ensaios numéricos com 0% de concentração de fibra de vidro, para os provetes DCB do adesivo SikaForce® 803	81
Tabela 20 - Comparação dos parâmetros $P_{máx}$, $\delta P_{máx}$ e $\delta_{máx}$ em provetes DCB para 0% de fibra de vidro	83
Tabela 21 - Dados resultantes da lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803, com 0% de concentração de fibra de vidro para os ensaios DCB	83
Tabela 22 - Dados de entrada dos ensaios numéricos com 0,15% de concentração de fibra de vidro, para os provetes DCB do adesivo SikaForce® 803	84
Tabela 23 - Comparação dos parâmetros $P_{máx}$, $\delta P_{máx}$ e $\delta_{máx}$ em provetes DCB para 0,15% de fibra de vidro	86

Tabela 24 - Dados resultantes da lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803, com 0,15% de concentração de fibra de vidro para os ensaios DCB.....	86
Tabela 25 - Dados de entrada dos ensaios numéricos com 0,35% de concentração de fibra de vidro, para os provetes DCB do adesivo SikaForce® 803	87
Tabela 26 - Comparação dos parâmetros $P_{m\acute{a}x}$, $\delta P_{m\acute{a}x}$ e $\delta_{m\acute{a}x}$ em provetes DCB para 0,35% de fibra de vidro	89
Tabela 27 - Dados resultantes da lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803, com 0,35% de concentração de fibra de vidro para os ensaios DCB.....	89
Tabela 28 - Dados de entrada dos ensaios numéricos com 0,55% de concentração de fibra de vidro, para os provetes DCB do adesivo SikaForce® 803	90
Tabela 29 - Comparação dos parâmetros $P_{m\acute{a}x}$, $\delta P_{m\acute{a}x}$ e $\delta_{m\acute{a}x}$ em provetes DCB para 0,55% de fibra de vidro	92
Tabela 30 - Dados resultantes da lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803, com 0,55% de concentração de fibra de vidro para os ensaios DCB.....	92
Tabela 31 - Dados de entrada dos ensaios numéricos com 0% de concentração de fibra de vidro, para os provetes ENF do adesivo SikaForce® 803	93
Tabela 32 - Comparação dos parâmetros $P_{m\acute{a}x}$, $\delta P_{m\acute{a}x}$ e $\delta_{m\acute{a}x}$ em provetes ENF para 0% de fibra de vidro.	94
Tabela 33 - Dados resultantes da lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803, com 0% de concentração de fibra de vidro para os ensaios ENF	95
Tabela 34 – Dados de entrada dos ensaios numéricos com 0,15% de concentração de fibra de vidro, para os provetes DCB do adesivo SikaForce® 803	96
Tabela 35 - Comparação dos parâmetros $P_{m\acute{a}x}$, $\delta P_{m\acute{a}x}$ e $\delta_{m\acute{a}x}$ em provetes ENF para 0,15% de fibra de vidro	97
Tabela 36 - Dados resultantes da lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803, com 0,15% de concentração de fibra de vidro para os ensaios ENF	97
Tabela 37 - Dados de entrada dos ensaios numéricos com 0,35% de concentração de fibra de vidro, para os provetes DCB do adesivo SikaForce® 803	98
Tabela 38 - Comparação dos parâmetros $P_{m\acute{a}x}$, $\delta P_{m\acute{a}x}$ e $\delta_{m\acute{a}x}$ em provetes ENF para 0,35% de fibra de vidro	99
Tabela 39 - Dados resultantes da lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803, com 0,35% de concentração de fibra de vidro para os ensaios ENF	99
Tabela 40 - Dados de entrada dos ensaios numéricos com 0,55% de concentração de fibra de vidro, para os provetes DCB do adesivo SikaForce® 803	100
Tabela 41 - Comparação dos parâmetros $P_{m\acute{a}x}$, $\delta P_{m\acute{a}x}$ e $\delta_{m\acute{a}x}$ em provetes ENF para 0,55% de fibra de vidro	101

Tabela 42 - Dados resultantes da lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803, com 0,55% de concentração de fibra de vidro para os ensaios ENF	102
Tabela 43 – Variação dos parâmetros numéricos de entrada do adesivo SikaForce® 803 para ensaios DCB	103
Tabela 44 - Variação dos parâmetros numéricos de entrada do adesivo SikaForce® 803 para ensaios ENF	105

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos.....	4
1.3	Organização da dissertação.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Ligações adesivas.....	9
2.1.1	Caraterização das ligações adesivas	9
2.1.2	Aplicação das juntas adesivas	10
2.1.3	Adesivos estruturais	11
2.1.3.1	Epóxidos.....	12
2.1.3.2	Fenólicos	12
2.1.3.3	Acrílicos	13
2.1.3.4	Adesivos Poliimida	13
2.1.3.5	Adesivos de poliuretano	13
2.1.4	Esforços e modos de rotura	13
2.1.4.1	Esforços de rotura.....	13
2.1.4.1.1	Tração.....	14
2.1.4.1.2	Compressão.....	14
2.1.4.1.3	Corte.....	14
2.1.4.1.4	Arrancamento	15
2.1.4.1.5	Clivagem.....	15
2.1.4.2	Modos de rotura	16
2.1.5	Configurações possíveis de junta	16
2.1.5.1	Juntas topo a topo	17
2.1.5.2	Juntas de sobreposição.....	17

2.1.5.3	Juntas com tira (cobre-junta).....	17
2.1.5.4	Juntas tubulares.....	17
2.1.5.5	Juntas em T.....	18
2.1.5.6	Juntas em canto.....	18
2.2	Determinação das propriedades de adesivos	18
2.2.1	Determinação das propriedades mecânicas à tração	18
2.2.1.1	Ensaio de provete de adesivo em bruto	18
2.2.1.2	Procedimentos do ensaio	19
2.2.2	Determinação das propriedades mecânicas ao corte	21
2.2.2.1	Ensaio Juntas de sobreposição simples (JSS)	21
2.2.2.2	Ensaio de borboleta ou Notched Plate Shear Method (Arcan).....	22
2.2.2.3	Ensaio Iosipescu ou V-Notched Beam Shear Method.....	22
2.2.2.4	Ensaio Thick Adherend Shear Test (TAST)	23
2.2.3	Determinação das propriedades de fratura	24
2.2.3.1	Determinação das propriedades de fratura à tração (Modo I).....	24
2.2.3.1.1	Ensaio <i>Double-Cantilever Beam</i> (DCB)	24
2.2.3.1.2	Ensaio <i>Tapered Double-Cantilever Beam</i> (TDCB)	25
2.2.3.2	Determinação das propriedades de fratura ao corte (Modo II)	25
2.2.3.2.1	Ensaio <i>End-Notched Flexure</i> (ENF)	25
2.2.3.2.2	Ensaio <i>Four-Point End-Notched Flexure</i> (4ENF)	26
2.2.3.2.3	Ensaio <i>End-Loaded Split</i> (ELS)	26
2.2.3.3	Determinação das propriedades de fratura à tração e ao corte (Modo I+II).....	27
2.2.3.3.1	Ensaio <i>Asymmetric Double-Cantilever Beam</i> (ADCB).....	27
2.2.3.3.2	Ensaio <i>Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam</i> (ATDCB).....	28
2.2.3.3.3	Ensaio <i>Mixed-Mode Bending</i> (MMB)	28
2.3	Modificação de adesivos	29
2.3.1	Diferentes escalas de reforços	29
2.3.1.1	Reforços de escala nanométrica	29
2.3.1.2	Reforços de escala microscópica	30
2.3.1.3	Reforços de escala macroscópica	30

2.3.2	Efeito da modificação de adesivos sobre a resistência	30
2.3.3	Efeito da modificação de adesivos sobre a rigidez	31
2.3.4	Efeito da modificação de adesivos sobre a tenacidade à fratura	32
2.3.5	Efeito da modificação de adesivos expostos a água e humidade	32
2.4	Modelação numérica de juntas adesivas por modelos de dano coesivo	32
2.4.1	Fundamentos dos modelos de dano coesivo	32
2.4.2	Modelo de dano triangular	33
2.4.3	Estado da arte	34
3	DESENVOLVIMENTO	39
3.1	Trabalho experimental	39
3.1.1	Materiais	39
3.1.1.1	Aderentes.....	39
3.1.1.2	Adesivo	40
3.1.1.3	Microfibras de vidro.....	41
3.1.2	Fabrico e ensaio dos provetes de fratura	42
3.1.2.1	Fabrico das placas	42
3.1.2.2	Fabrico dos provetes.....	44
3.1.2.3	Ensaio dos provetes de fratura	47
3.1.3	Resultados	53
3.1.3.1	Ensaio DCB.....	53
3.1.3.1.1	Determinação de G_{IC}	53
3.1.3.1.2	Curvas $P-\delta$	55
3.1.3.1.3	Resultados obtidos.....	58
3.1.3.1.4	Análise de resultados	60
3.1.3.2	Ensaio ENF.....	62
3.1.3.2.1	Determinação de G_{IIC}	62
3.1.3.2.2	Curvas $P-\delta$	63
3.1.3.2.3	Resultados obtidos.....	67
3.1.3.2.4	Análise de resultados	68
3.2	Trabalho numérico	71

3.2.1	Pré-processamento dos modelos	71
3.2.2	Modelo de dano coesivo triangular.....	74
3.2.3	Estudo do tamanho de malha	75
3.2.3.1	Ensaio DCB	75
3.2.3.1.1	Resultados do parâmetro $P_{\text{máx}}$	76
3.2.3.1.2	Resultados do parâmetro $\delta P_{\text{máx}}$	76
3.2.3.1.3	Resultados do parâmetro $\delta_{\text{máx}}$	77
3.2.3.1.4	Conclusão dos resultados obtidos	77
3.2.3.2	Ensaio ENF	78
3.2.3.2.1	Resultados do parâmetro $P_{\text{máx}}$	79
3.2.3.2.2	Resultados do parâmetro $\delta P_{\text{máx}}$	79
3.2.3.2.3	Conclusão dos resultados obtidos	80
3.2.4	Validação das leis coesivas obtidas	80
3.2.4.1	Ensaio DCB	80
3.2.4.2	Ensaio ENF	93
3.2.5	Análise de sensibilidade às leis coesivas obtidas	103
3.2.5.1	Ensaio DCB	103
3.2.5.2	Ensaio ENF	105
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	111
4.1	CONCLUSÕES	111
4.2	PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS	113
5	REFERÊNCIAS.....	117

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

1.2 Objetivos

1.3 Organização da dissertação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Na conjuntura atual, existem vários métodos e tecnologias que foram sendo aprimoradas, tendo em conta que as juntas de adesivos estruturais têm cada vez maior preponderância quando é necessária a junção de diferentes materiais e contemplam várias vantagens relativamente aos métodos de união alternativos. Vantagens tais como serem capazes de concentrar um menor esforço de tensões, melhor comportamento sob cargas cíclicas e, não menos importante, permitem a união de diferentes materiais [1]. Contudo, também apresentam algumas desvantagens, como a dificuldade na desmontagem, o facto de a ligação não ser imediatamente realizada, o que implica o uso de ferramentas de fixação temporária, podendo encarecer o projeto, além de que a sua resistência ao arrancamento e clivagem são algo fracas. Por último, o grande problema da utilização cada vez mais comum dos adesivos estruturais prende-se com o facto de não existir um critério de dimensionamento universal, o que dificulta o projeto de qualquer estrutura [2].

Uma forma de colmatar certas desvantagens e, ao mesmo tempo, melhorar as propriedades dos adesivos é através do seu reforço. Foram realizados vários estudos sobre a influência dos filetes dos adesivos na distribuição das tensões de corte e arrancamento. Foi demonstrado que, ao incorporar filetes nas extremidades da junta de sobreposição, os valores máximos das tensões de arrancamento e corte eram reduzidas [3]. Também a rugosidade superficial do aderente pode afetar diretamente as ligações químicas entre este e as camadas adesivas. Ao aumentar a rugosidade, a área de contacto também aumenta, e por conseguinte, a junta adesiva seja mais resistente e durável [4].

Uma grande parte dos métodos de dimensionamento são sustentados através da modelação por Elementos Finitos, sendo uma ferramenta útil quando sustentada por critérios algo complexos [1]. Os MDC perfilam-se como uma técnica importante, sendo capaz de antecipar o desempenho das ligações e resistência de juntas com alta precisão, poupando assim recursos e tempo na análise das propriedades dos adesivos e a escolha mais adequada dos mesmos.

De forma a promover as propriedades mecânicas dos adesivos e reduzir as suas limitações, é comum reforçar as juntas adesivas através de partículas de certos materiais, sendo que neste caso são adicionadas fibras de vidro, o que pode aumentar a tenacidade do adesivo.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo o estudo numérico do efeito da adição de microfibras num adesivo estrutural, recorrendo aos gráficos força-deslocamento (P - δ) para os ensaios DCB e ENF. O primeiro ensaio é necessário para fazer a caracterização à tração e o seguinte a caracterização ao corte.

É feito um estudo para validar o modelo selecionado que, neste caso, corresponde ao modelo de dano coesivo triangular, com o objetivo da reprodução das leis coesivas obtidas experimentalmente através dos ensaios DCB e ENF. Para efeitos de simulação, o software utilizado consiste no Abaqus®. Posteriormente, faz-se o estudo do tamanho da malha dos dois ensaios em que se avalia a influência da dimensão da malha em parâmetros tais como a força máxima ($P_{\text{máx}}$), o deslocamento máximo ($\delta_{\text{máx}}$) e o deslocamento da força máxima ($\delta P_{\text{máx}}$). A comparação numérica e experimental das curvas P - δ tem como objetivo validar a lei coesiva selecionada para este estudo, através da modelação da camada do adesivo, tanto em tração como ao corte. Por último, é realizado um estudo que visa compreender a influência que, parâmetros coesivos tais como, a taxa crítica de libertação de energia de deformação à tração (G_{IC}), taxa crítica de libertação de energia de deformação ao corte (G_{IIC}), resistência coesiva à tração (t_n^0) e resistência coesiva ao corte (t_s^0) possam ter na previsão do comportamento das juntas adesivas através dos MDC.

1.3 Organização da dissertação

Para o trabalho poder ser alvo de melhor interpretação e análise, este foi dividido em quatro capítulos, que se apresentam a seguir:

O 1º capítulo corresponde ao tema abordado, com a definição dos objetivos propostos, além de ser feita a descrição da organização do trabalho.

O 2º capítulo baseia-se na revisão bibliográfica do presente tema, sendo dividido em vários subcapítulos, para melhor organização e clarificação do conteúdo. É feita a descrição das ligações adesivas, mais especificamente a sua caracterização e aplicações, além dos esforços/modos de rotura e configurações possíveis de junta. Posteriormente, é dado a conhecer os métodos existente para a obtenção das propriedades de adesivos. Posteriormente é explicado as diferentes escalas de reforços existentes, como a nano, micro e macro. Além disso, são descritos os possíveis efeitos de modificação que os adesivos estão sujeitos ao serem reforçados, pois existem vantagens e desvantagens nesta prática. De seguida, e porque será feita uma modelação numérica por MDC, presta-se a conhecer os fundamentos do mesmo, cuja simulação será feita através do modelo de dano triangular.

No 3º capítulo é referido todo o trabalho experimental levado a cabo e que envolve os materiais utilizados e como se procedeu ao fabrico dos provetes, além da definição da

geometria dos ensaios DCB e ENF, sendo também feita a descrição de como estes ensaios foram realizados. Procede-se à determinação do valor de G_{IC} e G_{IIC} e, posteriormente, compara-se os resultados obtidos. Com o propósito de determinar a lei coesiva mais adequada aos ensaios realizados, é realizada a modelação dos ensaios em estudo no Abaqus®, sendo depois analisada a variação do tamanho da malha. Este estudo é baseado na apreciação dos resultados obtidos para os parâmetros $P_{máx}$, $\delta_{máx}$ e $\delta P_{máx}$, em função dos ensaios realizados e das concentrações de microfibras de vidro. Para finalizar, analisa-se a sensibilidade dos parâmetros que integram a lei coesiva selecionada para este estudo.

No 4º capítulo é apresentada a conclusão, onde estão expostas as ilações retiradas do estudo desenvolvido, além da proposição de trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

2.2 Determinação das propriedades de adesivos

2.3 Modificação de adesivos

2.4 Modelação numérica de juntas adesivas por modelos de dano coesivo

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

As ligações adesivas são um método de união cuja aplicação pode ser datada de há cerca de centenas de anos. Contudo, a sua real evolução deu-se por volta do início do século XX, altura em começou o desenvolvimento dos adesivos polímeros sintéticos [5]. Nessa altura, a aeronáutica usava adesivos feitos à base de caseína, cujo material era um polimérico natural derivado do leite. Estes adesivos cumpriam bem a sua função, salvo quando fossem utilizados em ambientes húmidos, altura em que emanavam odores desagradáveis e tornavam-se muito fracos, devido à absorção da água. Por outro lado, permitia aferir quando o adesivo estava deteriorado, servindo quase como um ensaio não destrutivo da qualidade da ligação [2].

Os adesivos usados em aplicações tecnologicamente avançadas são baseados em polímeros sintéticos. De facto, estes possuem propriedades que lhes permitem fácil adesão à maior parte dos materiais, e têm resistência suficiente para serem capazes de sustentar cargas consideráveis.

O adesivo pode ser entendido como um material capaz de ligar as superfícies de materiais, através de forças de adesão e coesão interna, promovendo a sua união sem modificar drasticamente as suas estruturas [5].

2.1.1 Caracterização das ligações adesivas

Em teoria, as tensões e as cargas são distribuídas pela área total da ligação, ao invés de concentrá-las em alguns pontos. Assim, a montagem com recurso aos adesivos tem uma maior resistência à flexão do que, por exemplo, no caso da montagem com rebites [6].

As juntas adesivas são constituídas pelos aderentes, primários (quando presentes), o adesivo e as regiões de interfase, como se pode observar na Figura 1.

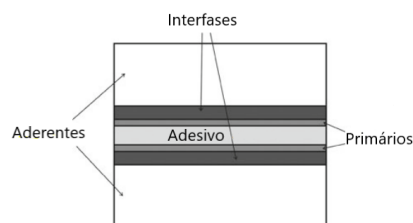


Figura 1 - Constituintes da junta adesiva [7]

O substrato corresponde ao material a ser ligado, sendo frequentemente chamado por aderente após ligação. A interfase corresponde às zonas entre o adesivo e os aderentes e tem um elevado peso na determinação das propriedades das ligações adesivas.

A interface (*boundary layer*), que também pode ser designada por camada limite, corresponde ao plano de contacto entre as superfícies do adesivo e aderente. É útil para definir e medir a energia de superfície.

O primário é uma substância que é normalmente aplicada no substrato, de modo a proteger as superfícies em causa, além de promover a adesão [2].

Os adesivos apresentam várias vantagens em relação aos métodos como a aparafusagem e soldadura. Porém, também têm as suas desvantagens, como está demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens das ligações adesivas [8]

Vantagens	Desvantagens
Boa relação resistência - peso	Possibilidade de serem necessárias ferramentas de fixação
Juntas bem vedadas	Inspeção difícil da junta
Minimiza/previne a corrosão galvânica entre diferentes materiais	Superfícies devem ser preparadas e limpas cuidadosamente
Excelente resistência à fadiga	Vida útil depende do ambiente envolvente
Diminui vibrações e absorve choques	Possibilidade de longos tempos de cura
Se necessário aplicar calor, será demasiado baixo para afetar peças metálicas	Resistência limitada em condições extremas, nomeadamente o calor e humidade

2.1.2 Aplicação das juntas adesivas

As juntas adesivas apresentam um leque de utilização bastante abrangente, que incorpora a indústria aeronáutica (Figura 2), espacial, automóvel, naval, entre outros. Como os adesivos têm uma excelente resistência à fadiga, são bastante usados no fabrico das pás dos helicópteros. A pá é constituída por vários materiais cuja ligação é feita através de adesivos [2].

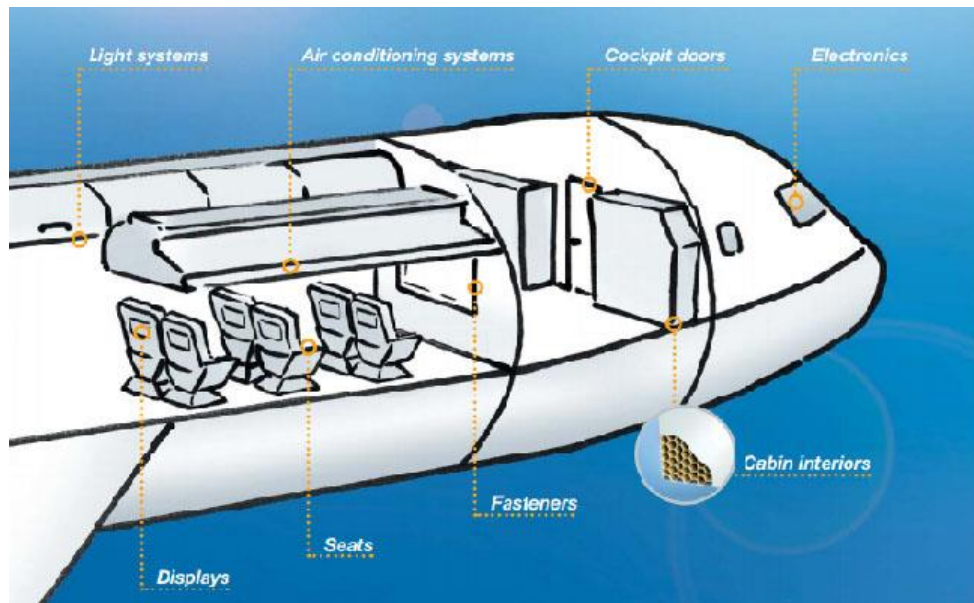


Figura 2 - Exemplos de aplicação de adesivos em aviões [9]

A principal responsável pelo avanço tecnológico das ligações adesivas foi a indústria aeronáutica, o que fez com que a sua tecnologia se expandisse para outros ramos, como a indústria automóvel.

De facto, existe uma grande preocupação, por diversas razões, em minimizar o peso do automóvel, usando materiais como plásticos reforçados com fibras e alumínio. Porém, é difícil de ligar estes materiais pelos métodos mais convencionais. Assim, a solução passa por fazer a ligação através dos adesivos.

Também a indústria naval usa cada vez mais plásticos e compósitos, por serem leves, fáceis de processar e resistentes à corrosão, e o melhor método de ligação desses materiais é através de adesivos. Outros exemplos podem ser dados, tais como a utilização na construção civil (postes, painéis, caixilharia e pontes) [2].

2.1.3 Adesivos estruturais

A classificação dos adesivos segundo o desempenho compreende a criação de dois grupos: estruturais e não estruturais. Um adesivo estrutural pode-se definir como sendo um material cuja finalidade é unir-se a outros materiais de elevada resistência, com uma resistência ao corte mínima de 6,9 MPa. O adesivo estrutural pode ser definido como um material que não sofre fluência quando solicitado a cargas significativas [6].

Os adesivos estruturais podem ser utilizados tanto para aplicação doméstica como aplicação industrial. A Tabela 2 apresenta as propriedades de alguns adesivos estruturais.

Tabela 2 - Propriedades de vários adesivos estruturais [6]

Tipo	Resistência ao choque	Resistência ao corte [MPa]	Fluência	Resistência ao arrancamento	Solventes
Fenólico-vinílico	Boa	17-35	Boa	Média	Medíocre
Anaeróbicos	Boa	10-40	Média	Boa	Média
Cianoacrilatos	Má	10-35	Má	Medíocre	Má
Poliuretano	Boa	8-15	Boa	Média	Boa
Poliimida	Medíocre	10-15	Má	Boa	Boa
Epóxido	Má	15-45	Medíocre	Boa	Boa
Epóxido-Fenólico	Má	20	Medíocre	Boa	Boa

Existem diversas categorias de adesivos estruturais consoante a sua composição química e, de seguida, é feita uma comparação mais detalhada.

2.1.3.1 Epóxidos

Os epóxidos são adesivos muito versáteis quanto à sua formulação, pois existem diversos endurecedores e resinas. São comercializados num grande leque de formas, que podem ser desde líquidos de baixa viscosidade até filmes ou pastas sólidas.

São conhecidos pela sua boa resistência química e mecânica. Além disso, não emitem substâncias voláteis durante a cura e, no caso de as juntas serem bem projetadas, criam ligações muito fortes e duráveis com a vasta maioria dos materiais [6].

2.1.3.2 Fenólicos

Os adesivos fenólicos foram os primeiros a serem aplicados em metais. O seu processo de cura e composição química são idênticos aos adesivos de resorcinol. Ocorre libertação de água durante o processo de cura, onde a sua temperatura deve ser elevada.

Geralmente, são adesivos com boa resistência a elevadas temperaturas e mecanicamente resistentes. Contudo, são bastante frágeis e facilmente corroídos por solventes [6].

2.1.3.3 Acrílicos

Os adesivos acrílicos são constituídos por adesivos anaeróbicos, cianoacrilatos e acrílicos modificados.

a) Cianoacrilatos

São adesivos instantâneos, na medida em que colam as superfícies muito rapidamente, sendo mais conhecidos como supercola e têm ótima resistência à tração, embora sejam de elevado custo e frágeis. Além disso, são bastante úteis para colar borrachas e pequenas peças de plástico.

b) Anaeróbicos

Por norma, são líquidos com um componente apenas que podem ser curados à temperatura ambiente. A sua resistência é bastante imprevisível e a temperatura máxima de serviço é alta, situando-se perto dos 150°C. São maioritariamente usados para colar materiais como PVC, *nylon* e as poliolefinas, por exemplo.

c) Acrílicos modificados

Os adesivos acrílicos apresentam uma boa resistência ao arrancamento e ao impacto, além de serem bastante resistentes à humidade. Porém, são pouco resistentes a elevadas temperaturas e são muito inflamáveis. Durante o processo de cura, permitem ligações fortes e não exigem uma rigorosa preparação superficial, podendo ser usados para unir imensos materiais [6].

2.1.3.4 Adesivos Poliimida

Estes adesivos são os mais estáveis a elevadas temperaturas. A sua utilização é um pouco complexa, pois exigem elevados tempos de cura, temperaturas altas e com ciclos de pressão. São adesivos caros e comercializados sob a forma de líquidos e filmes [6].

2.1.3.5 Adesivos de poliuretano

São adesivos que primam pela sua flexibilidade, resistentes ao arrancamento, boa tenacidade e bom desempenho a baixas temperaturas [6]. O processo de cura dos adesivos de poliuretano é feito lentamente à temperatura ambiente, mas podem ser feitos com variados tempos de cura.

2.1.4 Esforços e modos de rotura

2.1.4.1 Esforços de rotura

As juntas adesivas estão sujeitas a vários esforços e isso torna a distribuição de tensões imprevisível. As solicitações produzem inesperadas concentrações de tensões e que podem determinar qual a resistência máxima da junta.

É, por isso, imprescindível conhecer os vários modos de esforços, tais como [2]:

- Tração;
- Compressão;
- Corte;
- Arrancamento;
- Clivagem.

2.1.4.1.1 Tração

Quando a solicitação atua perpendicularmente ao plano da junta, como é possível observar na Figura 3, existe um desenvolvimento de tensões de tração, que são distribuídas uniformemente por todo o comprimento da superfície a colar. Uma conceção adequada requer que a junta tenha cargas rigorosamente axiais e as superfícies do substrato sejam paralelas [8].



Figura 3 - Exemplo de esforços de tração [6]

2.1.4.1.2 Compressão

Os esforços de compressão decorrem de forças que comprimem um aderente contra o outro, como demonstrado na Figura 4. É necessário manter as cargas alinhadas para que exista apenas compressão pura. A rotura do adesivo devido a compressão é pouco provável de acontecer, embora possa romper em pontos mais fracos, caso a distribuição de tensões não seja idêntica em todo o comprimento [8].

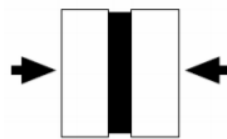


Figura 4 - Exemplo de esforços de compressão [6]

2.1.4.1.3 Corte

As tensões de corte acontecem quando forças atuantes no plano do adesivo tentam separar os aderentes [8]. A Figura 5 exemplifica o esforço de corte.



Figura 5 - Exemplo de esforços de corte [6]

As juntas adesivas têm, habitualmente, maior resistência quando sujeitas a tensões de corte, pois toda a extensão da área colada contribui para o aumento da resistência da junta, além dos substratos serem relativamente fáceis de ficarem alinhados [8].

2.1.4.1.4 Arrancamento

O arrancamento pode ser definido como quando atua uma força num dos extremos da junta que tenta separar o aderente, como demonstrado na Figura 6, cujo substrato(s) são de natureza mais flexível [8].

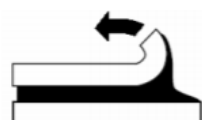


Figura 6 - Exemplo de esforços de arrancamento [6]

2.1.4.1.5 Clivagem

Os esforços de clivagem são causados por forças de tração na extremidade de uma junta, como observado na Figura 7. Existe assim, elevada concentração de tensões nesse mesmo extremo [8].



Figura 7 - Exemplo de esforços de clivagem [6]

Tanto a clivagem como o arrancamento devem ser evitados a todo o custo, pois são os esforços mais prejudiciais para as juntas adesivas, onde a tensão se concentra numa área reduzida.

A rigidez e a ductilidade do adesivo estão diretamente relacionadas com a propensão de a junta sofrer arrancamento/clivagem, já que o dano no adesivo tem início nos extremos da ligação. A diferença entre os esforços é que, embora as tensões sejam semelhantes, só ocorre arrancamento quando o(s) substrato(s) são flexíveis. Isto leva a que o ângulo de separação seja muito maior para o arrancamento [6]. Preferem-se assim as configurações onde predominem os esforços de corte [8].

2.1.4.2 Modos de rotura

A finalidade de uma ligação eficiente está relacionada com a transferência de carga entre os componentes unidos, preservando assim a sua integridade estrutural sob solicitações dinâmicas/estáticas e possíveis situações ambientais adversas. Como tal, é de enorme importância avaliar corretamente a distribuição de tensões e, por consequência, alguns modos de rotura, cuja classificação segue parte da norma ASTM D 5573-99 [10], podem ser observados na Figura 8, [6]:

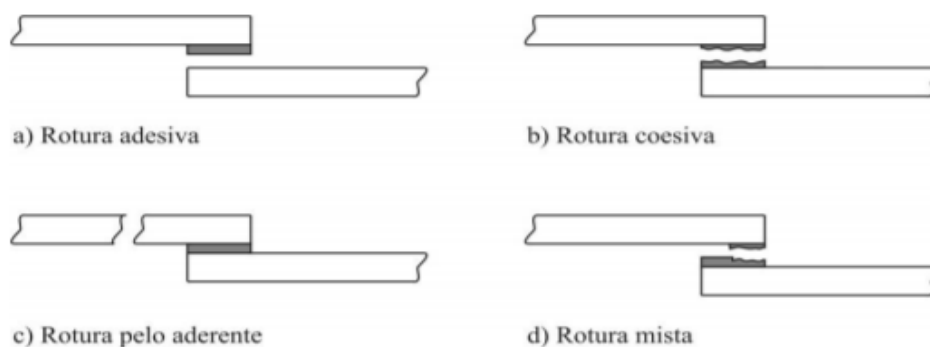


Figura 8 - Modos de rotura [6]

- A rotura adesiva pode ser caracterizada como uma rotura que ocorre na interface entre o adesivo e aderente. Após romper, a camada de superfície de um dos aderentes não contém resíduos de adesivo, pois este foi completamente removido. Sendo assim, a falha ocorre na adesão entre a superfície do aderente e o adesivo;
- No caso em que a ligação entre o substrato e o adesivo seja mais forte relativamente à resistência interna do adesivo, dá-se a rotura coesiva. Contrariamente à rotura adesiva, ambas as superfícies são cobertas de adesivo;
- A rotura mista baseia-se na combinação de roturas coesiva com adesiva. Uma das justificações para que este modo de rotura aconteça tem a ver com o facto de a área das superfícies a ligar não ter sido alvo de uma limpeza eficaz ou conter defeitos;
- A rotura do aderente é o modo de rotura preferencial, uma vez que demonstra que a junta foi bem projetada e concebida [6].

2.1.5 Configurações possíveis de junta

Existem várias configurações de juntas adesivas, em que as mais comuns estão representadas na Figura 9.

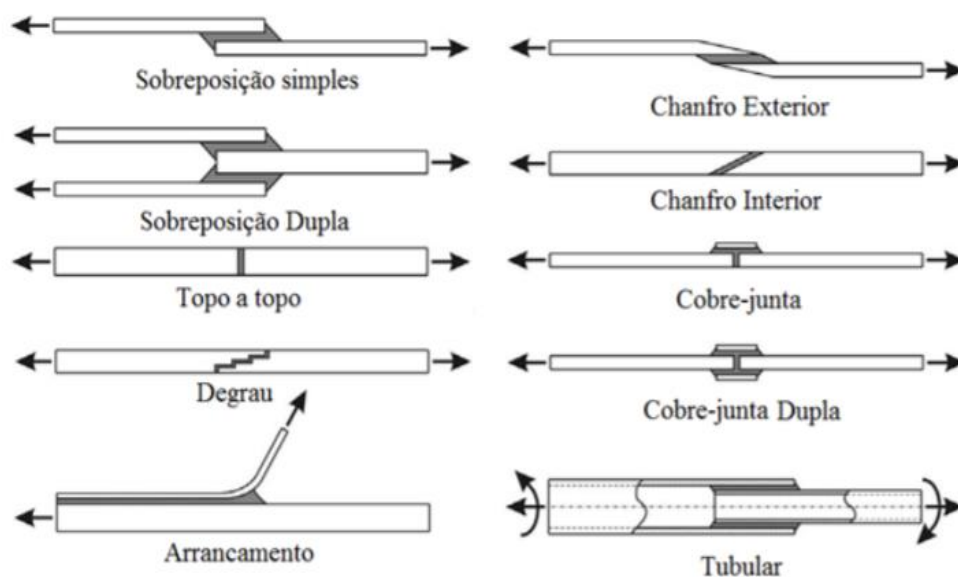


Figura 9 - Exemplos de configurações de junta [11]

2.1.5.1 Juntas topo a topo

As juntas de topo a topo concentram elevadas tensões de arrancamento e de corte nas extremidades da junta. Além disso, têm baixa resistência a esforços de flexão, dado que o adesivo está sujeito a esforços de clivagem. A sua vantagem consiste no facto de estas juntas serem fáceis de fabricar [8].

2.1.5.2 Juntas de sobreposição

A união adesiva mais simples e comum de todas é a junta de sobreposição simples (JSS), na qual a transferência de carga entre os aderentes é realizada através de uma distribuição de tensões de corte no adesivo.

A junta de sobreposição dupla remove grande parte dos momentos de flexão que estão presentes na JSS, não estando, no entanto, completamente livre. Apesar de o substrato médio não estar sujeito a esses esforços, os substratos inferior e superior estão sujeitos a alguma flexão [12].

2.1.5.3 Juntas com tira (cobre-junta)

As juntas com uma tira são semelhantes às juntas de sobreposição simples, pois estão sujeitas a esforços de arrancamento. As juntas de duas tiras são mais equilibradas uma vez que permitem uma redução do momento de flexão [2].

2.1.5.4 Juntas tubulares

Quando se pretende fazer a colagem de varões ou tubos é comum utilizar-se juntas tubulares ou cilíndricas. É recomendável o uso de espaçadores em juntas tubulares,

assegurando desta forma o alinhamento dos tubos, além de uma espessura igual a todo o comprimento [2].

2.1.5.5 Juntas em T

As juntas em T são normalmente caracterizadas pela sua orientação perpendicular entre os dois elementos, mas também é possível terem um ângulo diferente entre si, para além dos 90°. O objetivo principal destas juntas é o de evitar as forças de arrancamento e maximizar as solicitações de corte no adesivo. Os aderentes são caracterizados por terem uma orientação perpendicular entre si [2].

2.1.5.6 Juntas em canto

As juntas em canto são em tudo semelhantes às juntas em T, pois são divididas em juntas com substratos alinhados a 90° e juntas com substratos alinhados a um ângulo diferente de 90° [2].

2.2 Determinação das propriedades de adesivos

Desde que os adesivos foram utilizados como método de união de materiais, existiu a necessidade de submetê-los a variados testes, com o propósito de caracterizá-los. Por isso, é essencial a determinação de várias propriedades, existindo vários modos de solicitação para as obter, tais como: modo I (tração-compressão), modo II (corte) e modo misto, cujos ensaios utilizados para cada modo são variados, na maioria dos casos. A distribuição de tensões, além do correto critério de rotura, são essenciais para a previsão de resistência de juntas [6].

2.2.1 Determinação das propriedades mecânicas à tração

É possível retirar várias propriedades e informações a partir dos resultados dos ensaios à tração. No caso de se pretender analisar um adesivo, é muito comum recorrer a este ensaio, uma vez que a curva tensão-deformação permite determinar o módulo de elasticidade, tensão máxima e deformação de rotura.

2.2.1.1 Ensaio de provete de adesivo em bruto

As propriedades à tração, compressão e ao corte podem ser determinadas através do ensaio de provete de adesivo em bruto [13]. Este pode ser fabricado de acordo com a norma NF T 76-142 [14], que funciona particularmente bem na produção de provetes sem porosidades [5]. A exemplificação das dimensões do provete encontra-se na Figura 10.

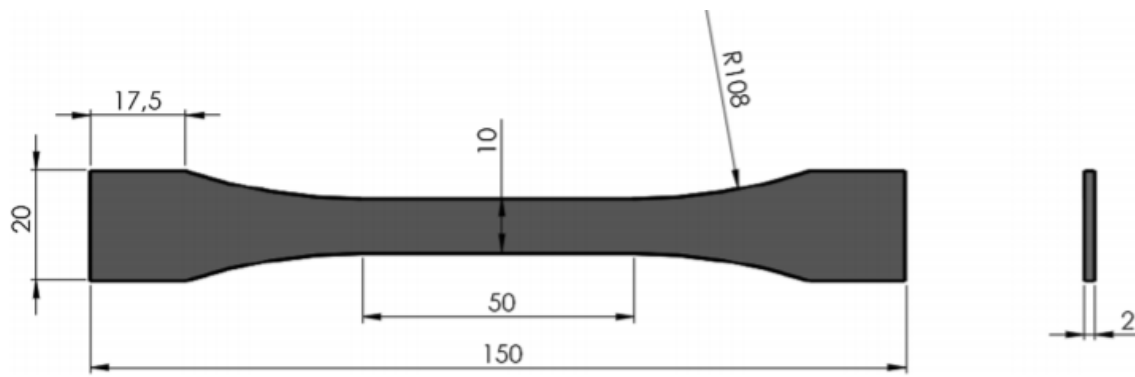


Figura 10 - Dimensões do provete segundo a norma NF T 76-142 (dimensões em mm) [14]

Os provetes também podem ser dimensionados segundo a norma EN ISO 527-2 [15], cuja forma também é em “osso de cão”, como é possível observar na Figura 11.

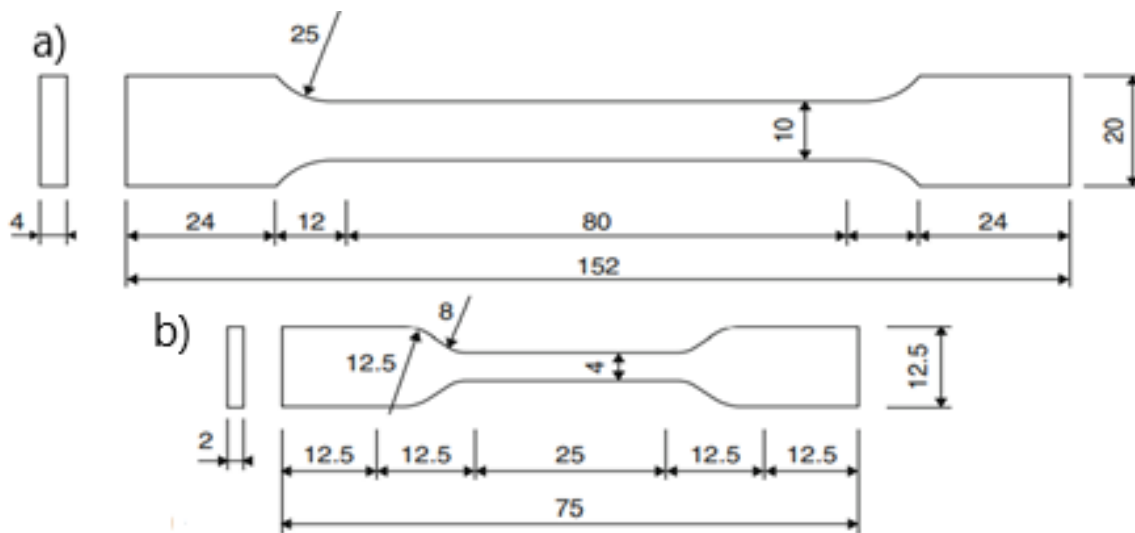


Figura 11 - Dimensões dos provetes segundo a norma EN ISO 527-2: a) provete longo e b) provete curto [15]

A presença de bolhas de ar é um dos fatores que influencia a qualidade dos provetes, pois as bolhas podem dar origem a zonas de concentração de tensões que, por sua vez, rompem prematuramente ou originar vazios nas cavidades de cura do adesivo, através do aprisionamento do ar [16].

2.2.1.2 Procedimentos do ensaio

O ensaio consiste em solicitar o provete na direção longitudinal até à rotura. Para determinar o E (módulo de Young), é comum usar uma velocidade na ordem de 1 mm/min, contudo esta poderá ser ligeiramente mais elevada. As condições ambientais, tais como a temperatura e humidade deverão ser monitorizadas. Pequenas variações das condições típicas do ambiente laboratorial (25°C e 50% de

humidade relativa) podem provocar uma variação significativa na obtenção das propriedades mecânicas.

Neste ensaio são registados parâmetros como a carga aplicada e deslocamento, que servem para assim obter a curva tensão-deformação.

Esta curva, exemplificada na Figura 12, permite determinar a tensão de rotura à tração, tensão de limite de elasticidade à tração e o módulo de Young [5].

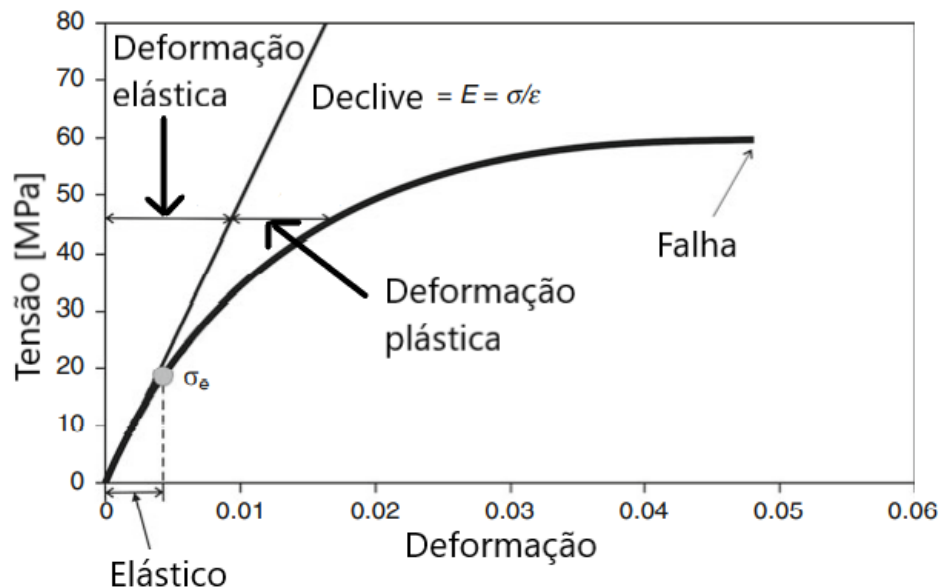


Figura 12 - Típica curva tensão-deformação de um adesivo [5]

De forma a obter a curva tensão-deformação com maior rigor, recomenda-se o uso de extensómetros óticos, assegurando assim a ausência de qualquer tensão indesejada no provete [17]. A norma EN ISO 527-2 [15] recomenda que o E seja determinado com um intervalo de deformação entre 0,05% e 0,025%, cujos valores são, geralmente, representativos da zona elástica dos adesivos estruturais. O coeficiente de Poisson (ν) pode ser calculado desde que o deslocamento seja medido transversal e longitudinalmente. A tensão de cedência é facilmente determinada, pois é comum existir uma clara transição entre o comportamento elástico e plástico do adesivo [5].

A Figura 13 demonstra como é possível determinar o módulo de Young recorrendo aos seguintes métodos [13]:

- Interseção das tangentes (σ_y);
- Tensão de proporcionalidade a 0,2% ($\sigma_{0,2}$);
- Tensão limite de elasticidade igual à tensão de rotura ($\sigma_r = \sigma_y$).

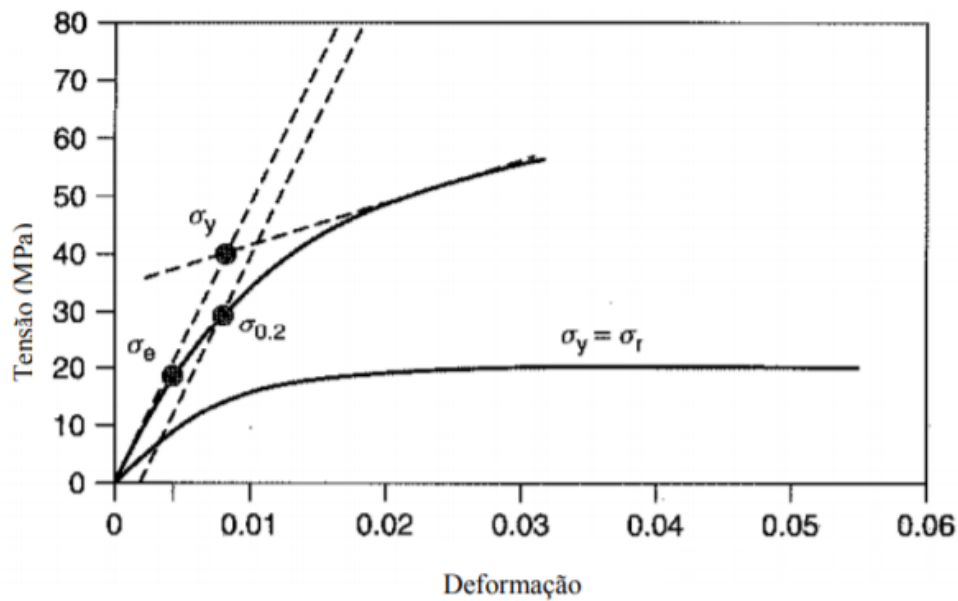


Figura 13 - Determinação do módulo de Young [18]

2.2.2 Determinação das propriedades mecânicas ao corte

Assim como nos ensaios de tração, também é possível traçar a curva tensão-deformação através dos ensaios de corte, permitindo assim analisar o comportamento do adesivo e determinar propriedades como o módulo de Young e deformação de corte. A determinação das propriedades ao corte deve ser feita recorrendo a métodos de ensaio, que solicitem os provetes a solicitações de corte puro [6].

2.2.2.1 Ensaio Juntas de sobreposição simples (JSS)

Existem vários ensaios para caracterizar as propriedades mecânicas de juntas adesivas, tal como o ensaio JSS, cuja geometria segue a recomendação da norma ASTM D1002 [19]. Estas juntas são usadas pela sua simplicidade de construção e aplicação abrangente. Contudo, pode ser difícil garantir o correto alinhamento dos provetes.

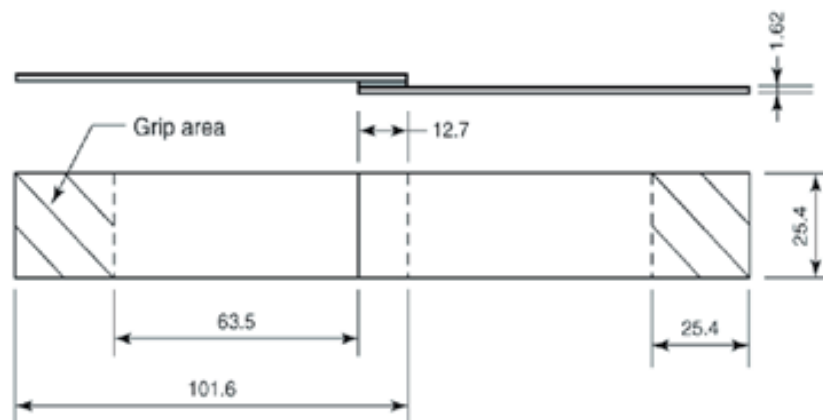


Figura 14 - Geometria da junta de sobreposição simples segundo a norma ASTM D1002 (dimensões em mm) [19]

Os provetes consistem em duas tiras metálicas, que são unidas ao longo de uma sobreposição de 12,7 mm, como mostra na Figura 14. Estes são solicitados e o valor máximo da carga aplicada é dividido pela extensão de área unida, resultado na tensão de corte média [13].

2.2.2.2 Ensaio de borboleta ou Notched Plate Shear Method (Arcan)

O ensaio borboleta é bastante versátil e é utilizado principalmente para conhecer as propriedades de plásticos, compósitos e adesivos, cuja geometria pode ser observada na Figura 15. Mais precisamente, é indicado para provetes de adesivos maciços, com pequenas espessuras [20]. O provete contém dois entalhes simétricos, cujo ângulo é de 90°, com o objetivo de reduzir as zonas com concentrações de tensões, fazendo com que as tensões de corte sejam mais uniformes em toda a zona de corte [6].

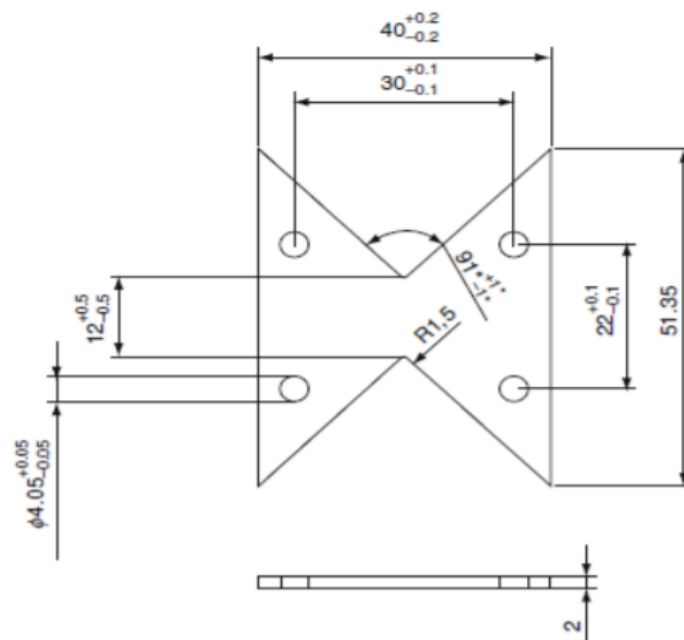


Figura 15 - Geometria do provete Arcan (dimensões em mm)

2.2.2.3 Ensaio Iosipescu ou V-Notched Beam Shear Method

Este ensaio foi proposto por Iosipescu para a caracterização do comportamento ao corte de metais, sendo mais tarde utilizado em laminados de materiais compósitos, de acordo com a norma ASTM D5379 [21]. Os provetes são de fácil execução e as suas propriedades ao corte são facilmente determináveis [13].

O ensaio é executado num provete retangular com dois entalhes simétricos, sendo solicitado em 4 pontos conforme se observa na Figura 16. Existe um esforço de corte no centro do provete, onde se deve colar os extensómetros a 45° e -45°, medindo assim as deformações [6].

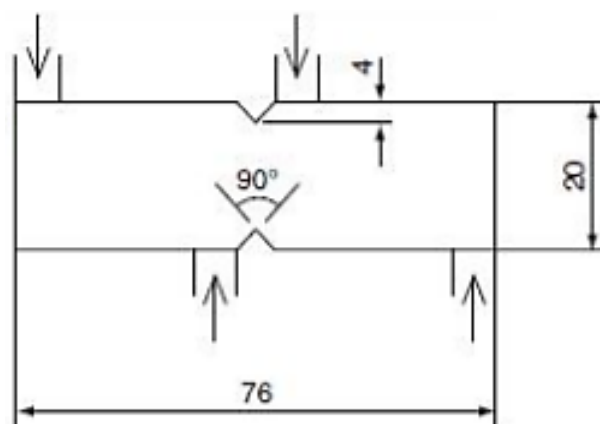


Figura 16 - Geometria do provete e respetiva carga aplicada para o ensaio Iosipescu (dimensões em mm) [5]

2.2.2.4 Ensaio Thick Adherend Shear Test (TAST)

O ensaio TAST é dos ensaios de corte mais populares, pois é dos mais fáceis de executar. Através deste ensaio, é possível determinar a tensão e deformação de corte máximas [13]. A sua geometria segue a norma ISO 11003-2 [22], como é possível observar na Figura 17.

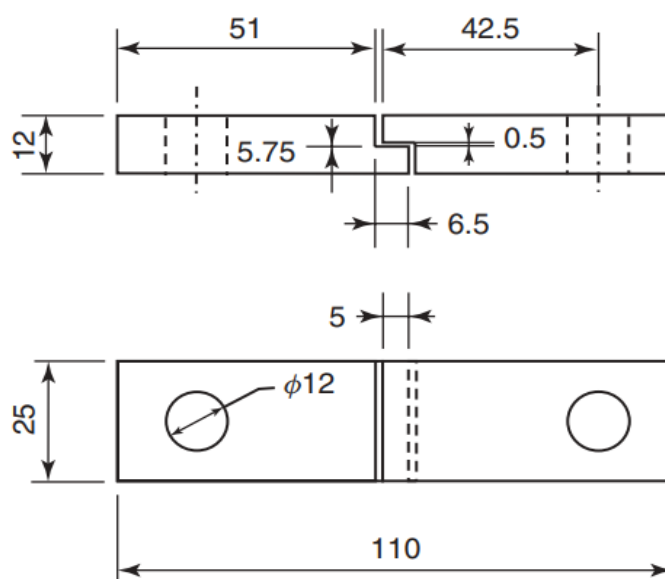


Figura 17 - Geometria do ensaio TAST segundo a norma ISO 11003-2 (dimensões em mm) [22]

O extensómetro utilizado tem duas funções: mede o deslocamento do adesivo e a deformação do aderente (Figura 18).

É, por isso, necessário corrigir esta medição. Segundo a norma, esta correção deve ser feita através da medição de deslocamento, num provete “dummy”, que consiste apenas no material aderente, e posteriormente deduzida do deslocamento inicial [5].

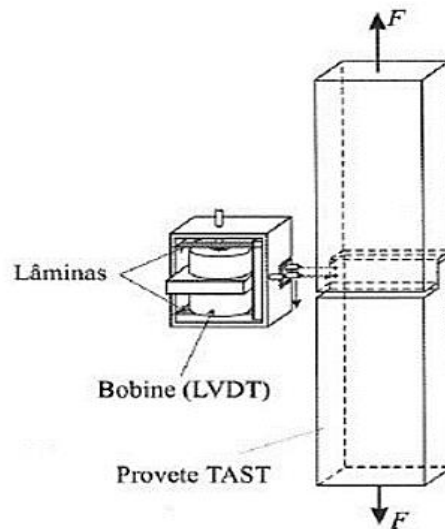


Figura 18 - Extensômetro utilizado no ensaio TAST, segundo a norma ISO 11003-2 [5]

2.2.3 Determinação das propriedades de fratura

As teóricas de previsão de resistência de juntas adesivas, nomeadamente os modelos de dano coesivo têm captado a atenção de investigadores devido às suas inúmeras potencialidades. A taxa crítica de libertação de energia (G_c) corresponde à variável que governa a fratura, e os casos de carregamento com maior alvo de estudo são o modo I e II. No entanto, e devido à presença de ambas tensões de corte e normais, é comum a aplicação do modo III [2]. A Figura 19 exemplifica os três modos de rotura.

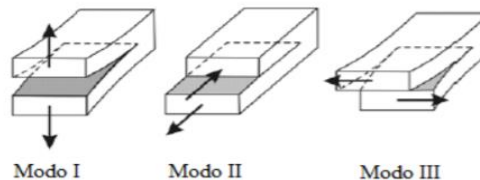


Figura 19 - Modos de rotura em juntas adesivas [23]

2.2.3.1 Determinação das propriedades de fratura à tração (Modo I)

2.2.3.1.1 Ensaio *Double-Cantilever Beam* (DCB)

A fratura em Modo I pode ser caracterizada pelo ensaio *Double-Cantilever Beam* (DCB), cujo ensaio é o mais utilizado atualmente pois requer provetes relativamente simples e o seu procedimento está bem definido [24]. O ensaio está normalizado para a determinação da taxa crítica de libertação de energia de deformação à tração (G_{IC}).

Durante o teste DCB, é assumido que uma fenda propagar-se-á estavelmente quando a taxa de libertação de energia em modo I (G_I) na extremidade do defeito igualar a G_{IC} .

O ensaio baseia-se na solicitação dos braços do provete em abertura, mantendo a velocidade de solicitação constante. Durante a realização deste, são registados o deslocamento δ e de carga P , enquanto é medido, em determinados intervalos, o comprimento de fenda a [13]. Apresenta-se a geometria do provete na Figura 20.

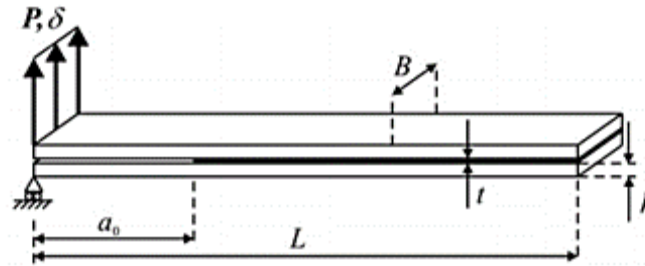


Figura 20 – Representação esquemática do provete DCB [1]

2.2.3.1.2 Ensaio *Tapered Double-Cantilever Beam* (TDCB)

O ensaio TDCB, cuja geometria do provete se encontra na Figura 21, foi inicialmente desenvolvido para medir G_{IIC} , sem a necessidade de medir a . A vantagem deste ensaio é o facto de se poder manter a flexibilidade constante, o que permite precisamente a obtenção das expressões de redução de G_{IC} que não dependem de a .

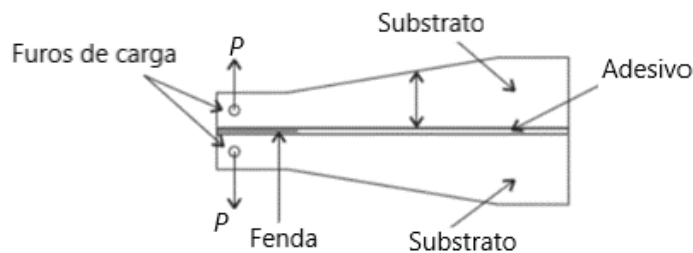


Figura 21 - Representação esquemática do provete TDCB [13]

O seu procedimento de ensaio é semelhante ao do DCB. A diferença está na geometria dos provetes, na medida que os provetes utilizados em TDCB são mais caros e complexos. Contudo, a sua maior variação de altura assegura uma maior resistência à deformação plástica do provete [5].

2.2.3.2 Determinação das propriedades de fratura ao corte (Modo II)

O modo II tem como objetivo a determinação da taxa crítica de libertação de energia de deformação, com os ensaios mais relevantes a serem o ENF, 4ENF e ELS.

2.2.3.2.1 Ensaio *End-Notched Flexure* (ENF)

Devido à sua simplicidade, o ensaio ENF é bastante utilizado, uma vez que não existem problemas com fricção encontrados durante o ensaio 4ENF. Comparativamente com o teste ELS, o ENF minimiza também os deslocamentos excessivos [1].

O provete, cuja representação esquemática se observa na Figura 22, tem uma espessura constante, sendo apoiado nas suas extremidades. É aplicada uma carga a meio vão, que provoca a propagação da fenda no adesivo. Durante a realização deste, é registado o δ , P e a [24].

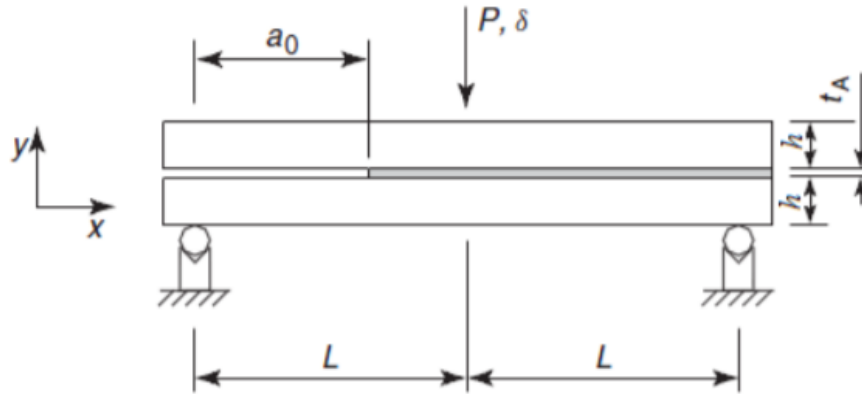


Figura 22 - Representação esquemática do provete ENF [13]

2.2.3.2.2 Ensaio *Four-Point End-Notched Flexure* (4ENF)

Este ensaio tem como base o ensaio ENF, contudo existe uma maior sofisticação, pois tem um ponto adicional de carga (Figura 23). Tem como desvantagem o facto de ser difícil de visualizar a propagação da fenda, já que esta se propaga sem a sua abertura, complicando a sua monitorização [13].

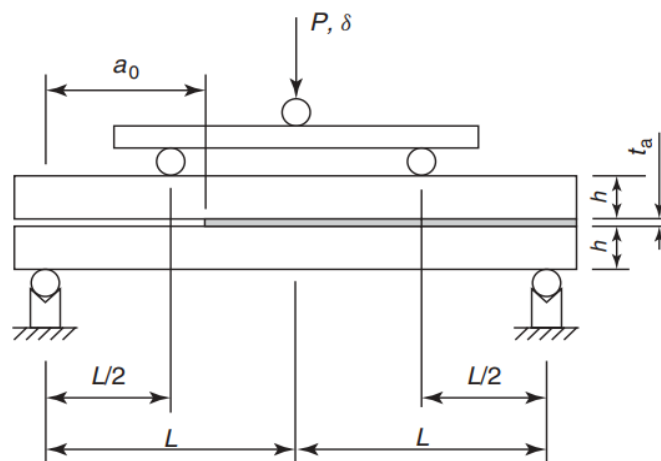


Figura 23 - Representação esquemática do provete 4ENF [13]

2.2.3.2.3 Ensaio *End-Loaded Split* (ELS)

O ensaio ELS surge como uma boa opção para se caracterizar o comportamento da fratura, quando solicitada sob o modo II, como o estudo efetuado por Blackman [25] comprova. Em adesivos reforçados com fibra de carbono, Blackman concluiu que a propagação da fenda ocorre de uma forma mais estável durante o ensaio ELS.

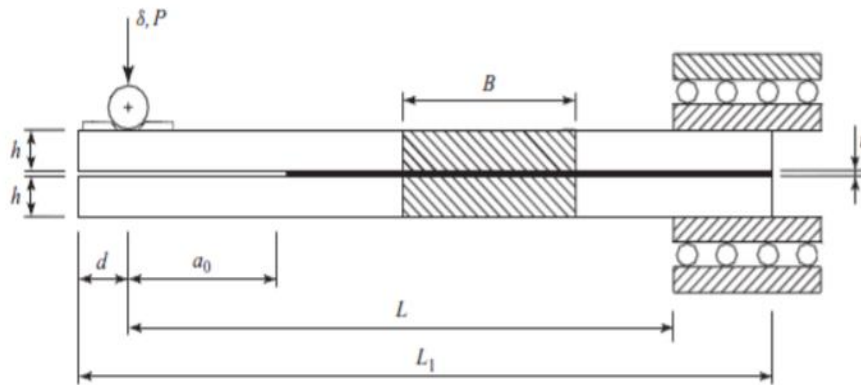


Figura 24 - Representação esquemática do provete ELS [13]

Contudo, o ensaio apresenta dificuldades na correta obtenção do G_{IIC} , mais especificamente devido às condições de aperto, dado que o provete pode deslocar-se horizontalmente, mas está impedido de o fazer verticalmente [13]. Na Figura 24 está representado o provete deste ensaio.

2.2.3.3 Determinação das propriedades de fratura à tração e ao corte (Modo I+II)

Para além dos Modos I e II, há considerável interesse em determinar a resistência à fratura de juntas sujeitas ao Modo Misto, uma vez que as juntas adesivas estão frequentemente sujeitas a condições que envolvem solicitações à tração e corte, simultaneamente.

Os ensaios desenvolvidos utilizam provetes semelhantes aos modos I e II, e incluem ADCB, ATDCB e MMB [5].

2.2.3.3.1 Ensaio *Asymmetric Double-Cantilever Beam* (ADCB)

Generalizado a partir do ensaio DCB, com o propósito de caracterizar materiais solicitados à tração e corte, os braços do provete (Figura 25) deste ensaio são produzidos com diferentes materiais e/ou espessuras. É útil para avaliar a tenacidade à fratura de compósitos e juntas adesivas [26].

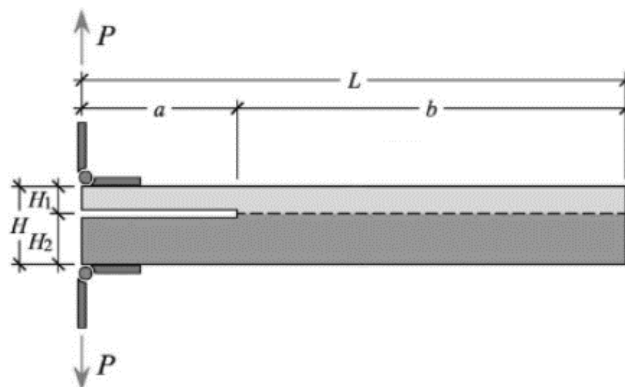


Figura 25 - Representação esquemática do provete ADCB [27]

2.2.3.3.2 Ensaio *Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam* (ATDCB)

O ensaio ATDCB é relativamente novo, e segundo Esteves da Silva [28], o provete (Figura 26) consiste em dois aderentes: um similar ao usado no ensaio TDCB e outro mais convencional. A carga é aplicada ortogonalmente em relação à camada adesiva, semelhante à carga de tração aplicada no ensaio DCB. Contudo, e devido à rigidez diferente das secções transversais dos aderentes, o provete também está solicitado ao corte, provocando uma solicitação do modo misto.

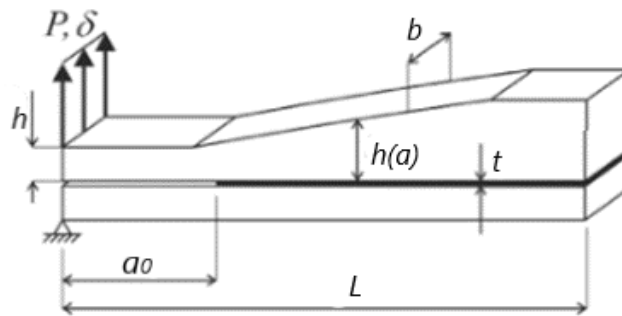


Figura 26 - Representação esquemática do provete ATDCB [29]

2.2.3.3.3 Ensaio *Mixed-Mode Bending* (MMB)

O ensaio MMB (Figura 27) foi originalmente desenvolvido por Crews e Reeder, com a finalidade de estudar as propriedades mecânicas da fratura em plásticos reforçados com fibra de vidro. Desde então, tornou-se no ensaio mais comum para análise da fratura em Modo Misto, pois oferece várias vantagens:

1. As relações do Modo Misto (I+II) podem facilmente ser controladas, através de um simples dispositivo;
2. Combina facilmente o Modo I do ensaio DCB com o Modo II do ensaio ENF;
3. Permite que a fenda se propague estavelmente [30].

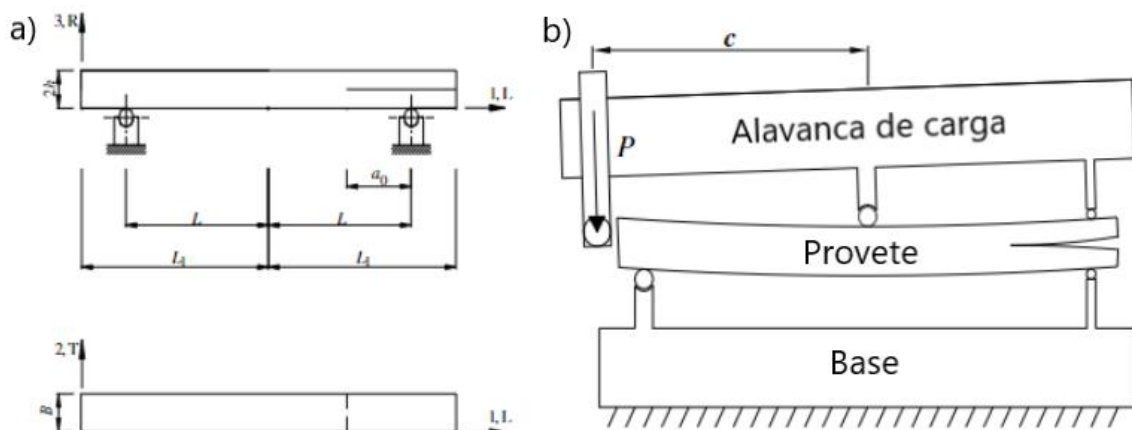


Figura 27 - a) Geometria do provete MMB e b) condições de carga [31]

2.3 Modificação de adesivos

Existem vários métodos com o intuito de modificar os substratos: através da adição de micropartículas e nanopartículas, além da incorporação de micro e macrofibras na camada adesiva [32]. Um método efetivo para melhorar a resistência das juntas adesivas consiste, por exemplo, na adição de partículas metálicas [33].

A flexibilidade e resistência de uma junta adesiva ideal deve variar ao longo do comprimento da junta adesiva. Nas extremidades da junta de sobreposição estão concentradas altas tensões de corte, pelo que deve ser usado um adesivo flexível e dúctil nesta zona, ao contrário do centro, onde deverá ser preferido um adesivo mais rígido e forte [34-36].

2.3.1 Diferentes escalas de reforços

A adição de reforços nos adesivos resulta num material compósito, que pode ser definido como uma combinação de dois ou mais materiais. Assim, exhibe melhores propriedades em conjunto do que os componentes individualmente [37].

O reforço é uma fibra ou partícula que melhora as propriedades mecânicas e térmicas da matriz e, de acordo com o seu tamanho, pode ser dividido em três escalas:

- Nano;
- Micro;
- Macro.

2.3.1.1 Reforços de escala nanométrica

Os materiais de dimensão nanométrica têm propriedades bastante úteis para os adesivos, tais como grande área e energia superficial, além de reduzido número de defeitos estruturais [32].

Investigadores observaram que a adição de nanopartículas melhorou os comportamentos mecânicos e térmicos dos adesivos e materiais poliméricos [38, 39].

Os reforços de escala nanométrica podem ser, por exemplo, materiais à base de carbono (Figura 28), metal e dióxido de silicone.

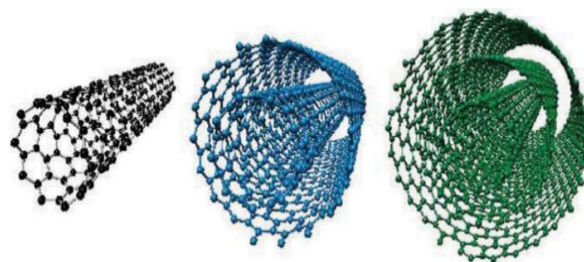


Figura 28 - Exemplos de diferentes reforços de materiais à base de carbono [40]

2.3.1.2 Reforços de escala microscópica

A dimensão destes materiais situa-se entre 1 e 1000 microns e a razão área/volume é inferior aos reforços nano. Logo, confere propriedades diferentes aos adesivos.

Um exemplo destes reforços são as fibras de vidro, que podem ser usadas de duas formas, com fibras descontínuas e contínuas [41]. Ao contrário das fibras de carbono, as fibras de vidro são isotrópicas. Como tal, as suas propriedades não variam consoante a direção da força aplicada. Além disso, a sua densidade é relativamente baixa, a resistência é alta, resistem a grandes impactos e são muito flexíveis. Por isso, e devido às suas propriedades únicas, são usadas como aditivos e têm elevada aplicabilidade em várias indústrias, tais como a aeronáutica, automóvel e marítima [42, 43].

Apresentam-se os seguintes exemplos:

- Partículas termicamente expansíveis;
- Partículas de rolha;
- Materiais micrometálicos;
- Pós de borracha;
- Fibras de carbono.

2.3.1.3 Reforços de escala macroscópica

As macrofibras são normalmente metálicas, como o aço, alumínio, entre outros. Estas microfibras metálicas têm algumas vantagens comparativamente a outros reforços, como:

- Melhor desempenho durante o processo de cura;
- Maior condutividade elétrica da camada adesiva;
- Espessura uniforme do adesivo [44].

2.3.2 Efeito da modificação de adesivos sobre a resistência

A resistência de materiais poliméricos em reforços micro e nano depende essencialmente de três fatores:

- Adesão interfacial entre partícula/matriz;
- Dimensão partícula;
- Composição.

A Figura 29 demonstra como a resistência à tração difere em compósitos de epóxi com sílica, com percentagens mássicas diferentes [32].

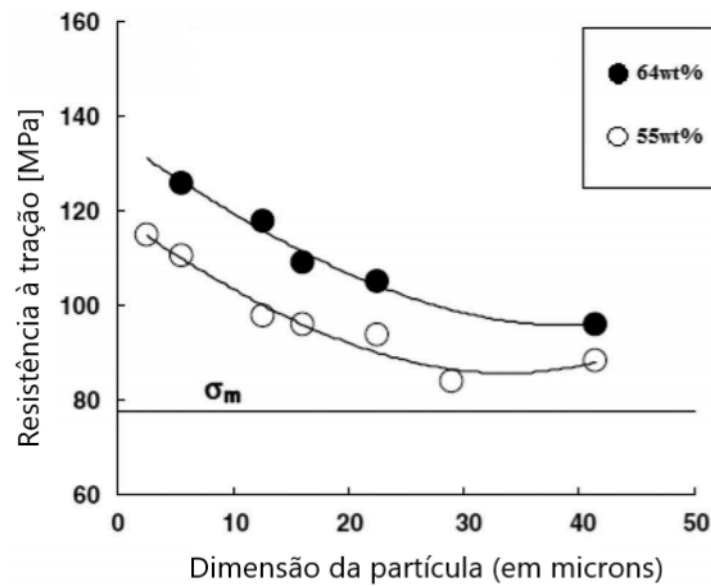


Figura 29 - Resistência à tração com diferentes percentagens mássicas [32]

A resistência à tração de materiais poliméricos reforçados com micro e nano partículas também foi corroborado por vários investigadores [45, 46]. Logo, pode ser concluído que o aumento da resistência à tração aumenta com a diminuição da dimensão das partículas, pois estas têm uma maior área superficial, promovendo uma transferência eficaz entre o polímero e as mesmas.

2.3.3 Efeito da modificação de adesivos sobre a rigidez

A rigidez tem um elevado impacto no desempenho das juntas adesivas. Vários estudos reportaram um aumento da rigidez dos polímeros ao incorporar partículas e fibras [47, 48]. De facto, estas mantêm-se entre as cadeias do polímero e reduzem a sua flexibilidade, aumentando a rigidez [49].

O módulo de elasticidade em compósitos epóxi das fibras de vidro varia em função da dimensão e tamanho das partículas, como é possível observar Figura 30 [50].

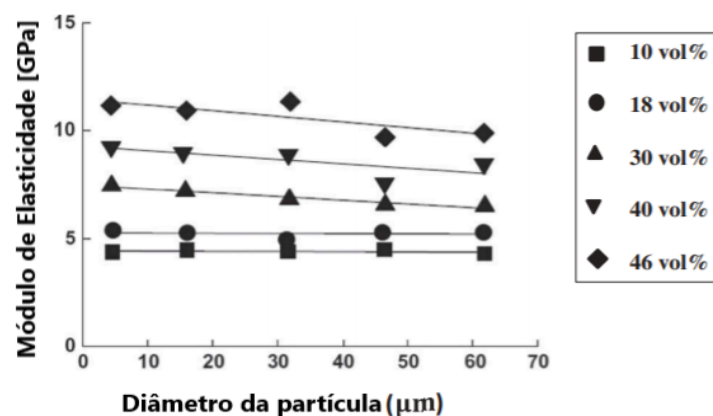


Figura 30 - Variação do módulo de elasticidade em função da fração de volume [50]

2.3.4 Efeito da modificação de adesivos sobre a tenacidade à fratura

O aumento da tenacidade é uma questão crucial e desafiante cujo estudo foi feito por muitos investigadores. De acordo com a maior parte dos estudos disponíveis, pode-se concluir que a tenacidade de adesivos reforçados melhora, aumentando a composição da partícula aditiva. Contudo, para elevadas frações volúmicas, a tendência inverte devido ao ajuntamento das partículas durante a cura e, por conseguinte, observa-se a diminuição do desempenho com a criação de zonas de tensões acumuladas (Figura 31) [51, 52].

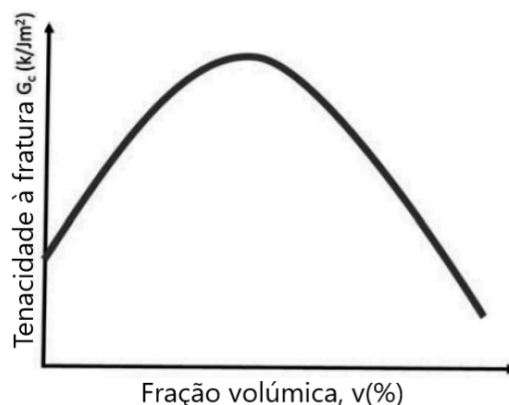


Figura 31 - Tendência da tenacidade à fratura em função da fração volúmica [32]

2.3.5 Efeito da modificação de adesivos expostos a água e humidade

A absorção de humidade tem efeitos nefastos que põem em causa o desempenho dos materiais poliméricos. Efeitos estes que provocam danos irreversíveis devido às reações de hidrólise, formação de microcavidades e degradação da estrutura molecular [53]. No caso dos adesivos e juntas adesivas, esses danos resultam na perda de resistência. Ora, um dos métodos para reduzir os efeitos da absorção de humidade é através da aditivação por partículas.

Exemplificando, Bal e Saha [54] estudaram o efeito da humidade sobre as propriedades mecânicas de polímeros epóxi reforçados com nanotubos de carbono (CNT). Determinaram que a natureza hidrofóbica dos CNT's provocava a diminuição da penetração da humidade através dos polímeros, logo a degradação das propriedades mecânicas era inferior em polímeros reforçados com CNT's do que em polímeros simples.

2.4 Modelação numérica de juntas adesivas por modelos de dano coesivo

2.4.1 Fundamentos dos modelos de dano coesivo

Os MDC começaram a ser colocados em prática há algumas décadas. O conceito de zona coesiva foi proposto com o objetivo de descrever o dano sob cargas estáticas na

extremidade da fenda, e passou a ser utilizado com o objetivo de simular o início da ocorrência de fenda, e de como esta se propaga na zona interfacial, além da coesiva [55]. O modelo consiste no pressuposto de que uma ou mais interfaces de fratura possam ser inseridas artificialmente em estruturas. É baseado também na criação de leis coesivas para modelar regiões finitas, e torna possível a propagação macroscópica de danos presentes, descartando os fenômenos microscópicos presentes no início da fenda [56].

As mesmas leis coesivas podem ser estabelecidas entre nós homólogos de elementos coesivos, possibilitando a ligação de nós sobrepostos pertencentes a elementos que representam camadas ou materiais diferentes em compósitos (abordagem local) [57].

Também existe a possibilidade de as leis serem utilizadas aquando da interação de dois materiais, sem estes estarem em contacto, com o objetivo de simular uma camada fina. Assim, trata-se da simulação de uma ligação adesiva através de uma abordagem contínua [58], como é possível observar na como é possível observar na Figura 32.

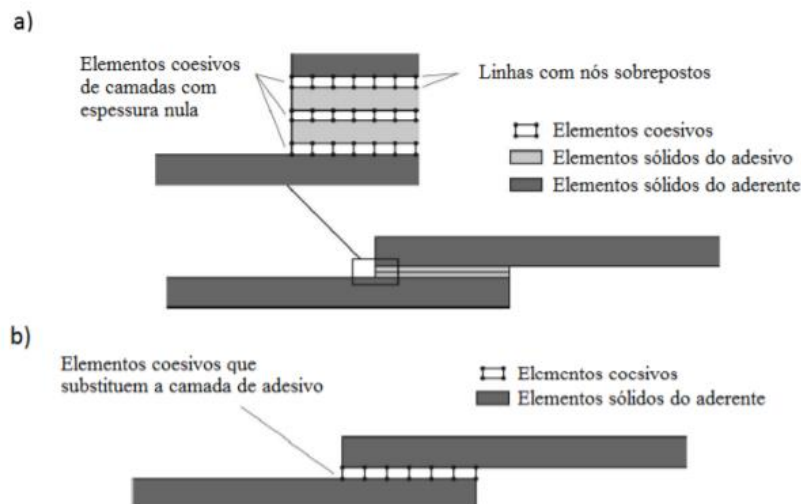


Figura 32 - Elementos coesivos para a) simulação de caminho de rotura com espessura zero: abordagem local e b) modelação de uma camada fina de adesivo: abordagem contínua [59]

2.4.2 Modelo de dano triangular

A previsão da resistência de juntas adesivas, envolvendo a simulação numérica de crescimento e aparência de danos, foi sendo pesquisada ao longo do tempo por vários investigadores. Foi só em 2003 que foi utilizado o modelo de dano triangular para simulação da descolagem progressiva de juntas adesivas e concluiu-se que o modelo consegue prever o comportamento mecânico das juntas, com precisão [1].

O modelo de dano triangular (Figura 33) é o mais usado pela sua simplicidade, pelos resultados com elevada precisão para grande parte das condições reais e pelo baixo número de variáveis a serem determinadas [60]. Este modelo coesivo baseia-se em MEF de interface [61], cuja espessura é nula e quatro ou seis nós.

Com este género de modelo, o dano pode ser definido em termos de modo puro ou modo misto. O modo puro pode ser dividido em modo I, cuja fenda abre devido a forças de tração, e o modo II, caso em que a fenda ocorre devido aos esforços de corte [62]. Para o modo misto, são atuados simultaneamente os modos I e II, além dos critérios de tensões para combinar os esforços de corte e tensão [63].

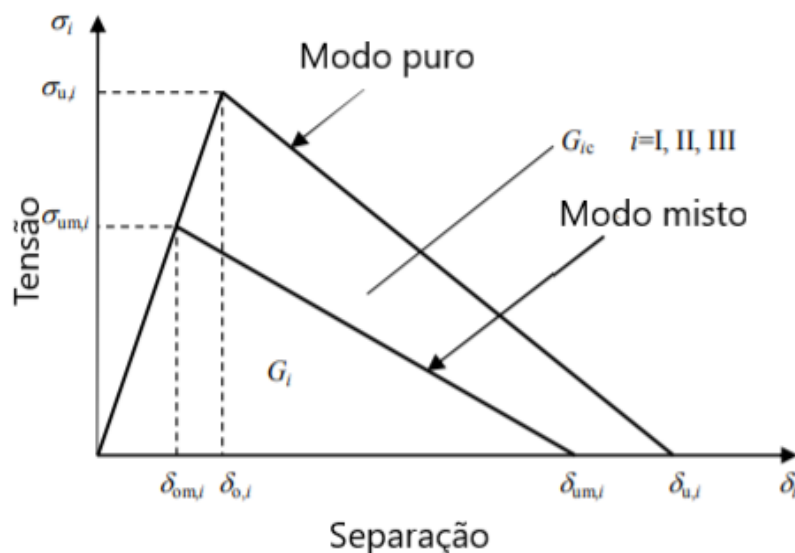


Figura 33 - Lei triangular de modo puro e misto [1]

2.4.3 Estado da arte

Na Tabela 3 e Tabela 4 são apresentados, respetivamente, os estudos que existem acerca do reforço de adesivos para melhoria das suas propriedades e métodos para a determinação de parâmetros coesivos.

Tabela 3 - Estudos de aplicação a juntas adesivas

Referências Bibliográficas	Descrição do trabalho
(Warrier et al., 2010) [64]	Este trabalho baseia-se na integração de CNT's em compósitos de epóxi com fibra de vidro. Foram estudados os efeitos de tal inclusão, através de várias propriedades, tais como a temperatura de transição vítrea, o coeficiente de expansão térmica, além da tenacidade à fratura interlaminar do Modo I. Este método de aditivação provocou um aumento de quase 10% na temperatura de transição vítrea, reduziu o coeficiente de expansão térmica em cerca de 31% e, mais importante ainda, registou um aumento de 10% da tenacidade à tração.

(Mariam et al., 2018) [65]	É feito o estudo das propriedades mecânicas de juntas feitas de ligas de alumínio e de epóxi reforçado com fibras de vidro. A união foi feita através de três métodos: juntas aparafusadas, adesivo epóxido Araldite e uma combinação dos dois. Os ensaios à tração e ao corte foram realizados usando apenas provetes de juntas de sobreposição simples, com uma razão de tensão $R=0,1$ com o propósito de determinar o comportamento à fadiga. Posteriormente foram traçadas as curvas tensão – deformação para níveis diferentes do rácio de tensão (30%-90%). O resultado experimental permitiu concluir que as juntas híbridas são as que apresentam maior resistência e tenacidade, sendo que a maior parte da rotura ocorre no parafuso, através do modo misto. Além disso, foi observado que a rigidez da junta híbrida (liga de alumínio e epóxi reforçado com fibra de vidro) é quatro vezes maior do que nas restantes configurações de união. Por último, os mecanismos de dano por fadiga no compósito de fibra de vidro reforçado eram consideravelmente de maior complexidade do que os observados no alumínio AA7075.
(Alomayri, 2017) [66]	No presente trabalho, são investigados os efeitos da presença de microfibras e a sua influência nas propriedades mecânicas de uma matriz de material geopolímero, tais como tenacidade à fratura, resistência à compressão, módulo de elasticidade e dureza. Os resultados mostram que a adição de 2% de microfibras de vidro corresponde ao intervalo ótimo, exibindo os valores mais altos das propriedades mencionadas. Contudo, observam-se propriedades mecânicas adversas quando a composição excede o valor ideal (2%), devido à pobre dispersão e à aglomeração de microfibras na matriz do geopolímero. É possível concluir que a adição de microfibras produz um geopolímero compósito superior ao puro.

Tabela 4 - Estudos da determinação de parâmetros coesivos

Referências Bibliográficas	Descrição do trabalho
(Campilho e Nunes, 2018) [29]	Neste trabalho, o ensaio ATDCB é estudado para estimar a resistência à fratura de três adesivos, todos com ductilidades diferentes. Também foram realizados os ensaios TDCB e ENF. É possível concluir que as leis coesivas do mosto misto e respetivo critério de propagação são válidas para prever a resistências das juntas adesivas. Concluiu-se que parâmetros como G_I e G_{II} refletiram corretamente as diferenças na ductilidade do adesivo Sikaforce 7752 e fragilidade do Araldite AV138.

(Kanani et al., 2020) [67]

Neste trabalho, foram utilizadas diferentes juntas de sobreposição simples híbridas para efeitos de análise da rigidez do adesivo e aderentes até à rotura. Uma das juntas híbridas inclui PPA (poliftalamida) reforçada com 50% de fibra de vidro. Foram conduzidos ensaios ao corte de forma a compreender os diferentes mecanismos de fratura das juntas. Os MDC foram utilizados para simulação da falha de juntas e validação dos resultados práticos e os parâmetros coesivos são validados através da modelação numérica. Os resultados obtidos pela curva carga – deslocamento demonstram que a rigidez dos aderentes afeta a solicitação máxima que as juntas são capazes de suportar, no caso do adesivo mais rígido. As juntas unidas através de um adesivo mais dúctil não são afetadas pela rigidez dos aderentes.

DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

3.2 Trabalho numérico

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

Neste capítulo é feita a descrição e análise dos dados obtidos referentes aos ensaios de fratura com provetes, nos quais se utilizou o adesivo SikaForce® 803 com adição de concentrações de microfibras de vidro a 0%, 0,15%, 0,35% e 0,55%. Além disso, são descritos os materiais utilizados, o processo experimental aplicado no fabrico dos provetes DCB e ENF e correspondentes ensaios, tendo com intuito a obtenção dos valores experimentais de G_{IC} para os provetes DCB e G_{IIC} nos provetes ENF.

3.1.1 Materiais

Na realização de ambos os ensaios (DCB e ENF), os provetes utilizados consistiram em aderentes de material compósito de carbono-epóxico ligados com adesivo SikaForce® 803 com diferente concentração de microfibras de vidro.

3.1.1.1 Aderentes

O fabrico dos aderentes foi realizado com recurso a um compósito pré-impregnado de *Carbon Fiber Reinforced Plastic* (CFRP), mais especificamente, o SEAL® Texipreg HS 160 RM. Este pré-impregnado é fornecido na forma de rolo e cortado manualmente em camadas de dimensão de 300×300 mm. As placas fabricadas apresentam uma espessura de aproximadamente 3 mm, que foi conseguida através de empilhamento de 20 camadas com espessura unitária após cura de 0,15 mm. O empilhamento foi unidirecional, ou seja, $[0]_{20}$. Na Tabela 5 é possível observar as propriedades do CFRP.

Tabela 5 - Propriedades elásticas ortotrópicas do compósito reforçado com fibras de carbono, alinhado unidirecionalmente [68]

Módulo de Young (E)	Coeficiente de Poisson (ν)	Módulo de corte (G)
E_{11} - 109000 MPa	ν_{12} - 0,342	G_{12} - 4315 MPa
E_{22} - 8819 MPa	ν_{13} - 0,342	G_{13} - 4315 MPa
E_{33} - 8819 MPa	ν_{23} - 0,38	G_{23} - 3200 MPa

3.1.1.2 Adesivo

O adesivo utilizado foi o SikaForce® 803. Este é um adesivo poliuretano estrutural de dois componentes cuja cura é feita à temperatura ambiente, e é adequado para ligação estrutural de compósitos, como por exemplo CFRP ou *Glass Fiber Reinforced Plastic* (GFRP). As vantagens do produto podem ser descritas como:

- Boas propriedades estruturais e de flexibilidade;
- As propriedades mecânicas mantêm-se estáveis mesmo numa ampla gama de temperaturas;
- Excelente compressibilidade;
- Cura rapidamente sob elevadas temperaturas;
- Não contém solventes ou PVC's [69].



Figura 34 - Adesivo SikaForce® 803

A Tabela 6 contém as propriedades fornecidas pelo fabricante para este adesivo.

Tabela 6 - Propriedades do adesivo SikaForce® 803 [69]

Propriedades	Valores
Densidade	1,2 g/cm ³
Viscosidade	90 Pa/s
Temperatura de aplicação	15-30 °C
Tempo de manuseamento	45 minutos
Tempo de utilização	120 minutos
Resistência à tração	10 MPa
Alongamento à tração	300%
Módulo de elasticidade longitudinal	10 MPa
Temperatura de transição vítrea	-40 °C
Tempo de armazenamento	12 meses

A Tabela 7 exibe as propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 803. Algumas destas propriedades foram obtidas pelo colega e Eng.º Guilherme Tavares, através da realização de um trabalho paralelo.

Tabela 7 – Propriedades mecânicas à tração e ao corte do adesivo SikaForce® 803

Propriedades	Valores
Módulo de elasticidade, E [MPa]	19,09±0,43
Módulo de elasticidade transversal, G [MPa]	3,26±0,95
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	1,73±0,32
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	7,95±0,24
Deformação de rotura à tração, ε_f [%]	173,00±8,00
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	2,47±0,51
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	4,84±1,04
Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm]	0,683±0,12
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm]	16,79±0,00

3.1.1.3 Microfibras de vidro

As fibras de vidro são um reforço versátil e custo-eficiente para os compósitos. Devido às suas propriedades únicas, o uso como reforço tem uma vasta utilização em diversos setores como aeroespacial, automóvel e naval. Estas fibras são caracterizadas pela sua densidade relativamente baixa, alta resistência ao impacto, pouca rigidez, baixa condutividade térmica e, não menos importante, baixo custo. Além disso, isolam bem a eletricidade, mesmo em baixas espessuras [70]. Convém realçar que fibras em causa representam um dos reforços poliméricos mais usados, uma vez que 90% das reforçadas com plástico são feitas de fibras de vidro (GFRP's). Destas, a fibra mais usada para reforço é a vidro do tipo E [70], como a selecionada para este trabalho.



Figura 35 - Microfibra de vidro LANXESS MF 7980 [71]

O adesivo SikaForce® 803 foi reforçado com microfibra de vidro LANXESS MF 7980. Esta fibra é adequada para uma ampla gama de aplicações, cujas propriedades de reforço permitem uma boa flexibilidade. Além disso, não requerem tratamento superficial. A microfibra consiste em filamentos individuais com comprimentos diferentes, sendo a média cerca de 190 μm . Este reforço em compósito permite melhorar, entre outras propriedades, a resistência ao calor, a rigidez e estabilidade dimensional. A Tabela 8 contém as propriedades técnicas da microfibra em causa [71].

Tabela 8 - Propriedades técnicas da fibra LANXESS MF 7980 [71]

Propriedades	Valor
Diâmetro da fibra	14 μm
Comprimento da fibra	190 μm
Vidro	Tipo E
Massa volúmica	600 kg/m^3

3.1.2 Fabrico e ensaio dos provetes de fratura

Neste subcapítulo são descritos os vários passos necessários para a fabricação dos provetes DCB e ENF, com variadas concentrações de microfibras de vidro.

3.1.2.1 Fabrico das placas

O fabrico das placas em material compósito foi feito através do pré-impregnado SEAL® Texipreg HS 160 RM. Este pré-impregnado foi fornecido como um rolo contínuo de 600 mm de largura. Os passos tomados para o fabrico das placas são os seguintes:

1. As dimensões da placa (300×300 mm) foram marcadas no compósito, sendo posteriormente cortadas manualmente, recorrendo a um x-ato (Figura 36);

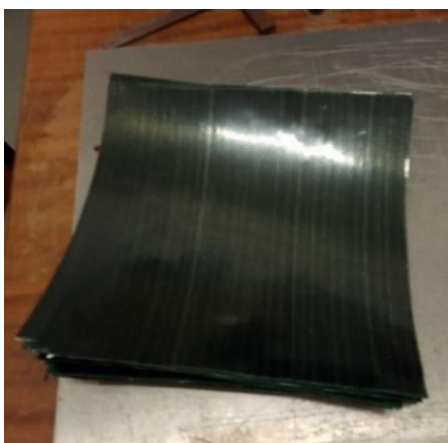


Figura 36 - Folhas de carbono-epóxico cortadas

2. Após o corte, efetuou-se o empilhamento das folhas (vinte folhas em cada placa) a 0° graus entre si. Depois da primeira camada empilhada, aqueceu-se com uma pistola de calor a camada seguinte. Este passo foi efetuado várias vezes, de forma a perfazer quatro placas, cada uma com vinte folhas (Figura 37);



Figura 37 - Aquecimento das folhas carbono-epóxido

3. Com o recurso a uma espátula, procedeu-se à compressão manual das folhas. Esta ajuda a prevenir a formação de bolhas e vazios entre as camadas, pois caso contrário, poderia levar à redução da capacidade mecânica do laminado. Este passo só terminaria após o empilhamento de 20 camadas (Figura 38);



Figura 38 - Placa após compressão e empilhamento de 20 camadas

4. Após o empilhamento, deu-se início à preparação do molde para se proceder à cura do laminado. Com recurso a uma espátula, foram removidos possíveis vestígios de resina presentes nas placas, espaçador metálico e moldura;
5. Procedeu-se à aplicação do desmoldante nas placas, espaçador e na moldura;
6. Realizou-se o processo de cura com o auxílio de uma prensa de pratos quentes, controlando a força exercida e a temperatura. O ciclo demorou cerca de 135 minutos, dos quais 58 minutos correspondem ao tempo de estágio, em que a temperatura atingiu um máximo de 125°C (Figura 39). Posteriormente, foi retirado o laminado da prensa, que se manteve à temperatura ambiente.



Figura 39 - Configuração da prensa de pratos quentes

3.1.2.2 Fabrico dos provetes

Depois de previstas as dimensões dos provetes, tanto para o ensaio DCB e ENF, procede-se ao corte dos respetivos aderentes através de um equipamento de corte com disco revestido a diamante. Durante este processo, a largura dos provetes é controlada através de um paquímetro digital. No total, foram produzidos 24 provetes, em que 12 destes correspondem aos do ensaio DCB e os restantes aos ensaios ENF.

De forma que os resultados dos ensaios obtidos traduzam as propriedades coesivas do adesivo, é necessário que a preparação da superfície dos aderentes seja corretamente realizada, implicando isto que seja feita com cuidado e rigor. Para reduzir a hipótese de que a rotura ocorra na interface, é importante assegurar que a adesão seja tal, que o elo mais fraco da junta corresponda ao adesivo ou o aderente [2].

Posto isto, e após a obtenção dos aderentes com as dimensões requeridas, deu-se início à preparação das suas superfícies. De forma a aumentar a rugosidade e promover a adesão entre o adesivo e o aderente, realizou-se a abrasão manual com auxílio de uma lixa de metal, de granulometria 320, na superfície de interação com o adesivo. Posteriormente, e com recurso a papel embebido com acetona, fez-se a limpeza das superfícies dos provetes, de maneira a assegurar a remoção de possíveis partículas (Figura 40). Este último passo é feito até que não se encontre qualquer resto de sujidade no papel, ou seja, até que este se encontre completamente branco.



Figura 40 - Limpeza manual dos substratos de acetona

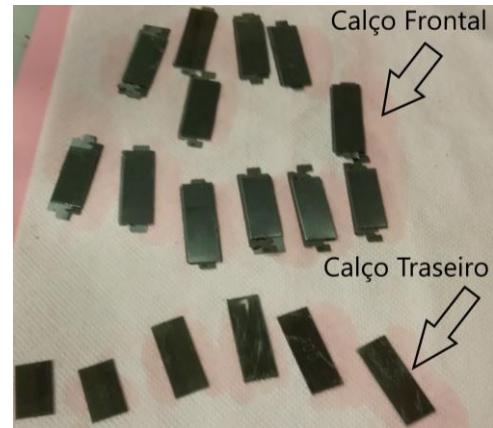


Figura 41 - Calços frontais e traseiros

Na colagem dos aderentes foram utilizados calços calibrados de forma a garantir a dimensão correta de t_A . Estes têm a responsabilidade de controlar o valor de t_A e criarem a pré-fenda, a partir da qual a propagação se iniciará. Além disso, e de forma a assegurar a pré-fenda inicial, é necessário garantir que a extremidade da lâmina esteja exposta, e simultaneamente, em contacto com a camada do adesivo. Na Figura 41 é possível observar os calços frontais (com lâminas) e traseiros.

Com o intuito de criar a pré-fenda no adesivo e assegurar t_A , o calço frontal é provido de uma lâmina de barbear com uma espessura de 0,1 mm. Esta lâmina situa-se entre espaçadores de menor espessura, em que a primeira se encontra em posição exterior de forma a promover a pré-fenda, enquanto o calço traseiro garante a dimensão t_A . A Figura 42 representa a disposição dos calços entre os aderentes e adesivo.

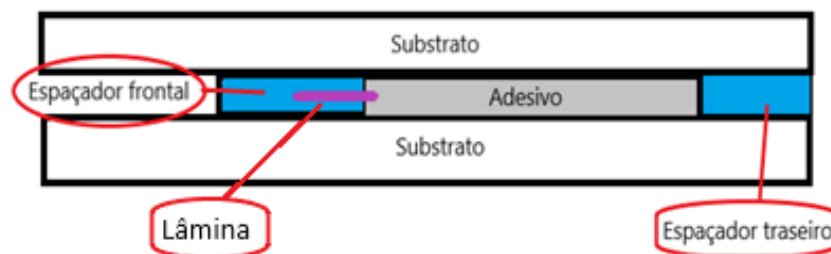


Figura 42 - Disposição dos calcos

Os calços são desgordurados com acetona antes de se proceder à colagem. Após a limpeza, aplica-se o cianoacrilato numa das faces da fita, coloca-se a lâmina de barbear sobre a fita e aplica-se outra vez o cianoacrilato na lâmina. Para concluir a colagem, sobrepõe-se a fita sobre a lâmina. Neste caso (do espaçador frontal), a lâmina é colada aos calços de ambos os lados para perfazer t_A . Posteriormente, os espaçadores são aquecidos num forno elétrico, de forma a promover a adesão do desmoldante, consistindo este no Loctite Frekote® 770-NC. Por último, coloca-se o desmoldante de maneira a estes poderem ser removidos dos provetes, pós-cura, sem provocar resistência nem danificar a camada de adesivo.

Concluída a aplicação do desmoldante, procede-se ao posicionamento dos espaçadores sobre um dos dois aderentes. É colocado o espaçador traseiro numa das extremidades do aderente e o espaçador frontal é posicionado a 50 mm (caso DCB) ou a 80 mm (caso ENF) de distância do espaçador traseiro.

Na Figura 43 é possível observar os espaçadores já aplicados aos aderentes.

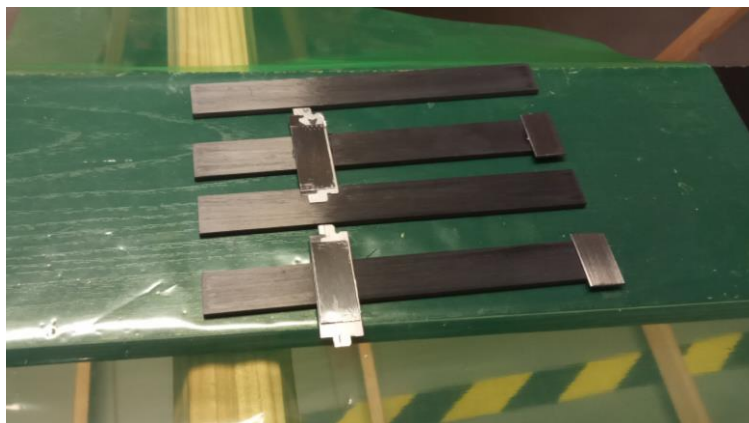


Figura 43 - Espaçadores aplicados nos aderentes

Após o término da preparação superficial e colocação dos calços, o passo seguinte consiste na aplicação do adesivo nos aderentes. Com o auxílio de uma pistola manual, o adesivo sem adição de fibra de vidro é aplicado nos aderentes através de um bico de mistura, combinando os dois componentes.

É importante ressaltar a forma diferente de como se procedeu à preparação do adesivo, para os casos em que a concentração de fibra de vidro seja diferente de 0%. Ao preparar a mistura do adesivo, e com recurso a uma balança digital (Figura 44), injetou-se o componente A num copo de plástico. Adicionou-se a fibra de vidro desejada e o componente B, procedendo-se à sua mistura até esta ser homogénea. A razão mássica da fibra de vidro-adesivo utilizada nos vários casos já é conhecida: 0,15%; 0,35% e 0,55%.



Figura 44 - Pesagem dos componentes

O adesivo é então aplicado, em ziguezague, ao longo de todo o comprimento de um aderente em superfície lisa. Relativamente ao calço frontal, e contrariamente ao traseiro, é necessário certificar que o adesivo seja espalhado sobre a lâmina, de forma que quando esta seja retirada, seja provocada a pré-fenda.

De seguida é posicionado o aderente superior sobre o adesivo, momento este em que é exercida pressão para que o excesso de adesivo escorra para fora dos provetes. Este processo termina com a fixação de grampos sobre a zona dos espaçadores. Os grampos permanecem colocados durante todo o processo de cura, assegurando o posicionamento correto dos provetes e a espessura almejada. Através da Figura 45, é possível observar os provetes fixados à barra de apoio com o recurso a grampos.



Figura 45 - Fixação dos grampos

Após o processo de cura, o passo final consiste na remoção dos calços dos provetes, além do adesivo em excesso ao longo das faces laterais, caso este em que é utilizado um X-ato. Convém também referir que, durante a remoção dos calços, é necessário prestar especial atenção para não provocar danos à junta, pois os calços manifestam alguma resistência ao serem separados.

3.1.2.3 Ensaio dos provetes de fratura

Para poder realizar os ensaios DCB, foi necessário recorrer aos provetes fabricados para cada concentração de fibra de vidro. A sua preparação foi feita recorrendo aos valores teóricos dimensionais. A geometria do provete DCB é observável na Figura 46 e as suas dimensões na Tabela 9.

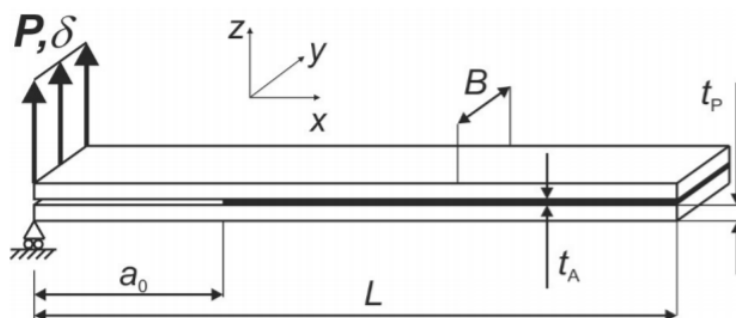


Figura 46 - Geometria do provete DCB [72]

Tabela 9 - Dimensões teóricas dos provetes DCB [73]

Comprimento do provete, L	140 mm
Comprimento da pré-fenda, a_0	50 mm
Espessura do aderente, t_P	3 mm
Espessura do adesivo, t_A	1 mm
Largura do provete, B	15 mm

É possível observar a geometria dos ensaios ENF na Figura 47 e as dimensões teóricas dos provetes na Tabela 10.

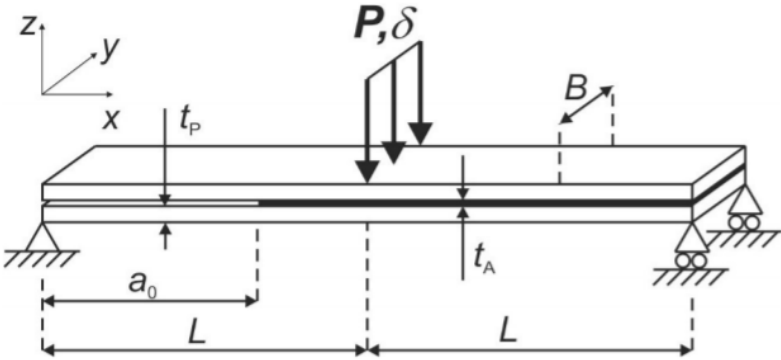


Figura 47 - Geometria do provete ENF [72]

Tabela 10 – Dimensões teóricas dos provetes ENF [72]

Comprimento do provete, L	230 mm
Comprimento da pré-fenda, a_0	85 mm
Espessura do aderente, t_P	3 mm
Espessura do adesivo, t_A	1 mm
Largura do provete, B	15 mm

Previamente à iniciação dos ensaios, é criada uma pré-fenda no provete. Esta tem como objetivo causar uma separação dos aderentes na zona em que se inicia a fenda e, posteriormente, regista-se os valores de a_0 . Por fim, cola-se uma escala de um dos lados de cada provete (Figura 48), que será usada para registar a durante o ensaio.



Figura 48 - Proвете com a escala instalada

Os provetes foram ensaiados numa máquina universal Shimadzu AG-X 100 (Figura 49), pertencente ao Laboratório de Ensaios Mecânicos do ISEP. A máquina está munida com uma célula de carga de 100 kN, com o propósito de medir a aplicação da força. Importa também referir que os ensaios foram realizados em condições de temperatura e humidade ambiente, com uma velocidade de ensaio de 4 mm/min.



Figura 49 – Máquina universal Shimadzu AG-X 100

Procedendo-se à configuração dos provetes para os ensaios DCB (Figura 50), iniciou-se a fixação do provete através da dobradiça inferior e, posteriormente, à fixação da dobradiça superior pelo movimento da amarra basculante.



Figura 50 - Configuração do ensaio DCB

Após a colocação do provete nas amarras da máquina universal, é utilizada uma máquina fotográfica Canon® EOS 550D com o objetivo de registar imagens, a cada 5 segundos, ao longo de todo o ensaio. Esta tem de estar bem posicionada, de maneira a capturar toda a extensão da escala do provete. Uma vez que cada ensaio é muito longo (podendo demorar cerca de 10 minutos) decidiu-se desenvolver um método alternativo de obter as fotos ao invés de pressionar o botão da máquina fotográfica a cada 5 segundos.

Assim, recorreu-se a um *hardware* Arduino, além de outras ferramentas, e assim tornou-se mais fácil a obtenção de centenas de fotos. Os materiais necessários são os seguintes:

- 1 breadboard;
- 1 cabo USB (Tipo A-Tipo B);
- 1 Arduino Mega 2560;
- 1 botão de pressão;
- 1 cabo de áudio Jack de 2,5 mm;
- 4 cabos de ligação Jumper (Macho-Macho);
- 1 computador portátil (utilizado como fonte de alimentação do Arduino Mega).

A camara fotográfica utilizada (Canon® EOS 550D) dispõe de uma entrada para ligação de comando remoto de disparo. Através do método descrito previamente, foi possível projetar um sistema alternativo a esse comando remoto por forma a que uma fotografia fosse tirada automaticamente a cada 5 segundos. Começou-se por emitir um impulso digital de 5V. No Arduino, foi implementado o seguinte código (Figura 51):

```
#include <ezButton.h>      //Library for using the button

#define LOOP_STATE_STOPPED 0
#define LOOP_STATE_STARTED 1

ezButton button(7); // create ezButton object that attach to pin 7;
int loopState = LOOP_STATE_STOPPED;

// the setup function runs once when you press reset or power the board
void setup() {
    // initialize digital pin LED_BUILTIN as an output.
    pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT); // uses internal led to indicate a picture
    // has been taken
    pinMode(12, OUTPUT); // activates the opto-coupler

    button.setDebounceTime(50); // set debounce time to 50 milliseconds
}

// the loop function runs over and over again forever
void loop() {

    button.loop(); // MUST call the loop() function first
    if (button.isPressed()) {
        if (loopState == LOOP_STATE_STOPPED)
            loopState = LOOP_STATE_STARTED;
        else // if(loopState == LOOP_STATE_STARTED)
            loopState = LOOP_STATE_STOPPED;
    }
    if (loopState == LOOP_STATE_STARTED) {
        digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the
        // voltage level)
        digitalWrite(12, HIGH);
        delay(500); // wait for 500 ms
        digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW); // turn the LED off by making the
        // voltage LOW
        digitalWrite(12, LOW); // turn off the opto-coupler
        delay(4500); // wait for 4.5 s
    }
}
```

Figura 51 - Código do Arduino

O código funciona da seguinte forma:

- O Arduino é ligado à fonte de alimentação através de cabo USB;
- O botão de início (ligado ao pino 7 do Arduino) inicia a execução do código:
 - A variável inteira loopState é definida inicialmente como iniciando parada (LOOP_STATE_STOPPED);
 - Quando o botão (button) é pressionado, caso a loopState seja LOOP_STATE_STOPPED, passa a iniciada (LOOP_STATE_STARTED). Caso a loopState já tenha iniciado, o carregamento do botão terá o efeito oposto (LOOP_STATE_STOPPED).
- Quando o código se encontra com LOOP_STATE_STARTED:
 - O LED do Arduino é ligado (High), bem como também o sinal proveniente do pino 12;
 - Ao fim de 500 ms, tanto o LED do Arduino como o sinal do pino 12 são desligados;
 - Após o último passo, ocorre um compasso de espera de 4500 ms;
 - O processo descrito ocorre em *loop*, emitindo um sinal digital a cada 5 s (5000 ms) até ser desligado no botão ligado ao pino 7.

O esquema do intervalômetro encontra-se representado na Figura 52:

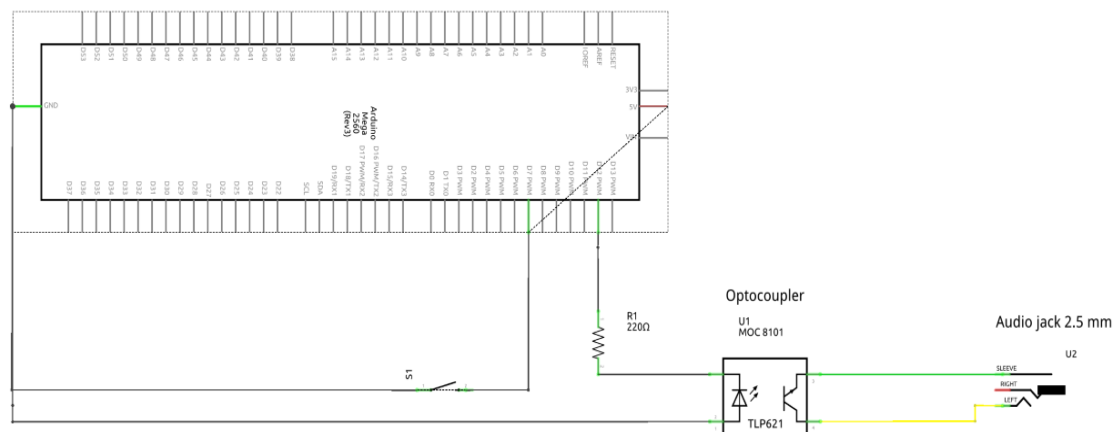


Figura 52 - Esquema do intervalômetro

É ligado um optoisolador VISHAY MOC 8101 ao sinal digital do pino 12. A saída digital do pino 12 do Arduino tem um valor de 5 V que alimenta o circuito de *input* do optoisolador. Em série, está ainda ligada uma resistência com um valor de 220 Ω, de forma a obter uma dissipação de potência aproximada de 100 mW (de acordo com a ficha técnica do optoisolador):

$$I = \frac{P}{U} (=) I = \frac{0,100}{5} (=) I = 0,02 \text{ A}, \quad (1)$$

$$I = R = \frac{U}{I} (=) R = \frac{5}{0,02} (=) R = 250 \sim 220 \Omega. \quad (2)$$

Este sinal de *input* do optoisolador resulta num sinal de *output* semelhante, mas eletricamente isolado e isento de ruído. O sinal de *output* do optoisolador é transmitido por um cabo de áudio Jack de 2,5 mm até à entrada para ligação de comando remoto de disparo da máquina fotográfica (Figura 53), forçando-a a tirar uma fotografia a cada 5 segundos de forma automática.



Figura 53 - Ligação do cabo Jack de 2,5 mm à entrada da ligação do comando

Os ensaios dos provetes ENF também são realizados na máquina Shimadzu AG-X 100 e à temperatura ambiente. No entanto, a configuração é diferente pois neste caso pretende-se fazer ensaios de flexão em três pontos, mantendo constante a velocidade de solicitação (2 mm/min), com o objetivo de obter os valores de $P-\delta$. A Figura 54 permite visualizar o *setup* do provete na máquina.

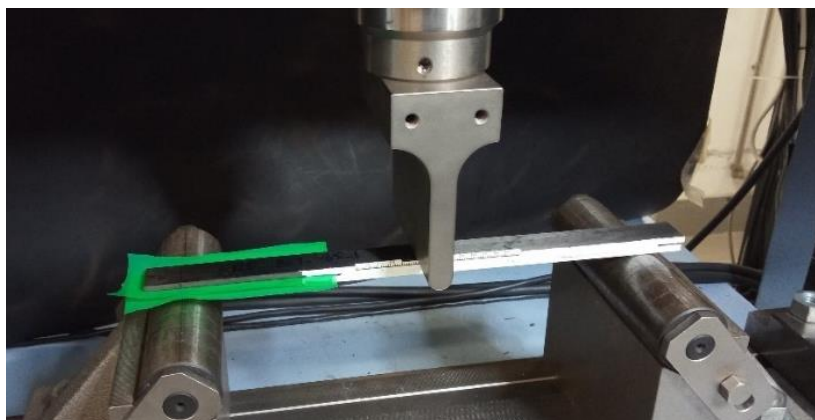


Figura 54 - Configuração do provete ENF na máquina Shimadzu AG-X 100

De maneira que o provete se deforme livremente enquanto é aplicada a carga, este é disposto em rolos de suporte (rolamentos), cuja rotação em torno de um veio fixo é feita sem atrito. Convém realçar que, durante o ensaio, é deveras importante assegurar que o provete esteja bem centrado e alinhado em relação ao cilindro que aplica a carga. Para tornar este passo mais fiável, é feita uma marca na face lateral dos provetes para posicionar corretamente o provete. Após a devida colocação do provete nos cilindros, procede-se ao posicionamento da máquina fotográfica, de forma a registar as imagens da propagação da fenda.

3.1.3 Resultados

3.1.3.1 Ensaios DCB

Os resultados de G_{IC} obtidos através dos ensaios DCB, referentes ao adesivo SikaForce® 803, são apresentados neste capítulo. Para isso, recorreu-se a vários métodos, tais como *Compliance Calibration Method* (CCM), *Corrected Beam Theory* (CBT) e *Compliance-Based Beam Method* (CBBM). Por fim, é feita uma comparação dos diversos resultados de G_{IC} , consoante o método aplicado.

3.1.3.1.1 Determinação de G_{IC}

Para determinar G_{IC} , recorreu-se ao método CCM, que se baseia na equação de Irwin-Kies [74]

$$G_{IC} = \frac{p^2}{2b} \frac{dC}{da}, \quad (3)$$

em que P [N] corresponde à carga exercida, C [mm/N]= δ/P remete para a flexibilidade da amostra e b [mm] representa a largura. No caso de serem aplicados polinómios cúbicos ($C=C_3a^3 + C_2a^2 + C_1a + C_0$), que são bastante utilizados para o ajuste das curvas de flexibilidade $C=f(a)$, obtém-se [74]:

$$G_{IC} = \frac{p^2}{2b} (3C_3a^2 + 2C_2a + C_1). \quad (4)$$

Utilizando o método CBT, G_{IC} poder ser obtido por [74]:

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2b(a + |\Delta|)}. \quad (5)$$

Na extremidade da fenda, é registada a rotação dos aderentes, em que Δ corresponde ao fator de correção para o comprimento da fenda. Este fator determina-se através da regressão linear de $C^{1/3}=f(a)$. Assim, e com recurso a ensaios experimentais, neste caso de três provetes, é possível obter a regressão linear, para comprimentos de pré-fendas diferentes, como se observa na Figura 55 [75].

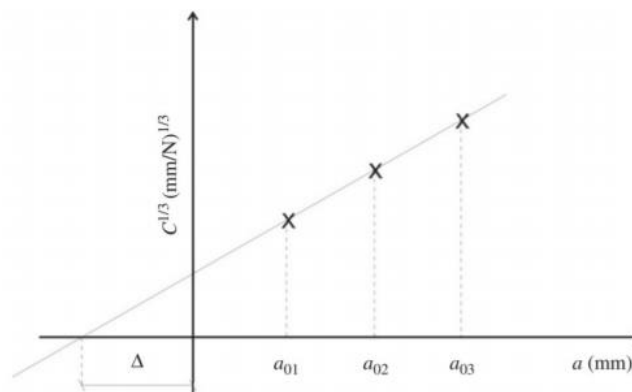


Figura 55 – Modo de correção do comprimento de fenda Δ [75]

Existe outro método (o qual foi utilizado) de forma a registar os efeitos de rotação, em que se recorre ao parâmetro Δ_I e segue a seguinte formulação [75]:

$$\Delta_I = h \sqrt{\frac{E}{11G} \left[3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \right]}, \quad (6)$$

em que:

$$\Gamma = 1,18 \frac{E}{G}. \quad (7)$$

Por último, tem-se em conta o método CBBM. De forma a obter G_{IC} , enquanto a fenda se propaga, é considerado um comprimento equivalente de fenda a_e . No caso dos adesivos dúcteis, é preciso ter também em consideração o efeito da Zona de Processo da Fratura (ZPF), que corresponde a uma zona de material com dano provocado por microdeformação plástica, microfissuração e demais, e que se encontra na extremidade da fenda (Figura 56) [74].

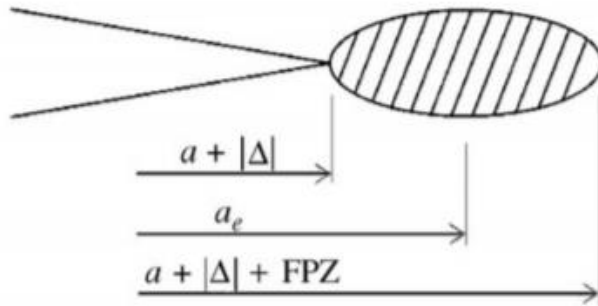


Figura 56 - Esquematização da FPZ e fenda equivalente [74]

O comprimento equivalente da fenda pode ser determinado através da seguinte fórmula [74]

$$a_e = a + |\Delta| + \Delta a_{FPZ}. \quad (8)$$

através da substituição de a por a_e na equação do Teorema de Castigliano, tem-se a seguinte equação [74]:

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{8Pa^3}{Ebh^3} + \frac{12Pa}{5bhG}, \quad (9)$$

considerando que

$$U = 2 \left[\int_0^a \frac{M_f^2}{2EI} dx + \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\tau^2}{2G} b dz dx \right] \quad (10)$$

e

$$\tau = \frac{3}{2} \frac{V}{bh} \left(1 - \frac{y^2}{c^2} \right), \quad (11)$$

Em que U consiste na energia de deformação provocada pelo esforço à flexão e corte dos braços do provete, M_f corresponde ao momento fletor e I ao momento de inércia. As variáveis V e c representam, respetivamente, a carga aplicada transversalmente nos braços e metade da espessura de cada braço. Neste método é tido em conta um módulo de flexão equivalente representado por E_f . O módulo obtém-se com recurso à equação (9), supondo C_0 como a flexibilidade inicial do provete [74]

$$E_f = \left(C_0 - \frac{12(a_0 + |\Delta|)^{-1}}{5bhG} \right) \frac{8(a_0 + |\Delta|)}{bh^3}. \quad (12)$$

Tendo por base a equação (3), G_{IC} pode ser obtido pela equação (13)

$$G_{IC} = \frac{6p^2}{b^2h} \left(\frac{2a_e^2}{h^2E_f} + \frac{1}{5G} \right). \quad (13)$$

3.1.3.1.2 Curvas P - δ

A Figura 57 contém as curvas P - δ dos ensaios DCB, adquiridas através da realização dos ensaios e com recurso ao adesivo SikaForce® 803, contendo os dados para cada concentração de fibra de vidro, isto é, 0%, 0,15%, 0,35% e 0,55%. Como se pode constatar, quase todas as curvas P - δ apresentam o mesmo comportamento global, com as devidas diferenças, quanto aos valores de P atingidos, na medida em que exibem três etapas distintas. Convém referir que os provetes C015_1 e C055_2 têm comportamentos diferentes dos restantes provetes pois, demonstram quedas abruptas de P durante a propagação da fenda, o que pode ser indicativo de propagação instável da fenda. Todavia, além dos provetes mencionados conterem zonas de propagação estáveis, também exibem boa repetibilidade no que se refere aos valores de G_{IC} obtidos e, por isso, são ambos incluídos no âmbito da determinação do mesmo parâmetro.

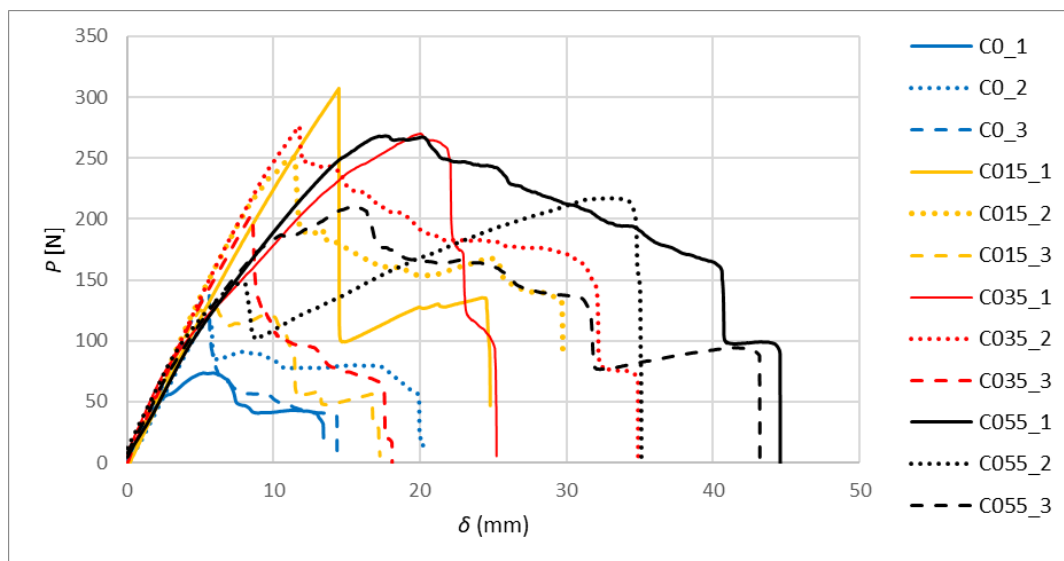


Figura 57 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios DCB com adesivo SikaForce® 803 e 0%, 0,15%, 0,35% e 0,55% de fibra de vidro

Contudo, nem todos os provetes foram considerados para determinar G_{IC} . O provete C_015_3 tem uma rigidez bastante distinta, com uma força aplicada inferior a 300% dos restantes provetes com concentração de 0,15%, além de registar um $\delta_{m\acute{a}x}$ bastante inferior. Quanto à série da concentração de 0,35%, foi descartado o provete C_035_3 por ter sofrido uma rotura adesiva, o que afetou G_{IC} , além do mesmo representar uma disparidade bastante elevada em relação aos provetes da mesma série. Por último, o provete C_055_3 também não foi tido em conta devido à notável disparidade de resultados em relação aos restantes provetes da sua classe.

Através da observação da Figura 57, é possível notar que os provetes atingem diferentes patamares de $P_{m\acute{a}x}$ e $\delta_{m\acute{a}x}$ para cada concentração de fibra de vidro. Os provetes com 0,55% de fibra de vidro foram os que alcançaram o maior valor de P , com uma força máxima próxima de 265 N, enquanto os provetes com a concentração de 0% de fibra de vidro registaram os valores mais baixos de $\delta_{m\acute{a}x}$.

Desde a Figura 58 até à Figura 61 observa-se a evolução da curva P - δ para cada concentração de vidro.

A Figura 58 demonstra um declive inicial muito semelhante para os três provetes, o que indica uma rigidez idêntica, embora exibam comportamentos diferentes posteriormente. O provete C0_3 atinge o $P_{m\acute{a}x}$, sendo este cerca de 140 N, enquanto o C0_2 abrange aproximadamente 120 N, sendo que ambos os provetes mencionados têm $\delta P_{m\acute{a}x}$ muito idênticos, contrariamente ao $\delta_{m\acute{a}x}$. O provete C0_1 tem uma discrepância deveras elevada em relação aos remanescentes, com um $P_{m\acute{a}x}$ muito inferior à restante série, conjuntamente com o $\delta P_{m\acute{a}x}$.

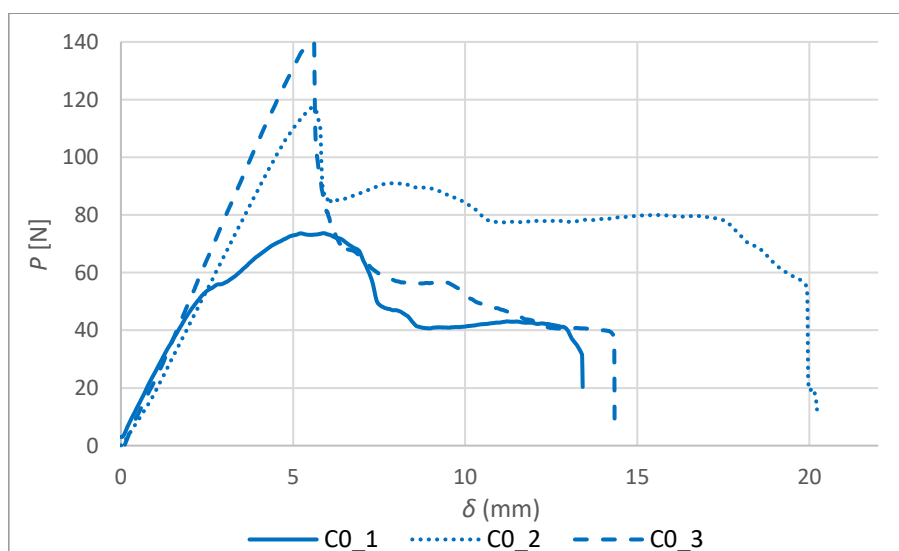


Figura 58 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios DCB com 0% de concentração de fibra de vidro

Como acontece com a série mencionada anteriormente, também os provetes da concentração de 0,15% de fibra de vidro (Figura 59) têm um declive inicial algo similar. O provete C015_1 atinge o maior $P_{m\acute{a}x}$ desta série. Contudo, sofre uma queda abrupta logo de seguida, fazendo com a fenda se propague de forma muito instável.

Pelo contrário, o C015_2 alcança um P de 250 N, e de seguida principia a propagação do dano, sendo este mais estável e atingido um $\delta_{\text{máx}}$ próximo de 30 mm. Por último, o C015_3 regista os valores mais baixos da série, com um $P_{\text{máx}}$ e $\delta_{\text{máx}}$ a rondar os 125 N e 17 mm, respetivamente.

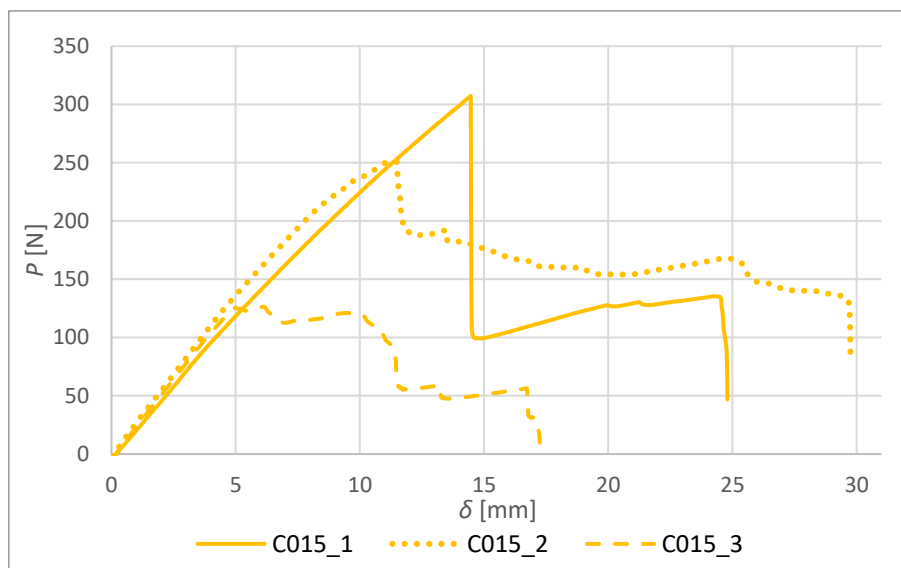


Figura 59 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios DCB com 0,15% de concentração de fibra de vidro

Recorrendo à Figura 60, constata-se que o provete C035_1 atinge o $P_{\text{máx}}$ mais tarde do que os restantes provetes, resultando, por consequência, no $\delta P_{\text{máx}}$ mais elevado da sua série. Regista um $P_{\text{máx}}$ muito idêntico ao do provete C035_2 (cerca de 260 N), embora este último tenha obtido um $\delta_{\text{máx}}$ muito maior, na ordem dos 35 mm. Por último, o C035_3 corresponde ao provete que regista menores valores de $P_{\text{máx}}$, $\delta P_{\text{máx}}$ e $\delta_{\text{máx}}$, sendo estes 203 N, 8,6 mm e 18,1 mm, respetivamente.

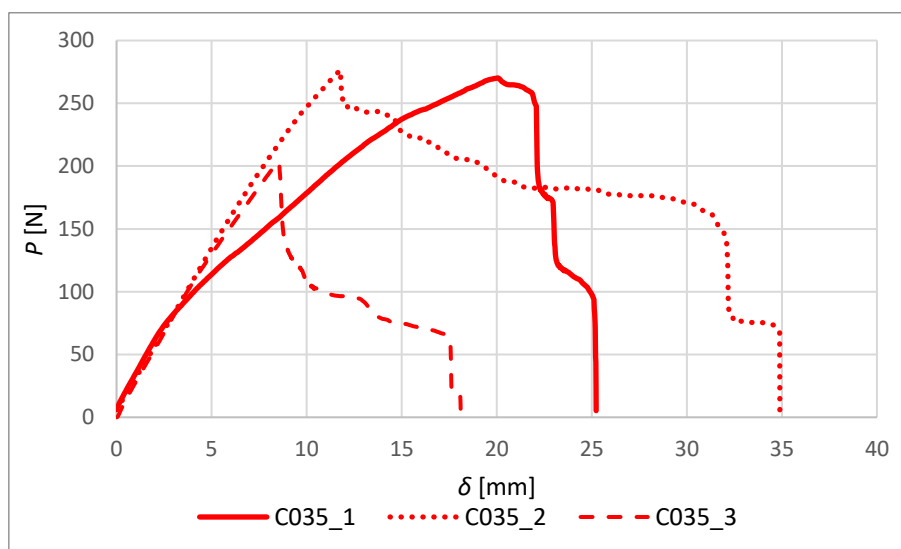


Figura 60 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios DCB com 0,35% de concentração de fibra de vidro

A Figura 61 contém os provetes da concentração de 0,55% de fibra de vidro, sendo que o C055_1 é o provete que regista maior valor de P e δ , na ordem dos 267 N e 44,6 mm, respetivamente. O C055_2 exibe uma curva P - δ , algo inusitada, pois ocorre uma cedência muito cedo no ensaio, e de seguida, a carga aplicada volta a aumentar, culminando numa rotura total abrupta. É possível que o material tenha escorregado nas maxilas da máquina de provetes. O provete C055_3 regista valores intermédios da sua série, com cerca de $P_{\text{máx}}$ de 210 N, 15 mm de $\delta P_{\text{máx}}$ e 43 mm de $\delta_{\text{máx}}$.

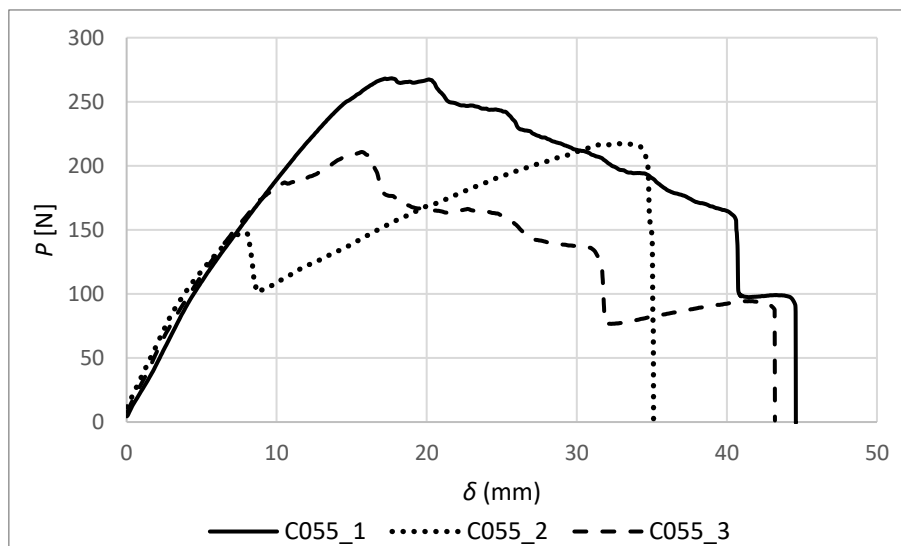


Figura 61 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios DCB com 55% de concentração de fibra de vidro

3.1.3.1.3 Resultados obtidos

Neste subcapítulo e desde a Figura 62 até à Figura 65, são apresentadas as curvas- R com um exemplo de provete para cada concentração após tratamento de dados.

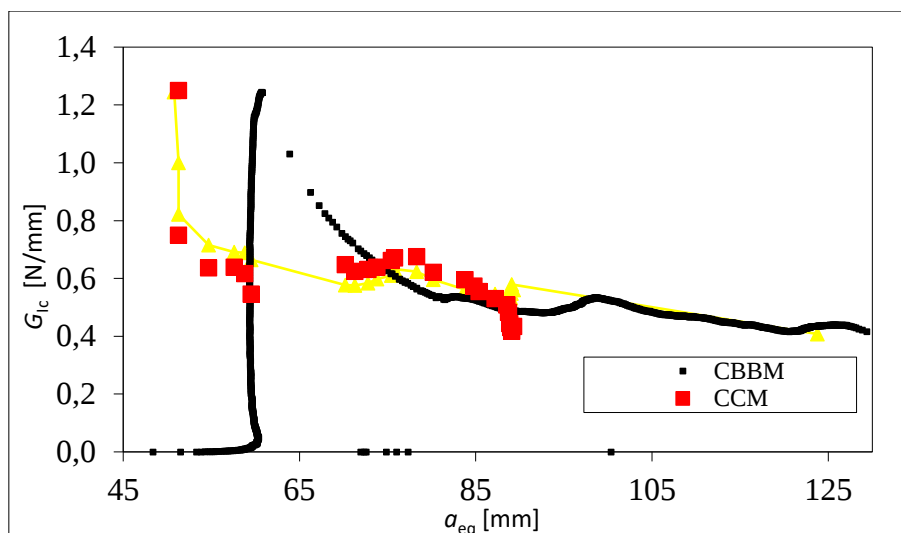


Figura 62 - Curva- R do provete DCB C0_3

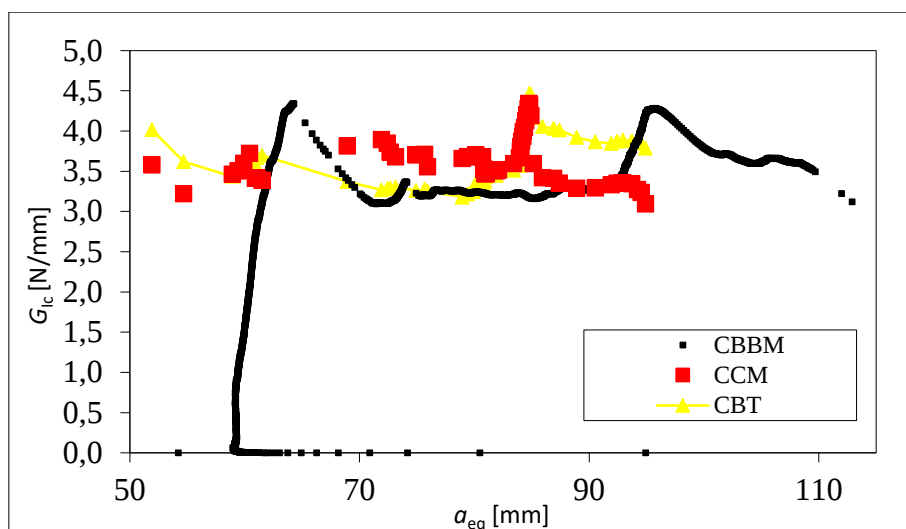


Figura 63 - Curva-R do provete DCB C015_2

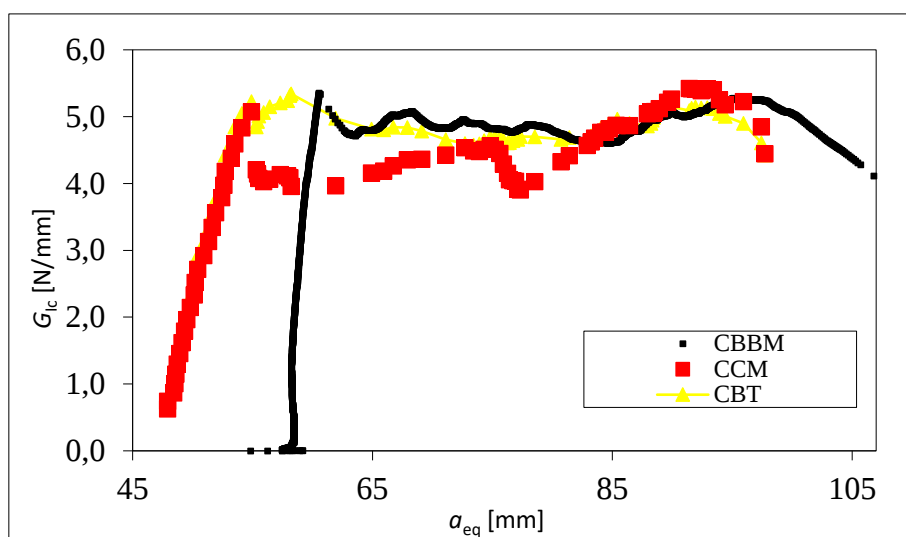


Figura 64 - Curva-R do provete DCB C035_2

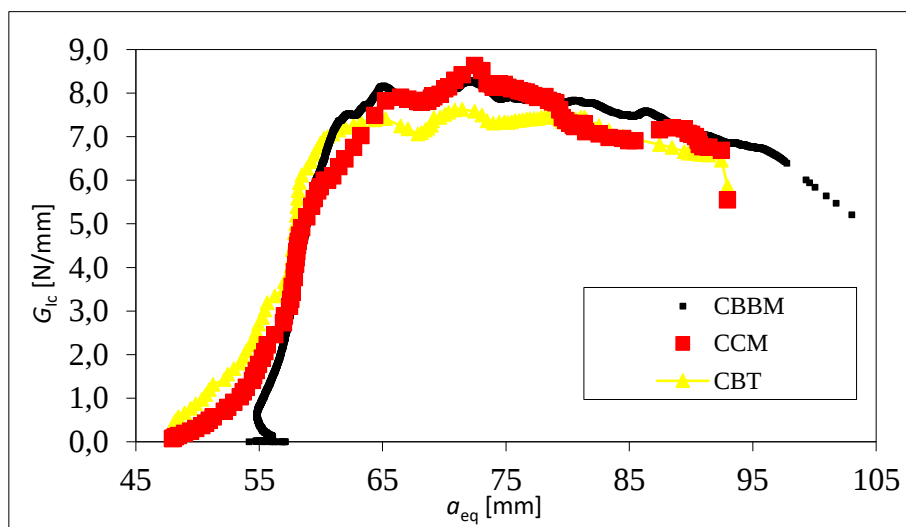


Figura 65 - Curva-R do provete DCB C055_1

3.1.3.1.4 Análise de resultados

No cômputo geral, a observação das curvas $P-\delta$ permite aferir que quase todas as curvas apresentam comportamentos semelhantes, mediante também a concentração de fibra de vidro. Como já mencionado, as curvas $P-\delta$ são compostas por três etapas distintas. Na primeira etapa, os provetes exibem um comportamento estável e ascendente, uma vez que a curva $P-\delta$ regista uma evolução linear que pode ser associada a um comportamento elástico. Na segunda etapa cessa o regime elástico e dá-se um processo de deformação irreversível no adesivo (ZPF). Esta zona indica uma perda de linearidade quando a curva está perto de atingir o $P_{máx}$, que por sua vez corresponde ao $\delta P_{máx}$. Por conseguinte, a energia armazenada no provete adquire o seu valor crítico (G_{IC}) na proximidade de $P_{máx}$, resultando no início de propagação da pré-fenda. Após $P_{máx}$ ter sido alcançado, dá-se início à terceira etapa, na qual a fenda atravessa uma fase de propagação estável e a força diminui gradualmente. A etapa termina com a rotura total do provete, notória pela queda abrupta de P .

É possível afirmar que as curvas- R selecionadas para representar o adesivo SikaForce® 803 têm valores iniciais de α diferentes em função do método utilizado (CBBM, CBT ou CCM), pois o método CBBM tem em conta o efeito ZPF. Quanto aos métodos CCM e CBT, estes requerem a medição de α , o que prolonga o tempo de análise do processo. A análise realizada através do método CCM pode tornar-se mais difícil e propensa a erros, devido ao processo de ajuste por polinómios e respetiva derivação.

Através da análise da Tabela 11 à Tabela 14, é evidente uma tendência crescente dos valores obtidos para G_{IC} , em função do aumento da concentração da fibra de vidro. O provete C035_1 é o mais consistente em termos de valores através dos três métodos. Por outro lado, o provete C055_1 é o que apresenta a maior discrepância entre todos.

Tabela 11 - Valores de G_{IC} com 0% de concentração de fibra de vidro

Concentração/Proвете	G_{IC} [N/mm]		
	CCM	CBT	CBBM
CO_1	0,5589	0,5574	0,5564
CO_2	0,7944	0,7873	0,7987
CO_3	0,7020	0,7057	0,7087
Média	0,6851	0,6835	0,6879
Desvio Padrão	0,1186	0,1166	0,1224

Tabela 12 - Valores de G_{IC} com 0,15% de concentração de fibra de vidro

Concentração/Provete	G_{IC} [N/mm]		
	CCM	CBT	CBBM
C015_1	3,2310	3,2872	3,2988
C015_2	3,3328	3,2961	3,3069
C015_3	Anulado		
Média	3,2819	3,2917	3,3029
Desvio Padrão	0,07196	0,0063	0,0057

Tabela 13 - Valores de G_{IC} com 0,35% de concentração de fibra de vidro

Concentração/Provete	G_{IC} [N/mm]		
	CCM	CBT	CBBM
C035_1	6,0110	6,0126	6,0131
C035_2	5,2974	5,2992	5,3050
C035_3	Anulado		
Média	5,6542	5,6559	5,6591
Desvio Padrão	0,5046	0,5044	0,5007

Tabela 14 - Valores de G_{IC} com 0,55% de concentração de fibra de vidro

Concentração/Provete	G_{IC} [N/mm]		
	CCM	CBT	CBBM
C055_1	7,8330	7,4166	7,8865
C055_2	7,8020	7,5346	7,7594
C055_3	Anulado		
Média	7,8175	7,4756	7,8230
Desvio Padrão	0,02193	0,08347	0,08986

É possível conferir que existe uma elevada homogeneidade e coerência dos valores de G_{IC} obtidos para cada concentração de fibra de vidro, algo que é confirmado pelo facto de o desvio-padrão de cada série ser residual, atestando assim a boa execução e fiabilidade dos ensaios.

A Figura 66 mostra a tendência crescente de G_{IC} em função da concentração da fibra de vidro, com a mesma variável a aumentar cerca de 1100% entre a concentração de 0% e a de 0,55%. É possível concluir então que o reforço do carbono com fibra de vidro aumenta G_{IC} . Esta afirmação é apoiada por um estudo efetuado por Gholami et al., [76]. Gholami e seus pares concluíram que G_{IC} aumenta com o reforço da fibra de vidro até certo ponto, pois a adição da fibra em demasia também provocaria a diminuição do parâmetro em questão. É também possível perceber a consistência que existe entre os métodos em estudo, na medida em que apenas na concentração mais alta, é que existe alguma disparidade entre CCM e CBBM em relação com o método CBT. Em relação ao desvio padrão, este parâmetro é mais alto na série de 0,35% de fibra de vidro, embora mesmo assim se encontre dentro dos limites aceitáveis.

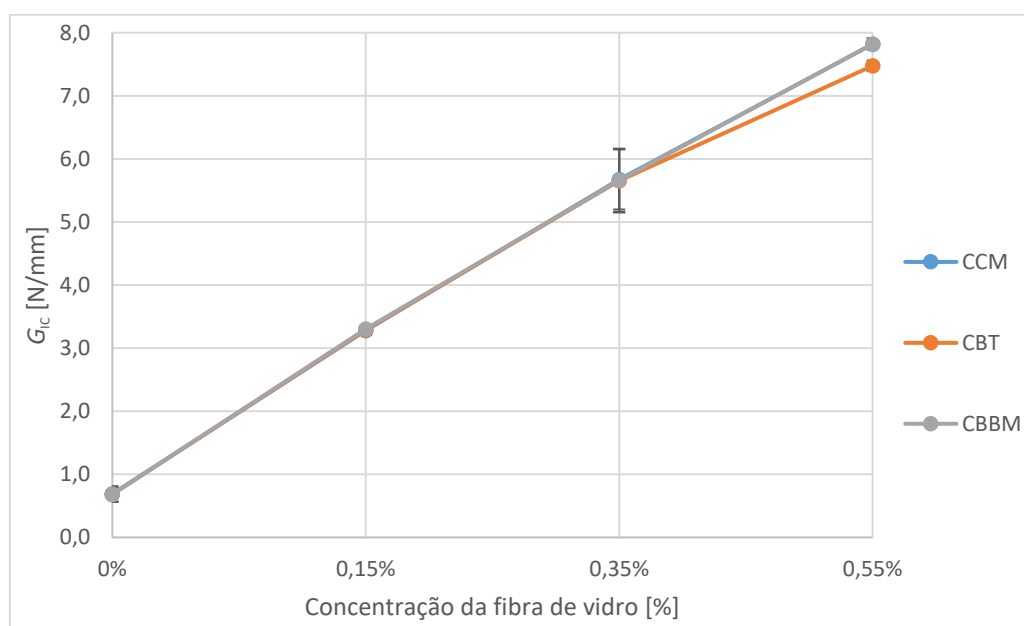


Figura 66 - Variação de G_{IC} através dos vários métodos em estudo

3.1.3.2 Ensaios ENF

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios ENF, mais especificamente as curvas $P-\delta$, os métodos para determinar G_{IIC} para o adesivo SikaForce® 803 com as diversas percentagens de fibra de vidro e a análise final dos resultados.

3.1.3.2.1 Determinação de G_{IIC}

Os métodos de determinação de G_{IIC} são algo semelhantes aos métodos para determinar G_{IC} , sendo que são necessários alguns ajustes, nomeadamente quanto à modificação do carregamento e às respetivas condições de apoio. A expressão seguinte permite determinar o parâmetro G_{IIC} para o método CCM [74]

$$G_{IIC} = \frac{P^2 dC}{2b da}. \quad (14)$$

De forma a ajustar as curvas de flexibilidade $C=f(a)$, utilizam-se polinómios cúbicos ($C=C_1a^3 + C_0$), o que permite formular a seguinte equação [74]:

$$G_{IIC} = \frac{3P^2 C_1 a^2}{2b}. \quad (15)$$

Relativamente ao ensaio ENF, o método CBT permite afirmar que [74]

$$G_{IIC} = \frac{9(a + 0,42\Delta_1)^2 P^2}{16b^2 h^3 E}, \quad (16)$$

em que Δ_1 corresponde à correção do comprimento da fenda para compensar a deformação por corte [74].

No caso do cálculo de G_{IIC} através do método CBBM recorre-se à teoria das vigas, que segue a seguinte fórmula:

$$C = \frac{3a^3 + 2L^3}{8Ebh^3} + \frac{3L}{10Gbh}. \quad (17)$$

Partindo da equação (17) e substituindo a flexibilidade inicial por C_0 e a por a_0 , é possível calcular o módulo de flexão

$$E_f = \frac{3a_0^3 + 2L^3}{8bh^3 C_{0corr}}, \quad (18)$$

sendo que C_{0corr} é dado por

$$C_{0corr} = C_0 - \frac{3L}{10Gbh}. \quad (19)$$

Através da combinação entre a equação (17) com a equação (18), e substituindo a por a_e , tem-se que:

$$a_e = a + \Delta a_{FPZ} = \left[\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} a_0^3 + \frac{2}{3} \left(\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1 \right) L^3 \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (20)$$

Recorrendo à equação (23), na qual se substitui C_0 por C , e aplicando a mesma mudança na equação (14), G_{IIC} pode ser dado por [74]

$$G_{IIC} = \frac{9P^2}{16b^2 E_f h^3} a_e^2. \quad (21)$$

3.1.3.2.2 Curvas $P-\delta$

As curvas $P-\delta$ foram obtidas através da realização dos ensaios ENF e, com a Figura 67 é possível observar as curvas referentes aos provetes ensaiados, utilizando o adesivo SikaForce® 803 e concentrações de fibra de vidro de 0%, 0,15%, 0,35% e 0,55%. As curvas demonstram quedas abruptas de P , embora estas não estejam relacionadas com uma possível fragilidade do adesivo. Durante a realização dos ensaios, indesejavelmente, o material compósito cedeu sempre primeiro, enquanto não ocorria propagação da fenda, na maior parte dos casos. Isto acontece devido ao adesivo ser muito dúctil.

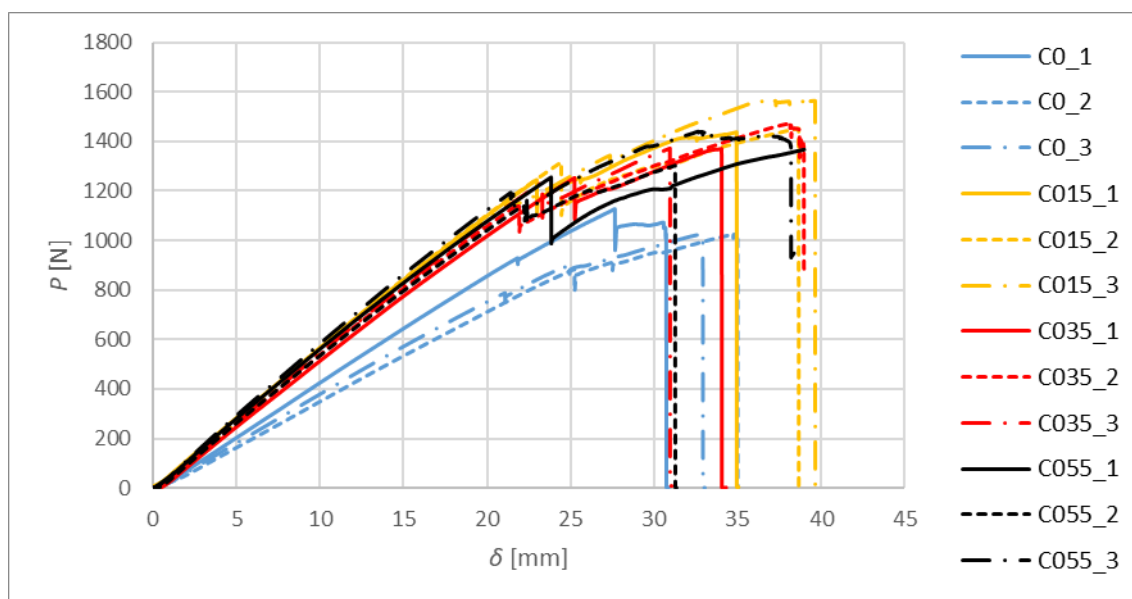


Figura 67 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios ENF com adesivo SikaForce® 803 e com 0%, 0,15%, 0,35% e 0,55% de fibra de vidro

As curvas P - δ da Figura 67 exibem um comportamento semelhante nas várias concentrações, sendo notório que as curvas da série de 0% são as que têm menor declive, sugerindo um menor módulo de elasticidade. Além disso, os provetes da série de 0% atingem os menores valores de P e δP em comparação com as restantes concentrações, sendo de realçar que as últimas exibem curvas bastante homogêneas e com declives semelhantes. Quanto a valores máximos, é o provete C015_3 a registar os maiores valores de P , δP e δ .

É possível observar o comportamento dos provetes individualmente diferentes para as concentrações em estudo, da Figura 68 até à Figura 71.

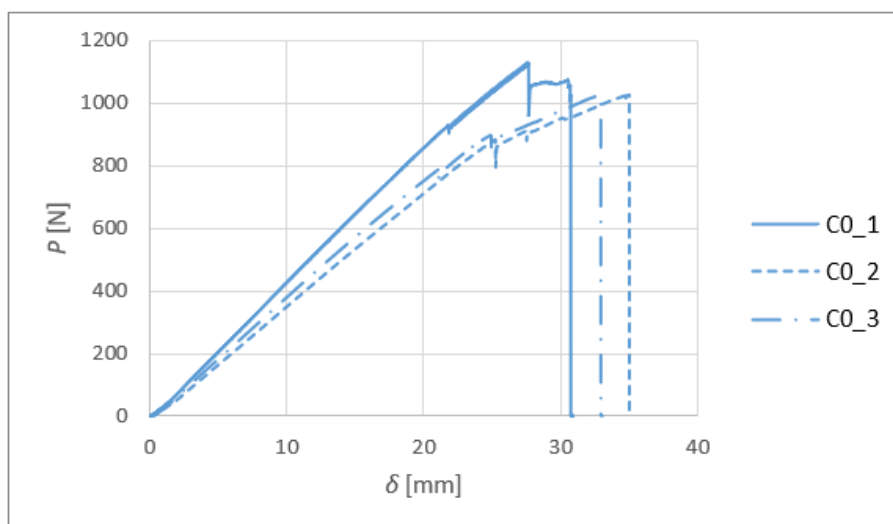


Figura 68 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios ENF com 0% de concentração de fibra de vidro

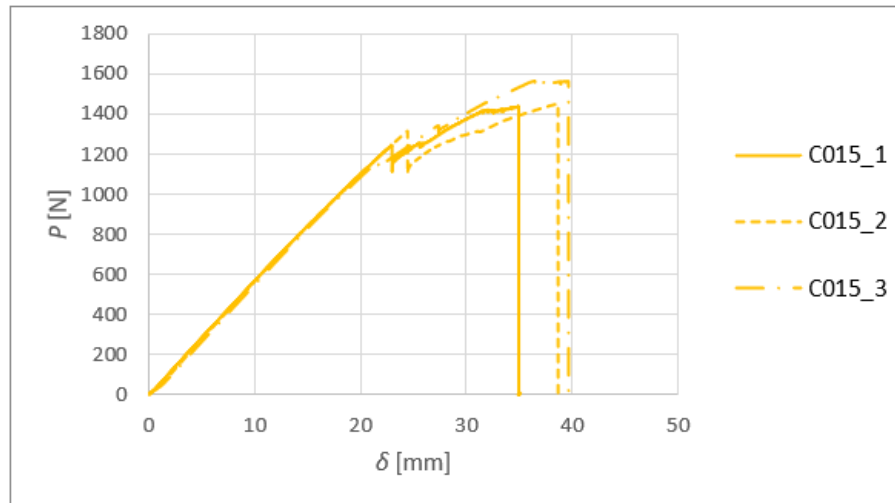


Figura 69 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios ENF com 0,15% de concentração de fibra de vidro

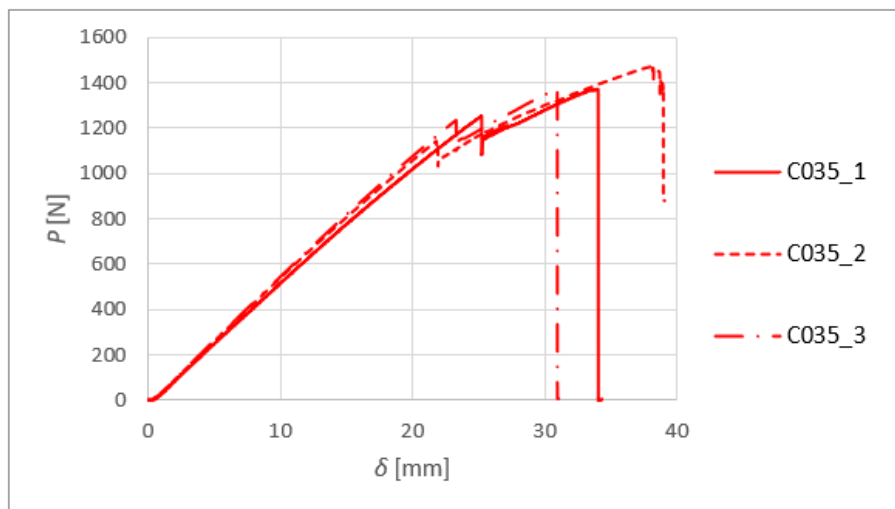


Figura 70 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios ENF com 0,35% de concentração de fibra de vidro

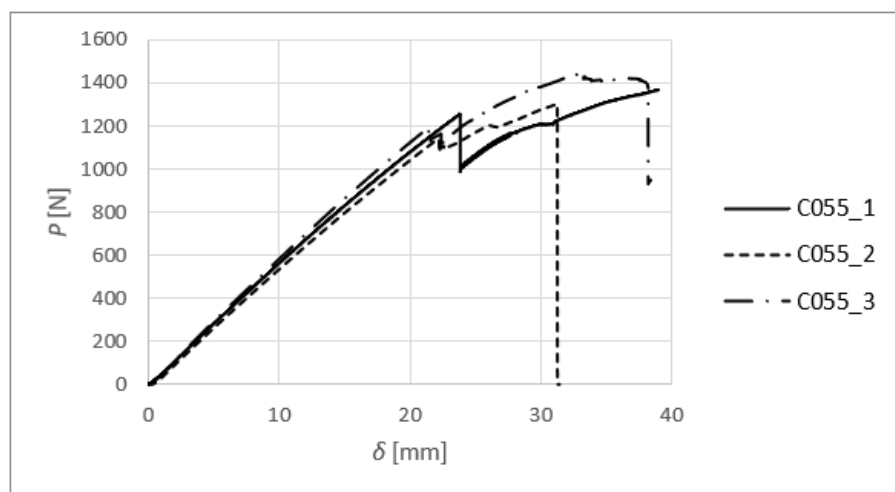


Figura 71 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios ENF com 0,55% de concentração de fibra de vidro

Após a realização dos ensaios concluiu-se que vários provetes teriam de ser descartados, uma vez que os mesmos quebraram sem que a fenda se tenha propagado, enquanto noutros ocorreu propagação sem dano visível nos aderentes. A Figura 72 e Figura 73 exemplificam um caso de ensaio não válido, correspondendo ao provete C0_1. Este provete cedeu precocemente durante o ensaio, altura em que aconteceu uma rotura parcial da fibra de carbono, apesar de a fenda ainda nem sequer tivesse começado a propagar. A máquina de ensaios resumiu o incremento da carga aplicada até que o provete rompeu por completo, sem que nunca tivesse existido qualquer propagação da fenda. Esta sequência de eventos aplica-se a todos os provetes invalidados. Do conjunto de provetes ENF testados, apenas foram considerados válidos os seguintes ensaios: C0_3; C015_2, C035_1, C055_1 e C055_3.



Figura 72 - Inexistência de propagação da fenda do provete ENF C0_1



Figura 73 - Rotura total do provete ENF C0_1

A Figura 74 exemplifica um provete em que existe propagação da fenda, sendo este passível de ser utilizado para determinar G_{IIC} .

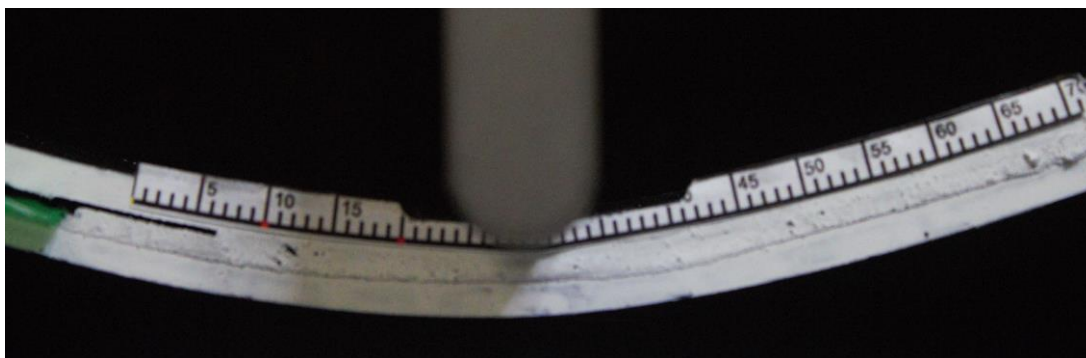


Figura 74 – Propagação da fenda do provete ENF C035_1

3.1.3.2.3 Resultados obtidos

Através das curvas- R , ou curvas de resistência, é determinado G_{IIC} , como valor teoricamente constante de G_I durante a propagação da fenda.

Neste subcapítulo, apresentam-se as curvas de provetes relativas aos métodos utilizados que estes à medição de a (DBT, CBT e CCM), e o método CBBM, que se baseia no comprimento de fenda equivalente. As curvas também são relativas às várias concentrações de fibra de vidro, nomeadamente 0%, 0,15%, 0,35% e 0,55%.

Assim, da Figura 75 até à Figura 78, são apresentadas curvas- R representativas de cada concentração de fibra de vidro.

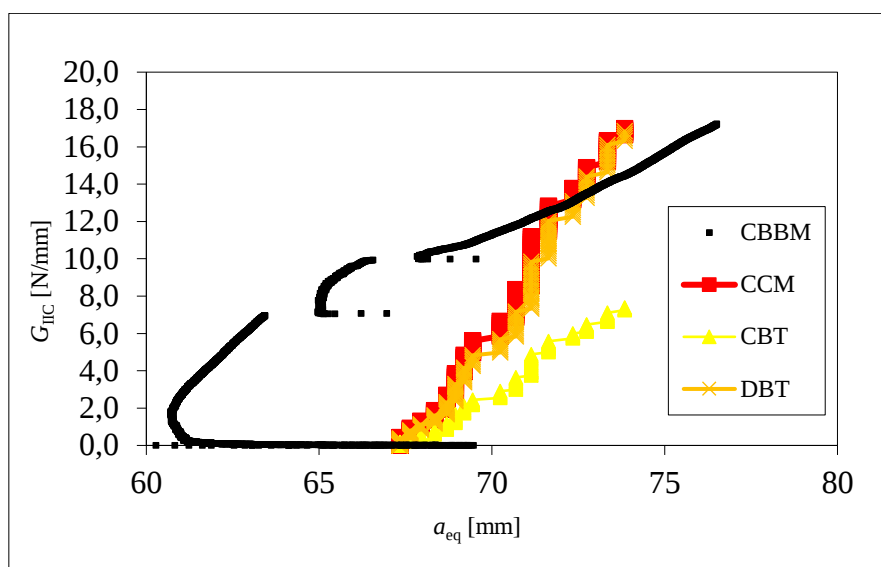


Figura 75 - Curva- R do provete ENF C0_3

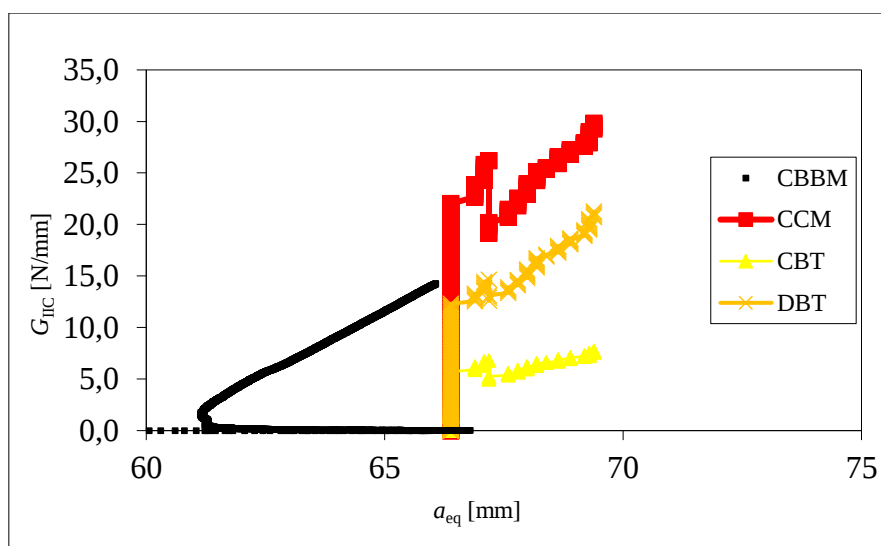


Figura 76 - Curva- R do provete ENF C015_2

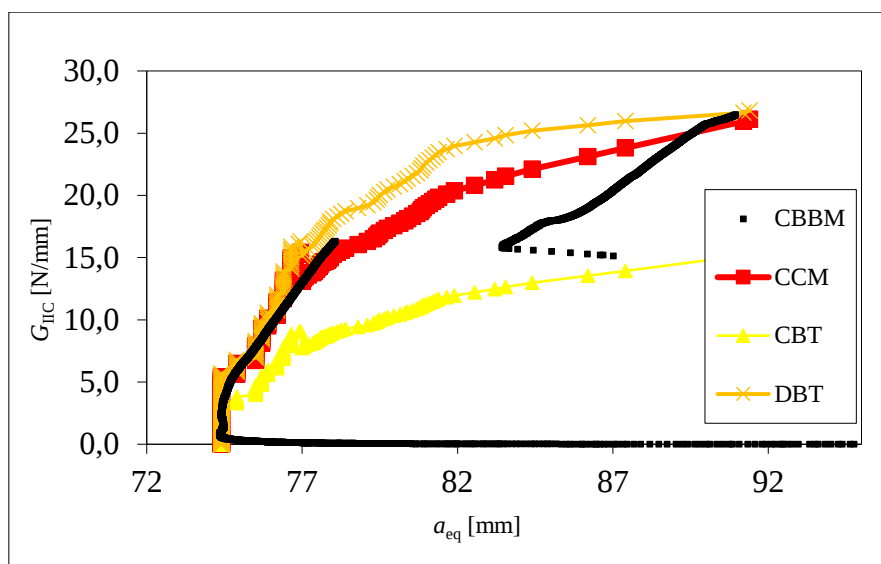


Figura 77 - Curva-R do provete ENF C035_1

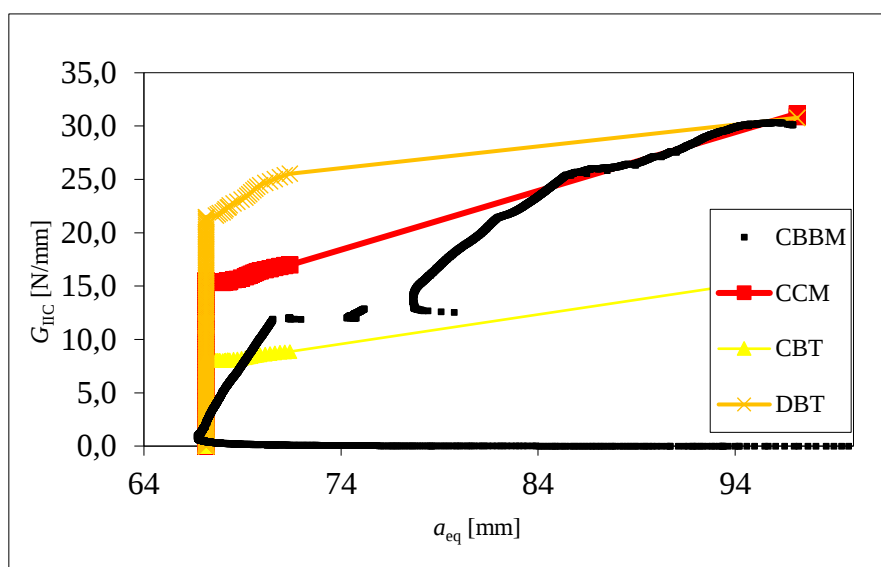


Figura 78 - Curva-R do provete ENF C055_3

3.1.3.2.4 Análise de resultados

As curvas $P-\delta$ são muito semelhantes até $P_{máx}$ e, por isso, é possível generalizar o comportamento das mesmas até atingirem a mesma fase. Inicialmente, é notório o crescimento das curvas de forma constante e linear, correspondendo a um comportamento elástico reversível. Posteriormente, e por causa do adesivo selecionado ser mais dúctil do que o material dos aderentes (fibra de carbono), há uma cedência por parte deste último (caso dos provetes inválidos), ocorrendo um rompimento parcial das fibras. De seguida, a curva volta ao seu crescimento original, desta vez com uma menor inclinação e que cessa ligeiramente antes do ponto de carga máxima ($P_{máx}$). Para os provetes que não sofreram propagação da fenda dá-se o rompimento total do provete, terminando bruscamente o ensaio. Nos provetes em

que ocorre propagação da fenda, após atingirem o $P_{\text{máx}}$, sucede uma perda de linearidade que corresponde ao início de plastificação do adesivo.

Finalmente a carga aplicada cai abruptamente correspondendo à rotura total do provete. Em suma, os provetes em que houve rotura parcial ou total dos aderentes foram considerados inválidos. No caso dos ensaios considerados válidos, a fenda propagou-se durante um comprimento significativo sem causar dano visível nos aderentes, embora possa ter havido dano *a posteriori*.

Observando as curvas- R , referentes ao adesivo SikaForce® 803 e respetivas concentrações de fibra de vidro, confirma-se uma evolução semelhante de G_{IIC} para os métodos CBT, DBT e CCM, sendo que o primeiro regista valores inferiores e com elevadas discrepâncias em relação aos restantes, o que pode ser explicado pela ausência de contabilização dos efeitos de atrito [1]. Convém também referir que a curva- R do método CBBM se encontra deslocada para a direita, devido ao comprimento de fenda utilizado para a representar a curva ser a_{eq} , em detrimento de a . Assim, é contabilizada a contribuição da ZPF, que induz um valor mais elevado de a , afetando os resultados obtidos através do CBBM, além de justificar o facto de este exibir maiores valores em relação aos restantes métodos, como seria expectável.

Os valores de G_{IIC} dos ensaios aprovados, além da média e desvio padrão associados aos vários métodos, encontram-se descritos na Tabela 15 até Tabela 18.

Tabela 15 - Valores de G_{IIC} com 0% de concentração de fibra de vidro

Concentração/Provete	G_{IIC} [N/mm]			
	CCM	CBT	DBT	CBBM
CO_1	Anulado			
CO_2	Anulado			
CO_3	16,5896	7,2212	16,4927	16,7911
Média	16,5896	7,2212	16,4927	16,7911

Tabela 16 - Valores de G_{IIC} com 0,15% de concentração de fibra de vidro

Concentração/Provete	G_{IIC} [N/mm]			
	CCM	CBT	DBT	CBBM
C015_1	Anulado			
C015_2	25,3293	8,6995	25,7623	25,9669
C015_3	Anulado			
Média	25,3293	8,6995	25,7623	25,9669

Tabela 17 - Valores de G_{IIC} com 0,35% de concentração de fibra de vidro

Concentração/Provete	G_{IIC} [N/mm]			
	CCM	CBT	DBT	CBBM
C035_1	26,1354	13,3467	26,0496	26,2589
C035_2	Anulado			
C035_3	Anulado			
Média	26,1354	13,3467	26,0496	26,2589

Tabela 18 - Valores de G_{IIC} com 0,55% de concentração de fibra de vidro

Concentração/Provete	G_{IIC} [N/mm]			
	CCM	CBT	DBT	CBBM
C055_1	29,5296	11,7958	28,8384	31,4075
C055_2	Anulado			
C055_3	30,7740	15,8467	31,0273	30,2617
Média	30,2784	13,8212	29,8062	30,8346
Desvio Padrão	1,0590	2,8644	1,3687	0,8102

Através da análise das tabelas anteriores, é possível verificar um crescimento, embora muito ligeiro, dos valores obtidos entre a concentração de 0,15% para 0,35% de fibra de vidro, com apenas o método CBT a registar uma discrepância elevada. A classe de 0,55% é a que demonstra valores mais elevados de G_{IIC} , o que permite concluir que, entre as concentrações em estudo, quanto maior a percentagem de fibra de vidro adicionada, maior será a tenacidade ao corte do adesivo modificado.

A Figura 79 representa a tendência seguida pelos valores obtidos de G_{IIC} em função dos quatro métodos em estudo. Conclui-se que os provetes sem fibra de vidro são os que apresentam os valores mais baixos de G_{IIC} . Nas restantes concentrações, os valores aumentam de acordo com a concentração, embora exista uma discrepância ligeiríssima entre os valores da série 0,15% e 0,35% de fibra de vidro. Relativamente ao método CBT, este é o que apresenta maior variação do parâmetro em estudo. Nos restantes métodos, os valores são bastante homogêneos, o que ajuda a atestar a veracidade e robustez dos resultados obtidos.

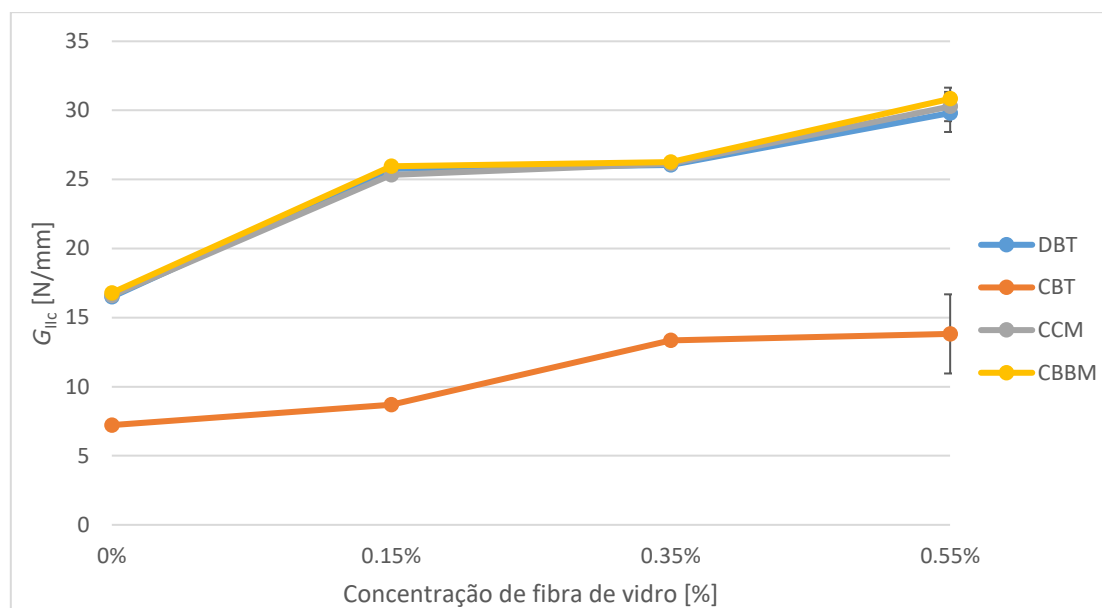


Figura 79 – Variação de G_{IIc} através dos vários métodos

3.2 Trabalho numérico

O principal objetivo do trabalho numérico consiste na reprodução dos resultados experimentais, previamente obtidos, através da aplicação das leis de dano coesivo. Importa que estas leis representem fielmente o comportamento do adesivo selecionado. Desta forma, as leis obtidas neste estudo podem ser aplicadas para a previsão da resistência das juntas adesivas e efeitos de projeto de estruturas com ligações adesivas. Com o recurso ao MEF, as simulações foram realizadas através do *software* Abaqus®. Posteriormente, é feita uma análise para aferir a sensibilidade dos parâmetros coesivos, com o objetivo de apurar o efeito que possam ter na variação das curvas $P-\delta$, tendo em conta as diferentes concentrações de vidro no adesivo.

3.2.1 Pré-processamento dos modelos

A análise numérica dos provetes em estudo, DCB e ENF, foi realizada com recurso ao *software* Abaqus®. Para cada provete, e em função das dimensões obtidas experimentalmente, foram produzidos modelos numéricos específicos. Partiu-se de uma configuração de modelos dos provetes em 2D, e em Estado Plano de Deformação (EPD), uma vez que esta é a condição mais conveniente para a geometria dos provetes em estudo, devido à largura da junta ser de dimensão considerável [77]. Os aderentes foram modelados como um material ortotrópico considerando elementos contínuos (CPE4 do Abaqus®). A representação da camada de adesivo foi feita considerando apenas um elemento ao longo da espessura do adesivo (COH2D4 do Abaqus®). Foram introduzidas as propriedades dos materiais utilizados e configuradas as condições fronteira e ligações de contacto, assim como as cargas, de forma a garantir os resultados mais próximos da realidade possível.

Para a simulação de rotura com elevada precisão, foi configurado um maior refinamento da malha em zonas com um maior gradiente de tensões e na região do adesivo durante a propagação do dano. Em zonas correspondentes à pré-fenda e em regiões excedentes dos limites de análise, foi considerada uma malha mais grosseira.

Através da variabilidade do número de elementos ao longo do provete e do efeito de gradação da dimensão da malha (efeito *bias*), foi possível reduzir o tempo de computação para obtenção dos resultados, pois o esforço computacional acabou por ser menor. Contudo, convém salientar que esta variação do refinamento da malha não pode comprometer a precisão dos resultados obtidos.

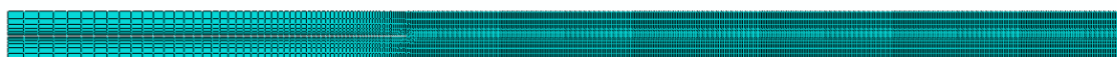


Figura 80 - Malha do provete DCB

Através da Figura 80 é possível observar que no adesivo e nas zonas adjacentes dos aderentes, a malha é mais fina, pois é nestas zonas que terá lugar a propagação do dano e onde se observam maiores variações de tensões.

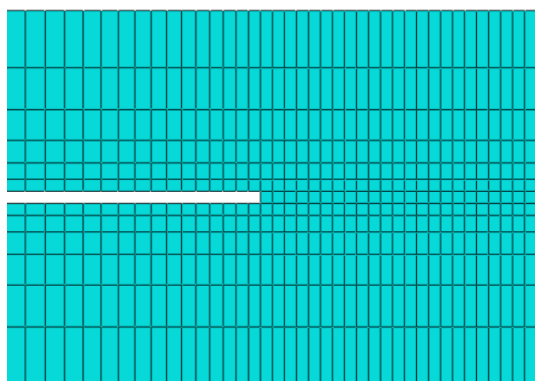


Figura 81 - Variação do refinamento da malha na zona da pré-fenda para o provete DCB

A Figura 81 representa a variação do refinamento da malha em torno da extremidade da pré-fenda, sendo visível o maior número de elementos junto desta zona.

A malha utilizada para os aderentes é uma malha constituída por quadriláteros. O facto de ser estruturada significa que a disposição dos elementos é feita com arestas horizontais e verticais. No adesivo, a malha estruturada é do tipo *sweep*, recomendada quando se trata de elementos coesivos, para modelar a propagação do dano.

Com a definição das sementes por tamanho invés de número, foi selecionado um tamanho mínimo de 0,2 mm e máximo de 0,5 mm em torno das zonas com maior gradiente de tensões. Para as restantes regiões, mais distantes do local onde o adesivo interage com os aderentes, configurou-se um tamanho do elemento mínimo de 0,2 mm e máximo de 2 mm. Para as arestas verticais do adesivo, foi configurado apenas um elemento finito, pois trata-se de um elemento coesivo.

Quanto às condições fronteira dos modelos DCB, estas consistiram em fixar um nó do aderente inferior na extremidade esquerda do provete. Além desta fixação, um nó do aderente superior, na mesma extremidade, foi restringido horizontalmente em simultâneo com a aplicação de um deslocamento vertical ascendente.

A Figura 82 mostra o refinamento de malha do provete ENF. Para os elementos da camada de adesivo e dos aderentes em contacto com o mesmo, foi definida uma dimensão de 0,2 mm.



Figura 82 - Malha do provete ENF

Uma vez que a zona da pré-fenda não está sujeita a uma considerável variação de tensões, a malha não é tão refinada. Com o objetivo de modelar a zona da ligação adesiva com maior precisão, foi configurada uma variação gradual da dimensão dos elementos (efeito *bias*), havendo um maior refinamento ao longo do comprimento dos aderentes. O mesmo efeito (*bias*) também se aplica nas faces horizontais exteriores dos aderentes, de maneira a aumentar a precisão quando os cilindros de suporte estão em contacto com o carregamento aplicado nos aderentes. Desta forma, na zona de contacto do provete com os cilindros, os elementos têm uma dimensão de 0,05 mm. A Figura 83 demonstra o maior refinamento da malha quando o provete entra em contacto com os cilindros de suporte (a) e de carregamento (b). Na Figura 83 (b), pode observar-se um refinamento distinto à esquerda e direita da zona central mais refinada, correspondente à zona do punção. Estas zonas correspondem, respetivamente, à zona útil de propagação de dano, com elementos de 0,2 mm de comprimento, e à zona não útil de propagação, uma vez que os limites de análise do ensaio já foram excedidos, com elementos de 0,5 mm de comprimento.

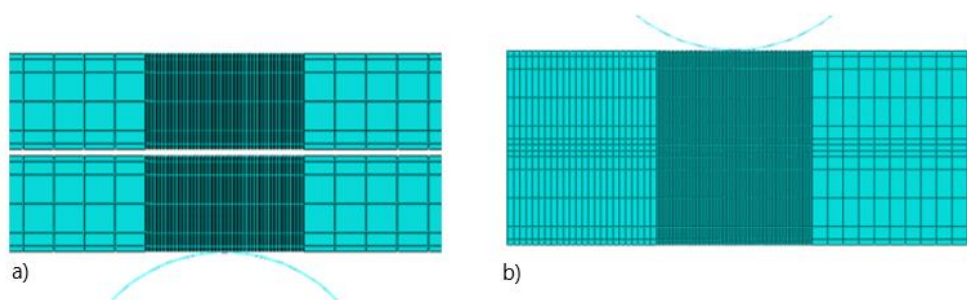


Figura 83 - Refinamento da malha ENF quando em contacto com os cilindros: a) cilindro de suporte e b) cilindro de carregamento

Em relação às condições fronteira para o modelo ENF, foi determinado que os cilindros de suporte seriam restringidos nos dois eixos e na rotação. Aplicou-se um deslocamento vertical no sentido descendente e uma restrição na direção horizontal do cilindro de carregamento. Com a finalidade de evitar o deslocamento horizontal do provete, restringiu-se horizontalmente um nó que se encontrava a meio do comprimento do provete na direção horizontal.

Por último, foi necessário aplicar as condições de contacto, de forma a garantir um deslizamento sem atrito, aquando da interação de cada um dos três cilindros com o provete, além dos aderentes na região da pré-fenda. A formulação utilizada foi do tipo *surface to surface* com um pequeno deslizamento, com dois comportamentos de contacto: tangencial sem fricção e normal do tipo *hard contact*.

3.2.2 Modelo de dano coesivo triangular

Ao longo do tempo foram criados e melhorados vários modelos de simulação por MDC, dos quais se podem destacar o trapezoidal [78], exponencial [79], polinomial [80], parabólico [81] e triangular [82]. Com estes modelos disponíveis, e dependendo da interface em simulação ou do material em questão, é possível seleccionar a lei coesiva mais adequada para a simulação a realizar, de maneira a alcançar os resultados mais precisos [83].

Ora, a lei utilizada neste trabalho consistiu na lei triangular (Figura 33), cujo modelo coesivo baseia em MEF de interface de 4 nós [84], são compatíveis com os elementos sólidos 2D de 8 nós do *software* Abaqus®. A lei pura pode ser caracterizada pelo facto de o dano se propagar num conjunto de nós homólogos, no momento em que os valores das tensões do respetivo modo são anulados na respetiva lei coesiva.

Previamente à ocorrência do dano, a relação entre tensão e deformação pode ser descrita pela matriz k_{COH} (22), que relaciona as variáveis mencionadas à tração e ao corte, através dos elementos coesivos. A matriz pode ser definida como:

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = k_{COH} \varepsilon. \quad (22)$$

A matriz inclui as variáveis de rigidez da ligação adesiva, em que a sua definição depende da formulação exercida. No caso de ser uma formulação local, esta pode ser usada para efeitos de simulação de fraturas com espessura nula, sendo que os parâmetros da matriz contêm valores muitíssimo elevados, com o intuito de não existirem deformações na estrutura estimuladas pela presença de elementos coesivos. nos quais os parâmetros da matriz possuem [85].

No caso de se tratar de uma formulação contínua de camadas finas, mais concretamente de ligações adesivas, obtém-se uma boa aproximação às variáveis de rigidez, supondo que:

$$K_{nn} = E, K_{ss} = G, K_{ns} = 0. \quad (23)$$

Com estes parâmetros considerados, o modelo reproduz fielmente a deformação da camada de adesivo [63]. Para a simulação de dano em modo misto, a definição do início do dano pode ser determinada através de vários critérios, sendo o critério quadrático de tensões um deles [86]. A expressão para este critério é a seguinte:

$$\left\{ \frac{t_n}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1. \quad (24)$$

Uma vez que $\sigma_{um,i}$ (Figura 33) seja atingido, inicia a degradação do elemento coesivo. A cisão completa de um par de nós é calculada por um critério linear energético, como é possível observar na equação (25), que depende dos valores de G_{IC} e G_{IIC} [87]

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (25)$$

Além da lei coesiva triangular, existem vários MDC, tais como o modelo linear parabólico, exponencial, polinomial e trapezoidal. Este último é usado para simulação do comportamento mecânico de camadas finas em adesivos dúcteis [7]. É possível estudar a propagação do dano ao longo da junta adesiva através deste método. Para isso, um dos parâmetros utilizados consiste na *stiffness degradation* (SDEG), sendo que esta variável sinaliza a degradação que um elemento coesivo está sujeito, variando entre 0 e 1. Se não existir dano no elemento, o valor é 0 e, caso ocorra rotura total, o valor será de 1. Assim, para os valores que SDEG possa assumir, é possível definir, percentualmente, o dano no adesivo. Caso o valor da variável esteja dentro dos limites indicados, significa que o adesivo está em processo de amaciamento [77].

3.2.3 Estudo do tamanho de malha

Foi realizado um estudo do tamanho mais ajustado, ou seja, que permita a obtenção de resultados precisos com o mínimo de esforço computacional da malha, previamente à simulação dos ensaios de fratura, com o objetivo de determinar qual o tamanho do elemento. Assim, foram considerados, separadamente, os modelos de ensaios DCB e ENF, utilizando apenas uma configuração do adesivo (0% de fibra de vidro). O estudo é baseado na análise dos parâmetros de $\delta_{m\acute{a}x}$, $P_{m\acute{a}x}$ e $\delta P_{m\acute{a}x}$, sendo que a largura do elemento no adesivo varia entre 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,0 mm.

3.2.3.1 Ensaio DCB

Neste subcapítulo constam os gráficos relativos aos resultados dos ensaios DCB, cujo comprimento dos elementos coesivos na direção horizontal malha varia entre 0,1 mm e 2 mm. A Figura 84 representa as curvas P - δ obtidas, através da variação do tamanho da malha. Desde logo, é possível distinguir a malha mais grosseira de todas as outras, uma vez que esta mostra um comportamento errático e com grandes oscilações, em que o respetivo valor de P aumenta e diminui várias vezes ao longo do ensaio. Também a curva com comprimento de elemento de 1 mm exibe um comportamento do ensaio algo semelhante, embora menos acentuado. Os restantes tamanhos da malha demonstram curvas mais estáveis e parecidas entre si, o que permite concluir que existem apenas ligeiras discrepâncias entre as mesmas.

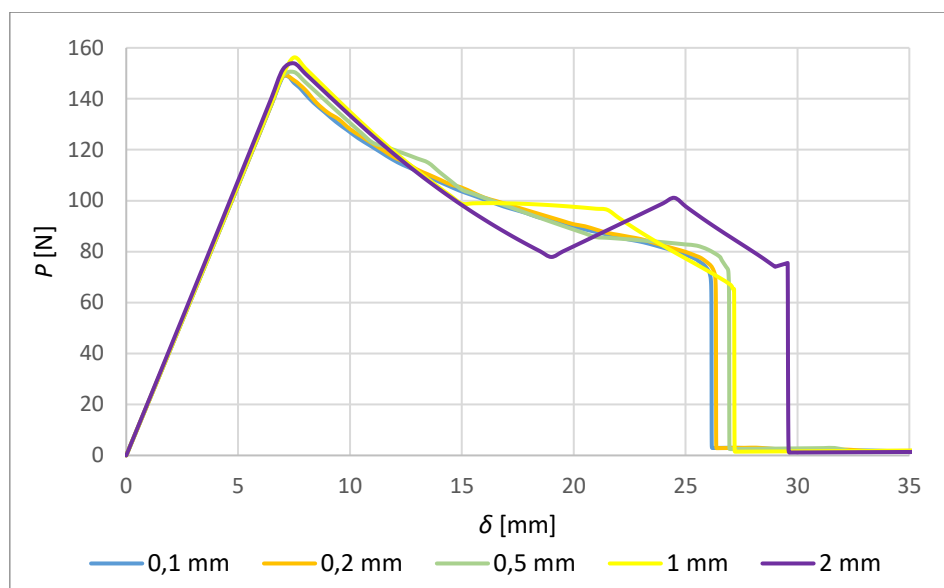


Figura 84 - Curvas P - δ obtidas no estudo de convergência de malha para o ensaio DCB

3.2.3.1.1 Resultados do parâmetro $P_{m\acute{a}x}$

A análise da Figura 85 permite concluir que, quanto maior o refinamento da malha, menor é o $P_{m\acute{a}x}$, exceto para o maior valor de dimensão da malha. Quando o tamanho do elemento toma valores entre 0,2 mm e 2 mm, o $P_{m\acute{a}x}$ varia bastante. Com valores abaixo de 0,2 mm, a curva estabiliza, pelo que se considera que o tamanho ideal seja este valor.

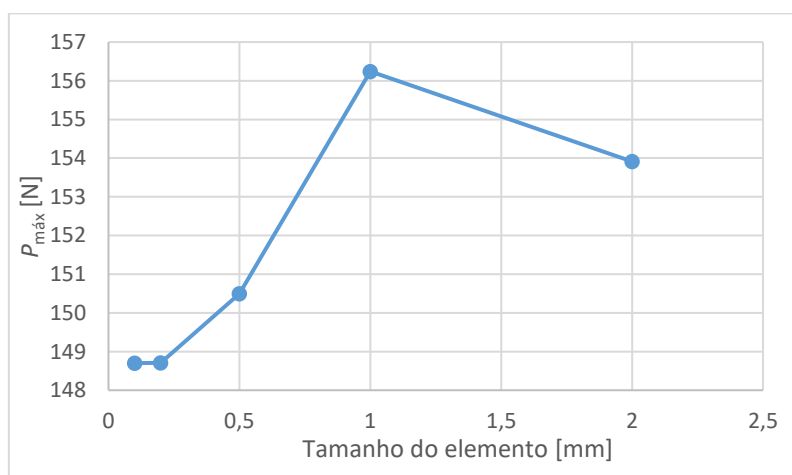


Figura 85 - Curva $P_{m\acute{a}x}$ obtida no estudo de convergência de malha para o ensaio DCB

3.2.3.1.2 Resultados do parâmetro $\delta P_{m\acute{a}x}$

Através da Figura 86, é possível observar, de imediato, uma estabilização do tamanho da malha entre 0,5 mm e 2 mm. Nas restantes dimensões da malha, existem discrepâncias assinaláveis, pelo que, neste parâmetro apenas, conclui-se que o tamanho da malha pode tomar o valor de 0,5 mm, 1 mm ou 2 mm.

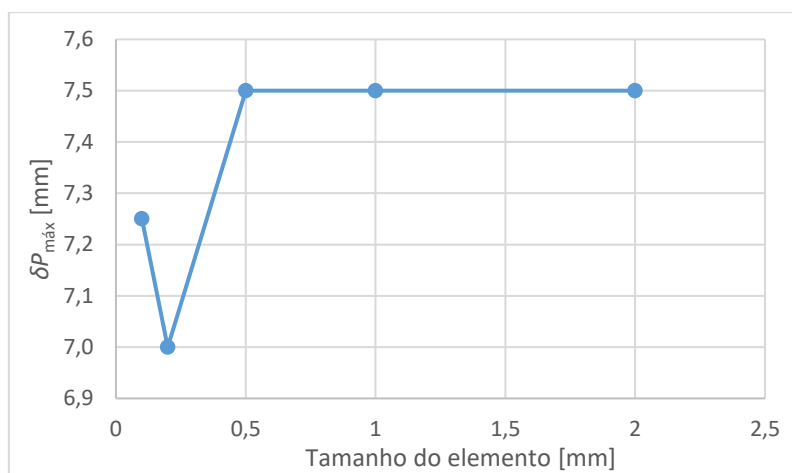


Figura 86 - Curva $\delta P_{\max}$ obtida no estudo de convergência de malha para o ensaio DCB

3.2.3.1.3 Resultados do parâmetro $\delta_{\max}$

A Figura 87 apresenta a variação do $\delta_{\max}$ em função do tamanho da malha. Verifica-se uma variação bastante acentuada, quando o tamanho da malha se encontra entre 1 mm e 2 mm. O mesmo acontece, embora com menor variação, quando o tamanho varia entre 0,1 mm e 0,5 mm, sendo os valores de $\delta_{\max}$ bem mais estáveis na região dos 0,5 mm e 1 mm.

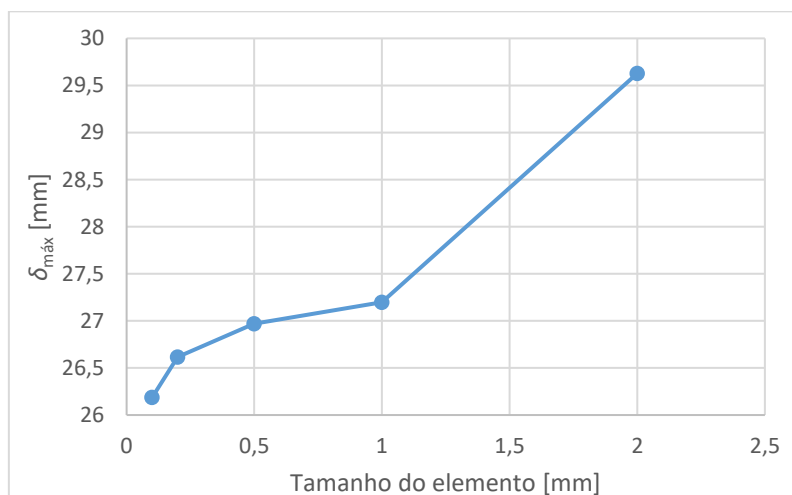


Figura 87 - Curva $\delta_{\max}$ obtida no estudo de convergência de malha para o ensaio DCB

3.2.3.1.4 Conclusão dos resultados obtidos

Após a obtenção das curvas $P_{\max}$, $\delta P_{\max}$ e $\delta_{\max}$ para os diversos tamanhos do elemento, é possível tirar as respectivas conclusões. Através dos resultados de $P_{\max}$ obtidos, pode-se concluir que a malha estabiliza quando a dimensão do elemento toma o valor de 0,2 mm. Assim, e tendo em conta apenas este parâmetro, selecionar-se-ia o valor de 0,2 mm, pois certamente exigiria um menor tempo computacional do que o elemento com 0,1 mm de tamanho. Todavia, é necessário ter em consideração as restantes variáveis.

A conclusão que se obtém a partir dos resultados de $\delta P_{\text{máx}}$ é de que a malha é estável para valores entre 0,5 mm, 1 mm ou 2 mm. Logo, e pela mesma razão de seleção mencionada anteriormente, escolher-se-ia o tamanho com valor de 0,5 mm, caso se focasse apenas no $\delta P_{\text{máx}}$. Por último, a análise da curva obtida para $\delta_{\text{máx}}$ revela uma certa estabilidade quando o elemento toma valores de 0,5 mm ou 1 mm. Com apenas os dois últimos critérios em foco, a lógica diria para se considerar o valor de 1 mm como o mais recomendável, pois obter-se-ia resultados com boa precisão, sem comprometer o tempo processual. Porém, e tendo em conta que $P_{\text{máx}}$ é estável para 0,2 mm, considera-se este último como valor final do tamanho do elemento.

3.2.3.2 Ensaio ENF

De seguida, apresentam-se os resultados obtidos para o estudo do tamanho do elemento da malha relativamente ao ensaio ENF, nas mesmas condições do ensaio DCB, ou seja, o comprimento dos elementos coesivos na direção horizontal da malha varia entre 0,1 mm e 2 mm. A Figura 88 contém as curvas P - δ obtidas para as várias dimensões do elemento. Ao contrário das curvas P - δ obtidas no estudo de convergência da malha do ensaio DCB, as curvas do ensaio ENF demonstram uma ligeira, ou quase nenhuma, diferença quanto à variação do refinamento da malha. Isto pode dever-se ao facto de este ensaio proporcionar um maior número de elementos coesivos durante a propagação do dano. A rigidez elástica mantém-se semelhante para as várias dimensões, porém diverge pouco antes de atingir $P_{\text{máx}}$ e $\delta P_{\text{máx}}$. De resto, nota-se uma predominância das cores relativas ao tamanho de 1 mm e 2 mm em relação às outras dimensões, sugerindo que as duas primeiras alcançam valores mais elevados de $P_{\text{máx}}$. Ao contrário do que sucede no ensaio DCB, no ensaio ENF o valor de $\delta_{\text{máx}}$ não tem significado, uma vez que P não atinge o valor zero.

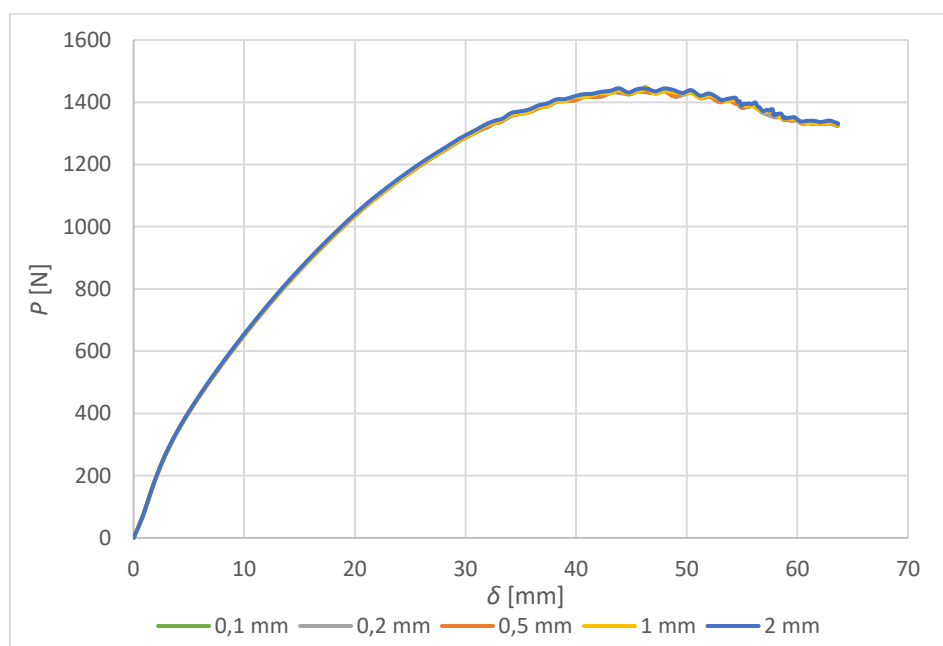


Figura 88 - Curvas P - δ obtidas no estudo de convergência de malha para o ensaio ENF

3.2.3.2.1 Resultados do parâmetro $P_{\text{máx}}$

A Figura 89 representa a variação de $P_{\text{máx}}$ em função do tamanho do elemento. Não existe elevada discrepância entre os vários refinamentos da malha, com cerca de 25 N a separar o valor mais elevado e o mais baixo de $P_{\text{máx}}$. Através da análise da curva, pode-se concluir que o valor ideal do tamanho do elemento seria 0,5 mm, pois é onde a curva começa a estabilizar, ao contrário da divergência evidenciada de $P_{\text{máx}}$ para 1 mm e 2 mm.

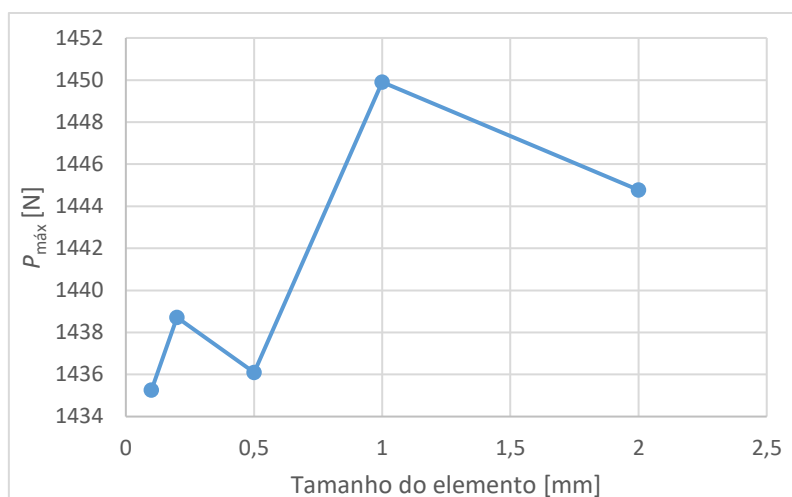


Figura 89 - Curva $P_{\text{máx}}$ obtida no estudo de convergência de malha para o ensaio ENF

3.2.3.2.2 Resultados do parâmetro $\delta P_{\text{máx}}$

Para o estudo da malha relativamente a $\delta P_{\text{máx}}$, exibe-se a Figura 90. Observando a figura, é notória a discrepância existente quando o tamanho do elemento varia entre 0,2 mm e 0,5 mm, além do intervalo entre 1 mm e 2 mm. De facto, a curva apenas estabiliza quando se encontra entre 0,5 mm e 1 mm. Devido a este pormenor, sugere-se que o tamanho ideal seja 0,5 mm. Desta maneira, garantem-se resultados com precisão, sem demasiado esforço computacional.

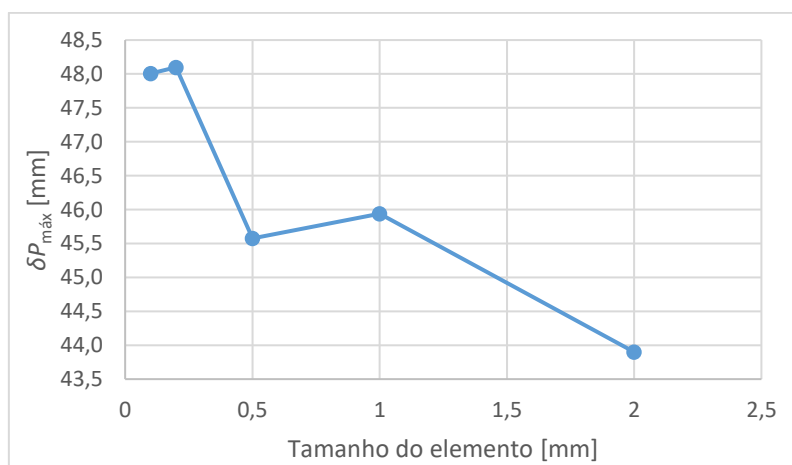


Figura 90 - Curva $\delta P_{\text{máx}}$ obtida no estudo de convergência de malha para o ensaio ENF

3.2.3.2.3 Conclusão dos resultados obtidos

Obtidas as curvas $P_{\text{máx}}$ e $\delta P_{\text{máx}}$ para o estudo de convergência da malha dos ensaios ENF, é possível tirar conclusões acerca do tamanho ideal do elemento coesivo da malha. As curvas de $P_{\text{máx}}$ ditam uma certa estabilização para dimensões do elemento inferiores a 0,5 mm, enquanto há demasiada divergência para valores superiores a este último. Assim, optar-se-ia pelo tamanho de 0,5 mm, com apenas este parâmetro em conta. Mudando o foco para as curvas de $\delta P_{\text{máx}}$, nota-se de imediato um patamar algo estável quando o elemento varia entre 0,5 mm e 1 mm. Assim, e mantendo a coerência da conclusão da curva $P_{\text{máx}}$, a seleção do tamanho do elemento recairia também em 0,5 mm. Assim sendo, e tendo em conta estes parâmetros, conclui-se que o tamanho ideal do elemento deve ser de 0,5 mm.

3.2.4 Validação das leis coesivas obtidas

A comparação das curvas P - δ numéricas e experimentais tem como objetivo a validação da lei coesiva, que neste caso corresponde à triangular, para a modelação da camada de adesivo, seja à tração ou ao corte. Mais especificamente, são analisados parâmetros tais como a t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} , G_{IIC} . Através da realização dos ensaios DCB e ENF, e para as várias concentrações de fibra de vidro, são estudadas as curvas P - δ .

Inseridos os parâmetros necessários para realizar a simulação numérica, dá-se início ao processo iterativo de forma a coincidir as curvas P - δ numéricas com as curvas experimentais. Finda a iteração e ajustadas as curvas P - δ , cria-se as respetivas leis coesivas triangulares. Assim, demonstram-se os resultados dos ensaios em causa, para o adesivo SikaForce® 803 e com as concentrações de fibra de vidro já conhecidas.

3.2.4.1 Ensaio DCB

Numa primeira instância são revelados os valores das variáveis obtidas experimentalmente e que servirão como dados de *input* para a modelação dos ensaios numéricos através do Abaqus®. Assim, a Tabela 19 descreve os valores influentes na modelação das curvas numéricas P - δ , cuja variação entre os provetes reside apenas em G_{IC} , sendo o G_{IIC} um valor de referência obtido experimental por ensaios ENF, mas sem influência nos resultados, uma vez que o ensaio DCB é um ensaio de tração pura. Importa referir que os valores das variáveis representadas na Tabela 19 correspondem à média dos três provetes em questão, com exceção de G_{IC} . Salienta-se também o facto de os valores de E e G terem sido sujeitos a uma incrementação, uma vez que não se consegue aplicar a lei coesiva triangular a um adesivo com uma rigidez tão diminuta (apenas 19 MPa) devido a $\delta_{u,i} < \delta_{o,i}$ (Figura 33).

Tabela 19 - Dados de entrada dos ensaios numéricos com 0% de concentração de fibra de vidro, para os provetes DCB do adesivo SikaForce® 803

Provete	E [MPa]	G [MPa]	t_n^0 [MPa]	t_s^0 [MPa]	G_{IC} [N/mm]	G_{IIC} [N/mm]
C0_1	100	38,46	7,95	4,84	0,56	16,79
C0_2	100	38,46	7,95	4,84	0,80	16,79
C0_3	100	38,46	7,95	4,84	0,69	16,79

Na Figura 91, Figura 92 e Figura 93 apresenta-se as curvas P - δ obtidas (experimentais e numéricas) após o processo de ajuste. De uma maneira geral, é possível observar muitas semelhanças entre as curvas P - δ numéricas e experimentais. Realça-se o facto de que, para os provetes C0_2 e C0_3, os resultados obtidos através dos ensaios numéricos exibirem uma rigidez elástica idêntica aos obtidos através dos ensaios experimentais, nomeadamente desde o início da aplicação da carga até quando a fenda se começa a propagar. Dos três parâmetros em estudo, o $P_{máx}$ é a variável cujos valores numéricos mais se aproximam dos experimentais, embora o $\delta P_{máx}$ também seja algo semelhante. O $\delta_{máx}$ contém a maior discrepância entre todos os parâmetros. A maior diferença observável entre as curvas numéricas e experimentais encontra-se na Figura 93, na qual o $\delta_{máx}$ se desvia bastante da curva numérica, devido à fenda se ter propagado de uma forma instável, e daí ter ocorrido uma queda abrupta de P .

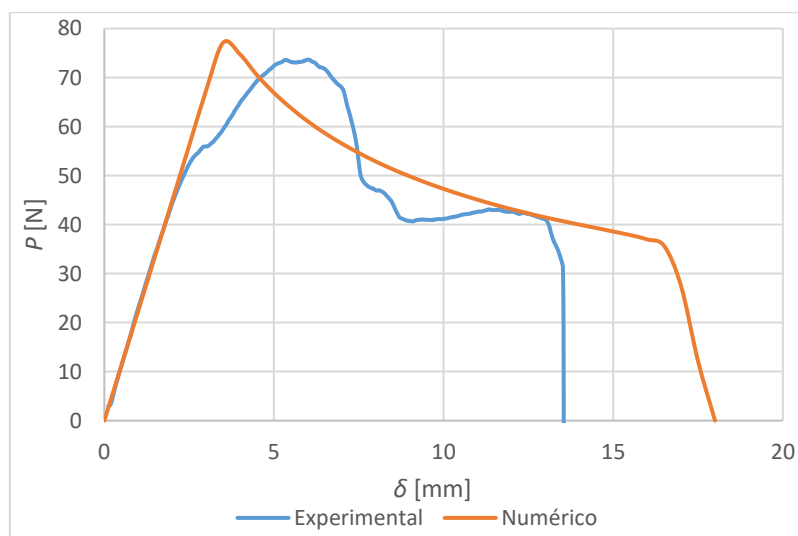


Figura 91 - Curva P - δ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete DCB C0_1

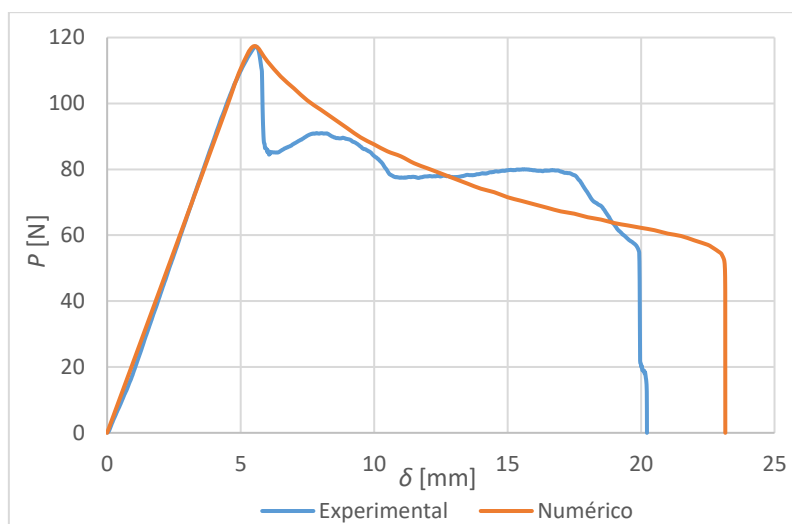


Figura 92 – Curva P - δ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete DCB C0_2

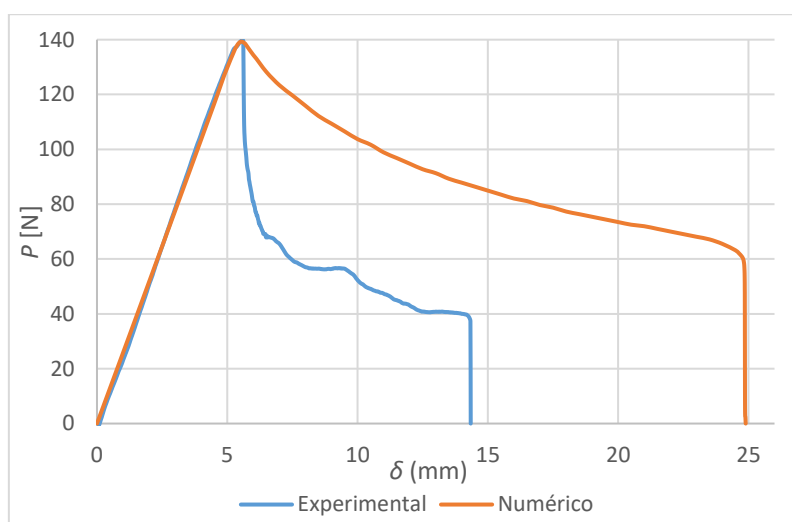


Figura 93 - Curva P - δ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete DCB C0_3

De seguida, exibe-se a Tabela 20, onde se comparam os valores de $P_{\text{máx}}$, $\delta P_{\text{máx}}$ e $\delta_{\text{máx}}$ em função dos provetes ensaiados experimental e numericamente, para a concentração de fibra de vidro de 0%. A tabela inclui também a média dos valores dos erros relativos e desvio-padrão das variáveis em estudo.

Observando a Tabela 20, verifica-se uma maior discrepância entre valores numéricos e experimentais quando se trata do $\delta_{\text{máx}}$, atingindo uma média de erro de 25,12%. Significa isto que o ensaio numérico necessita que haja um maior deslocamento do provete para ocorrer a rotura completa. Pelo contrário, a média de erro percentual é insignificante em relação ao $P_{\text{máx}}$ (1,60%). Por outro lado, esta aumenta ligeiramente para $\delta P_{\text{máx}}$ (22,79%). O desvio-padrão do último parâmetro é elevado devido ao provete C0_1, cujo erro percentual de $\delta P_{\text{máx}}$ ronda 25,12%, influenciando o erro global.

Tabela 20 - Comparação dos parâmetros $P_{\text{máx}}$, $\delta P_{\text{máx}}$ e $\delta_{\text{máx}}$ em provetes DCB para 0% de fibra de vidro

Provete	$P_{\text{máx}}$		Erro [%]	$\delta P_{\text{máx}}$		Erro [%]	$\delta_{\text{máx}}$		Erro [%]
	Num	Exp		Num	Exp		Num	Exp	
CO_1	77,08	73,69	4,40	3,50	5,88	-68,00	16,87	13,52	19,86
CO_2	117,51	117,29	0,19	5,50	5,56	-1,09	22,92	19,96	12,83
CO_3	140,11	139,81	0,21	5,50	5,46	0,72	24,83	14,24	42,65
Média			1,60	Média		22,79	Média		25,12
Desvio-Padrão			2,42	Desvio Padrão		39,17	Desvio Padrão		15,59

A Tabela 21 exibe os valores de G_{IC} , δ_n^0 , δ_n^f e t_n^0 que resultam das leis coesivas e do processo iterativo efetuado, além dos valores médios e desvio padrão respectivos. Em relação aos desvios percentuais, δ_n^0 e t_n^0 apresentam um valor elevado, ambos de cerca de 27,42%. O desvio menos acentuado pertence a δ_n^f , rondando os 17,80%.

Tabela 21 - Dados resultantes da lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803, com 0% de concentração de fibra de vidro para os ensaios DCB

Provete	G_{IC} [N/mm]	δ_n^0 [mm]	δ_n^f [mm]	t_n^0 [MPa]
CO_1	0,56	0,05	0,28	4,00
CO_2	0,80	0,08	0,26	6,25
CO_3	0,69	0,09	0,20	7,05
Média	0,68	0,08	0,24	5,77
Desvio-Padrão	0,12	0,02	0,04	1,58

A Figura 94 apresenta as leis coesivas triangulares adquiridas através das várias iterações efetuadas, além da lei coesiva média. Foi necessário alterar t_n^0 para que a curva P - δ numérica coincidissem com a curva experimental, provocando alguma disparidade do parâmetro em questão. Tendo como referência os valores de entrada, constata-se que o t_n^0 final é de 37,86% inferior ao valor médio de t_n^0 obtido através das iterações. Convém salientar que a variação de t_n^0 é desta ordem de grandeza devido ao provete CO_1, cujo $P_{\text{máx}}$ da curva experimental é baixíssimo em comparação com os restantes provetes da mesma série (tem um desvio de 30,83% em relação à média de $P_{\text{máx}}$ dos provetes da série de 0% de concentração). Logo, como o $P_{\text{máx}}$ de CO_1 é muito baixo, foi necessário também diminuir t_n^0 .

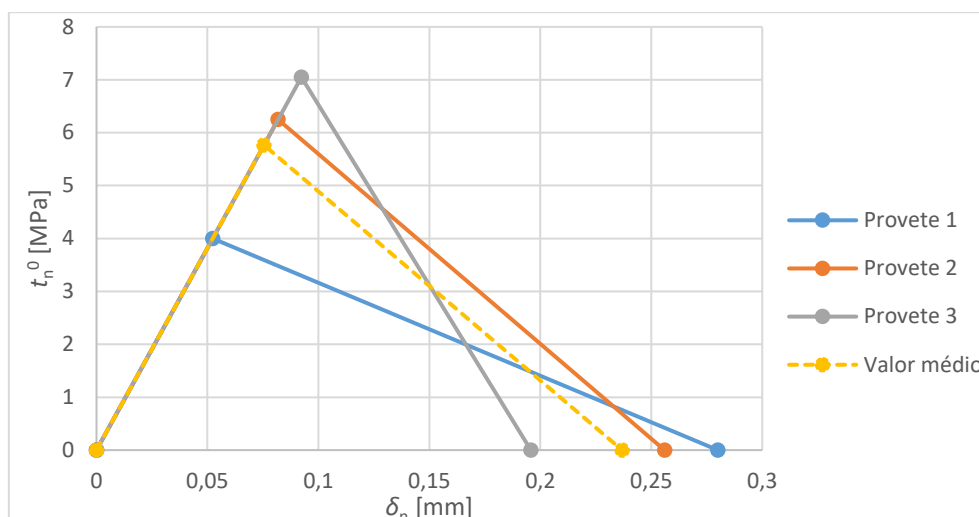


Figura 94 – Lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803 com 0% de concentração de fibra de vidro, para o ensaio DCB

Partindo para a concentração de 0,15% de fibra de vidro, apresenta-se a Tabela 22, onde estão indicados os valores de entrada utilizados para o princípio da modelação das curvas P - δ numéricas.

Tabela 22 - Dados de entrada dos ensaios numéricos com 0,15% de concentração de fibra de vidro, para os provetes DCB do adesivo SikaForce® 803

Provete	E [MPa]	G [MPa]	t_n^0 [MPa]	t_s^0 [MPa]	G_{IC} [N/mm]	G_{IIC} [N/mm]
C015_1	48,12	18,51	6,89	4,61	3,30	25,97
C015_2	48,12	18,51	6,89	4,61	3,31	25,97
C015_3	Anulado					

Com o processo de iteração concluído, obtiveram-se as curvas P - δ visíveis na Figura 95 e Figura 96. A Figura 95 corresponde ao provete no qual, porventura, existe a maior discrepância entre a curva P - δ numérica e a experimental. Isto é devido ao facto de, experimentalmente, a fenda se ter propagado de uma forma muito instável, havendo uma queda abrupta de P . De seguida, P volta a aumentar, durante o ensaio. Face a este cenário, é compreensível o porquê de ser difícil alcançar uma curva numérica que coincida com a experimental em questão. Por outro lado, na Figura 96, já é possível verificar uma semelhança muito maior entre as curvas P - δ . A rigidez elástica experimental e numérica são muito semelhantes, assim como a evolução de P na zona de propagação da fenda, sendo que esta última ocorrência sugere que o G_{IC} (numérico e experimental) convergem para o mesmo valor. Também se pode confirmar um aumento significativo do $P_{máx}$ em relação à concentração anterior, podendo-se concluir que o facto de se ter reforçado o adesivo com fibra de vidro leve ao aumento de $P_{máx}$. O provete P_C015_3 foi anulado devido à discrepância de resultados demonstrada em relação aos restantes provetes da mesma concentração.

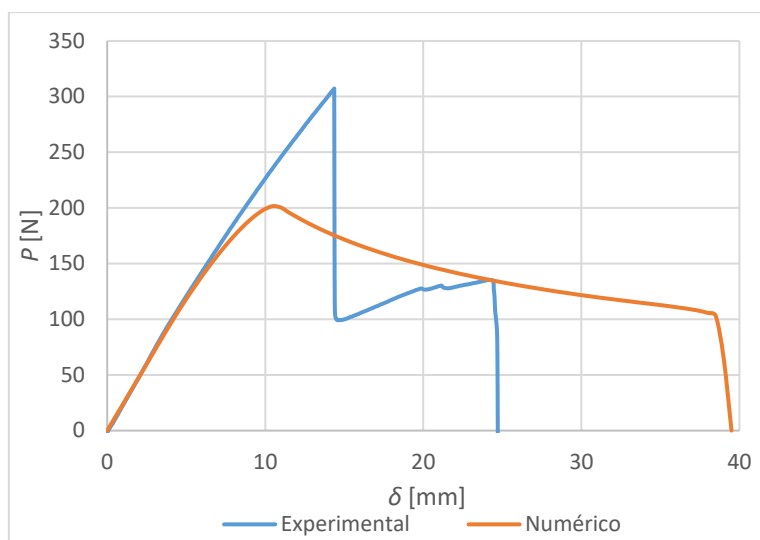


Figura 95 - Curva P - δ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete DCB C015_1

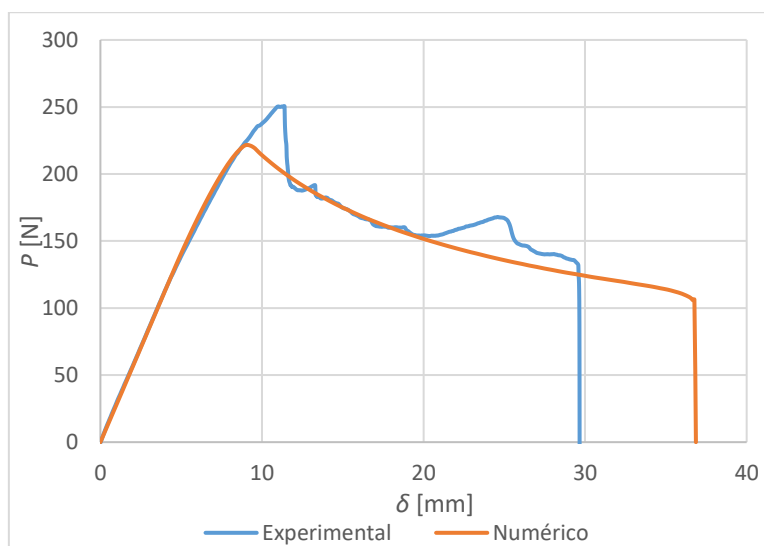


Figura 96 - Curva P - δ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete DCB C015_2

A *posteriori*, apresenta-se a Tabela 23, que resume a informação relevante relativa à concentração de 0,15% de fibra de vidro. Observa-se que o reforço do adesivo com a fibra de vidro provocou um aumento de $P_{\text{máx}}$, $\delta_{\text{máx}}$ e $\delta P_{\text{máx}}$, em relação às condições do ensaio anterior (0% de fibra de vidro). No entanto, também se regista uma subida do erro médio dos parâmetros em análise, sendo o $P_{\text{máx}}$ o mais afetado, subindo de 1,67% para 32,78%. No mesmo sentido, houve também uma subida do erro de $\delta_{\text{máx}}$, alcançando um erro médio de 28,47%. Quanto ao $\delta P_{\text{máx}}$, embora o erro seja de 31,60%, o desvio-padrão é inferior às restantes variáveis, registando um valor de 7,30%.

Tabela 23 - Comparação dos parâmetros $P_{m\acute{a}x}$, $\delta P_{m\acute{a}x}$ e $\delta_{m\acute{a}x}$ em provetes DCB para 0,15% de fibra de vidro

Proвете	$P_{m\acute{a}x}$		Erro [%]	$\delta P_{m\acute{a}x}$		Erro [%]	$\delta_{m\acute{a}x}$		Erro [%]
	Num	Exp		Num	Exp		Num	Exp	
C015_1	201,65	307,31	-52,40	10,5	14,36	-36,76	39,50	24,72	59,82
C015_2	221,55	250,72	-13,17	9	11,38	-26,44	36,86	29,66	24,27
C015_3	Anulado								
	Média		32,78	Média		31,60	Média		28,47
	Desvio-Padrão		27,74	Desvio Padrão		7,30	Desvio Padrão		25,16

A Tabela 24 expõe os valores que resultam das leis coesivas alcançadas para os provetes da série de 0,15% de fibra de vidro. O valor de t_n^0 tem um desvio de 20,68%, o que representa uma melhoria relativamente aos 27,00%. Os valores de deslocamento também registam valores admissíveis, uma vez que δ_n^0 e δ_n^f atingem um desvio de 20,68% e 20,51%, respetivamente.

Tabela 24 - Dados resultantes da lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803, com 0,15% de concentração de fibra de vidro para os ensaios DCB

Proвете	G_{IC} [N/mm]	δ_n^0 [mm]	δ_n^f [mm]	t_n^0 [MPa]
C015_1	3,30	0,14	0,96	6,89
C015_2	3,31	0,19	0,72	9,25
C015_3	Anulado			
Média	3,31	0,17	0,84	8,07
Desvio-Padrão	0,01	0,04	0,17	1,67

A Figura 97 apresenta as leis coesivas obtidas, na qual é observável o facto de que as curvas exibem um bom grau de concordância, com os valores de t_n^0 a variarem ligeiramente, embora contribua muito o facto de o t_n^0 (inicial e final) do provete C015_1 não se tenha alterado. Assim, comparando com os valores iniciais, verifica-se que o t_n^0 médio obtido pós-iteração apresenta uma variação de 14,62% em relação ao t_n^0 inicialmente introduzido na simulação numérica.

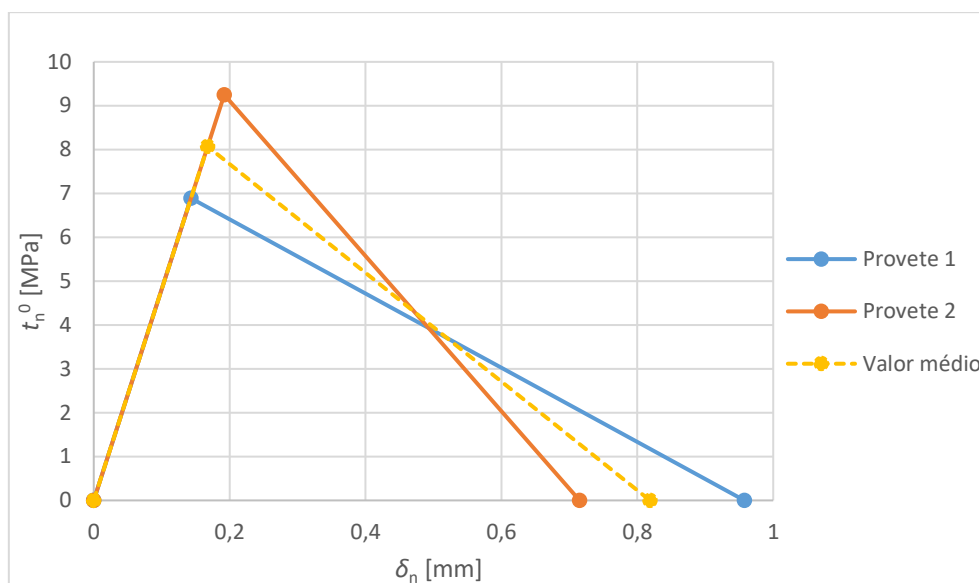


Figura 97 - Lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803 com 0,15% de concentração de fibra de vidro, para o ensaio DCB

A Tabela 25 indica os valores usados na simulação numérica das juntas com 0,35% de concentração de fibra de vidro, em que apenas G_{IC} varia. O valor de G_{IIC} é igual para os dois provetes, uma vez que é apenas um valor de referência, não tendo impacto nos resultados, uma vez que o ensaio DCB é um ensaio de tração pura.

Tabela 25 - Dados de entrada dos ensaios numéricos com 0,35% de concentração de fibra de vidro, para os provetes DCB do adesivo SikaForce® 803

Proвете	E [MPa]	G [MPa]	t_n^0 [MPa]	t_s^0 [MPa]	G_{IC} [N/mm]	G_{IIC} [N/mm]
C035_1	88,10	33,88	6,39	4,91	6,01	26,26
C035_2	88,10	33,88	6,39	4,91	5,31	26,26
C035_3	Anulado					

Terminada a iteração, geraram-se as curvas P - δ experimentais e numéricas. As curvas da Figura 98, correspondente ao provete C035_1, demonstram alguma semelhança na rigidez elástica até $P_{m\acute{a}x}$. Posteriormente, há uma elevada discrepância no que concerne o comportamento das curvas, uma vez que o $\delta_{m\acute{a}x}$ da curva numérica é bastante superior ao experimental. Observando a propagação da fenda da curva experimental, esta propagou-se de forma instável, o que sugere uma rotura abrupta devido a defeito de fabrico do provete. Com a mesma concentração, as curvas da Figura 99 exibem uma concordância muito maior comparativamente ao primeiro provete desta série. As mesmas têm um declive muito semelhante, pelo que se conclui que também têm uma rigidez elástica idêntica, diferenciando um pouco relativamente ao $P_{m\acute{a}x}$. A maior diferença visível nas curvas P - δ obtidas para a série de 0,35% de fibra de vidro reside na propagação do dano no provete C035_1.

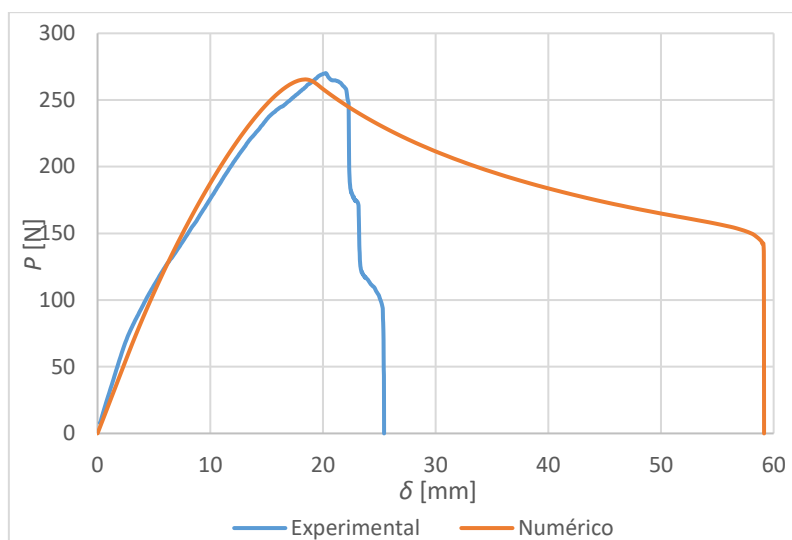


Figura 98 - Curva P - δ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete DCB C035_1

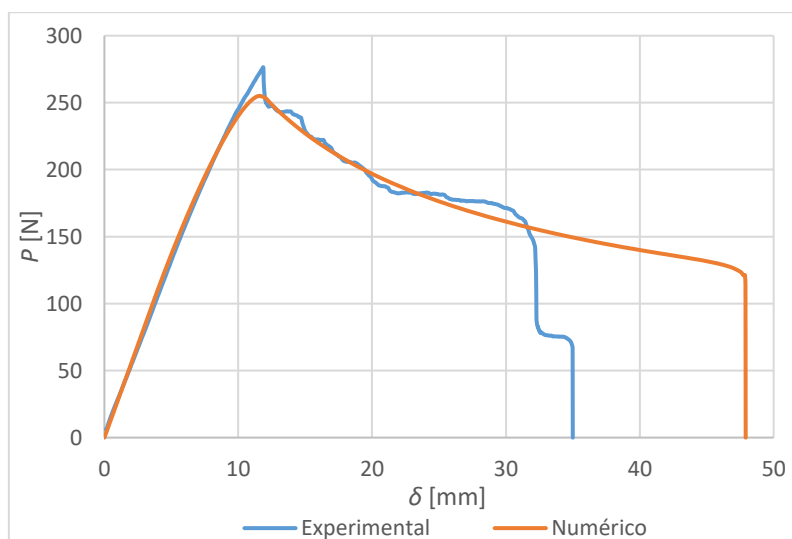


Figura 99 - Curva P - δ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete DCB C035_2

A Tabela 26 mostra que os valores de $P_{\text{máx}}$ numéricos como experimentais são muito parecidos, com maior discrepância para o provete C035_2. De resto, e sendo já recorrente, o $\delta_{\text{máx}}$ do ensaio numérico é muito superior ao experimental. Isto pode ser devido a pequenos defeitos experimentais, que propiciam a rotura prematura. Noutra nota, deve-se realçar a diminuição do erro absoluto médio para todos os parâmetros, exceto o $\delta_{\text{máx}}$, relativamente à série de 0,15% de fibra de vidro, sendo que o provete C035_1 influenciou bastante o $\delta_{\text{máx}}$, com um erro de 57,00%. O $P_{\text{máx}}$ apresenta um erro médio de 5,14%, que constitui uma média de erro absoluta bastante reduzida. Para $\delta P_{\text{máx}}$, o erro aumenta para 5,95%, que ainda se considera como um valor aceitável.

Tabela 26 - Comparação dos parâmetros $P_{máx}$, $\delta P_{máx}$ e $\delta_{máx}$ em provetes DCB para 0,35% de fibra de vidro

Proвете	$P_{máx}$		Erro [%]	$\delta P_{máx}$		Erro [%]	$\delta_{máx}$		Erro [%]
	Num	Exp		Num	Exp		Num	Exp	
C035_1	265,33	270,13	-1,81	18,60	20,23	-8,76	59,15	25,43	57,01
C035_2	254,94	276,52	-8,46	11,50	11,86	-3,13	47,91	34,99	26,97
C035_3	Anulado								
	Média		5,14	Média		5,95	Média		41,99
	Desvio-Padrão		4,71	Desvio Padrão		3,98	Desvio Padrão		21,24

A Tabela 27 contém os dados dos parâmetros coesivos e deslocamentos resultantes da aplicação da lei coesiva e respetivo processo de iteração. Verifica-se um desvio-padrão algo elevado t_n^0 , o que perfaz um desvio percentual de 13,89%, respetivamente. Relativamente aos deslocamentos, δ_n^0 apresenta um desvio de 13,89%, sendo que δ_n^f regista uma discrepância ainda maior, com um desvio de 22,60%. Esta disparidade pode dever-se ao facto de se ter aumentado bastante o t_n^0 para o provete C035_2, com o objetivo de ajustar a curva P - δ numérica à experimental.

Tabela 27 - Dados resultantes da lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803, com 0,35% de concentração de fibra de vidro para os ensaios DCB

Proвете	G_{IC} [N/mm]	δ_n^0 [mm]	δ_n^f [mm]	t_n^0 [MPa]
C035_1	6,01	0,08	1,62	7,39
C035_2	5,31	0,10	1,18	9,00
C035_3	Anulado			
Média	5,66	0,09	1,40	8,19
Desvio-Padrão	0,50	0,01	0,31	1,14

A Figura 100 contém as leis coesivas triangulares, além da lei coesiva média. As leis coesivas foram obtidas com o auxílio do processo de ajuste das curvas P - δ experimentais. Verifica-se um bom nível de concordância entre as leis, culminando num δ_n^f com uma ligeira discrepância. Tendo em conta o valor de t_n^0 inicial, assinala-se um aumento de 22,03% em relação ao valor médio de t_n^0 obtido através dos ajustes.

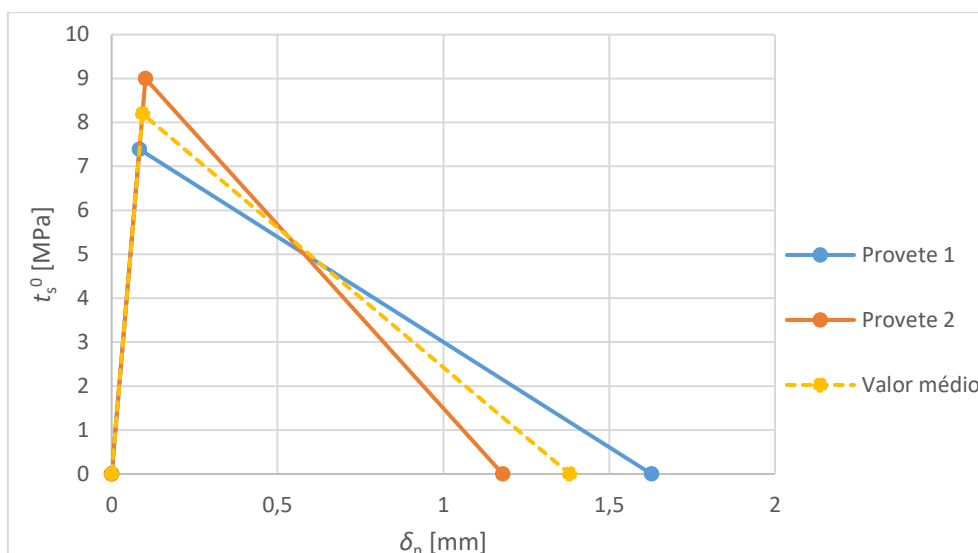


Figura 100 - Lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803 com 0,35% de concentração de fibra de vidro, para o ensaio DCB

A Tabela 28 resume os valores dos parâmetros de entrada dos provetes com 0,55% de fibra de vidro, nos quais se verifica valores máximos para todas as variáveis, em comparação com as concentrações anteriores.

Tabela 28 - Dados de entrada dos ensaios numéricos com 0,55% de concentração de fibra de vidro, para os provetes DCB do adesivo SikaForce® 803

Provetes	E [MPa]	G [MPa]	t_n^0 [MPa]	t_s^0 [MPa]	G_{IC} [N/mm]	G_{IIC} [N/mm]
C055_1	142,13	54,67	7,04	5,04	7,82	31,41
C055_2	142,13	54,67	7,04	5,04	7,76	30,83
C055_3	Anulado					

Finalizado o processo de iteração, foi possível obter as curvas P - δ numéricas, restando depois compará-las com as experimentais. As curvas de ambos os provetes se encontram na Figura 101 e Figura 102.

A Figura 101, representante do provete C055_1, demonstra uma concordância bastante razoável entre ambas as curvas. Desde o início do ensaio, é possível notar que a zona da rigidez elástica da curva numérica é muito idêntica à da curva experimental, tal como o $P_{máx}$. Durante a propagação da fenda, também é possível verificar a concordância existente entre as curvas P - δ , provando que o processo de iteração foi bem realizado. Após atingirem um deslocamento pouco superior a 30 mm, dá-se início a uma certa divergência entre a curva numérica e experimental, com o habitual $\delta_{máx}$ a provocar a discrepância.

Em relação à Figura 102, as curvas P - δ exibem uma disparidade maior entre si, devido ao facto de a curva experimental ser algo invulgar, indicativa de ocorrência de uma

propagação de fenda instável. Tal pode ter acontecido devido a defeito de fabrico do provete. Existe igual declive das retas na zona inicial do carregamento e, por isso, verifica-se uma semelhante rigidez elástica. Porém, o restante progresso das curvas torna-se desigual, aproximando-se apenas quando atinge o $\delta_{m\acute{a}x}$.

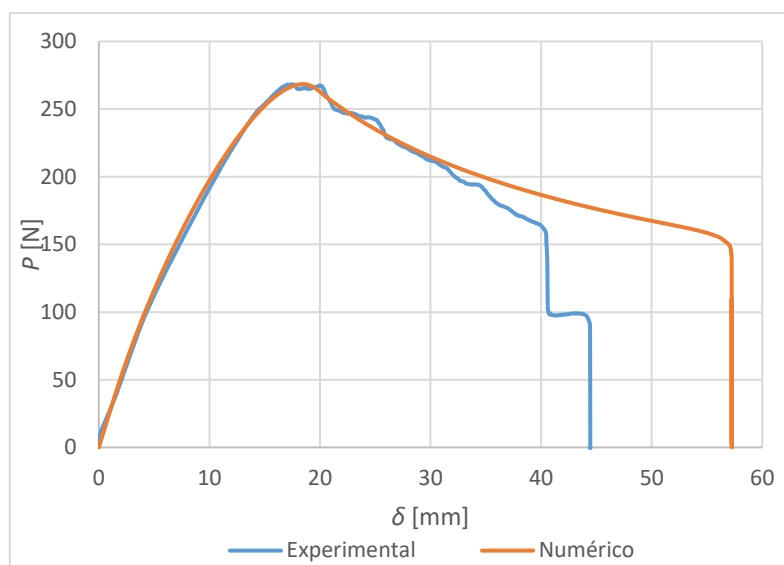


Figura 101 - Curva P - δ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete DCB C055_1

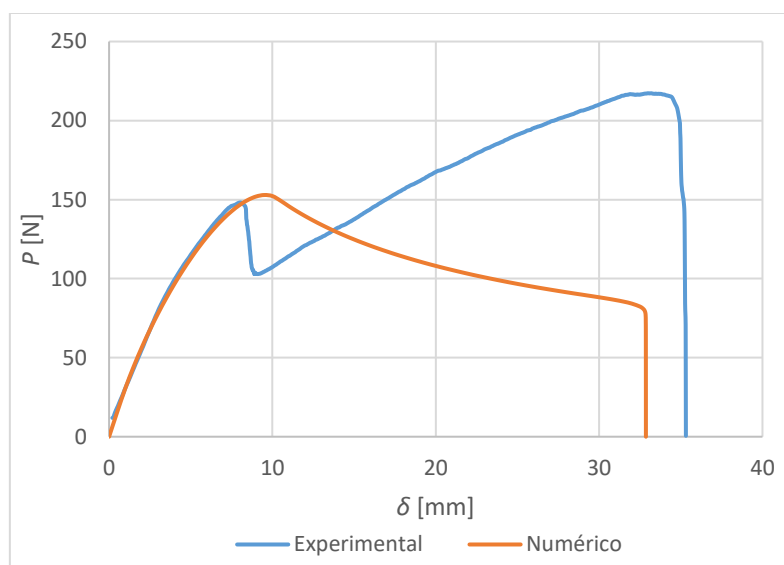


Figura 102 - Curva P - δ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete DCB C055_2

Através da Tabela 29, é possível constatar que os valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ e $\delta P_{m\acute{a}x}$, tanto o numérico como experimental, têm uma variação muito residual para o provete C055_1, com o $\delta_{m\acute{a}x}$ a registar uma maior diferença percentual (22,34%). O $\delta P_{m\acute{a}x}$ de C055_2 é bastante elevado devido a uma anomalia da curva experimental, na qual atinge o $P_{m\acute{a}x}$ muito tarde durante o ensaio devido à propagação instável da fenda. Por outro lado, o erro médio do $\delta_{m\acute{a}x}$ atinge o valor mais baixo de todo o estudo, situando-

se nos 7,46%. Convém realçar a ocorrência de uma ligeira quebra no valor de $P_{\text{máx}}$ para a concentração em questão, na medida em que a média de $P_{\text{máx}}$ desta concentração é inferior à média dos ensaios anteriores.

Tabela 29 - Comparação dos parâmetros $P_{\text{máx}}$, $\delta P_{\text{máx}}$ e $\delta_{\text{máx}}$ em provetes DCB para 0,55% de fibra de vidro

Proвете	$P_{\text{máx}}$		Erro [%]	$\delta P_{\text{máx}}$		Erro [%]	$\delta_{\text{máx}}$		Erro [%]
	Num	Exp		Num	Exp		Num	Exp	
C055_1	268,27	268,33	-0,02	18,75	17,50	6,67	57,24	44,45	22,34
C055_2	152,92	217,28	-42,09	9,5	32,96	-246,95	32,87	35,31	6,93
C055_3	Anulado								
Média			21,05	Média			120,14	Média	7,46
Desvio-Padrão			29,74	Desvio Padrão			179,33	Desvio Padrão	21,05

Na Tabela 30 dispõe-se dos dados dos parâmetros coesivos. Fazendo uma análise à tabela referida, δ_n^0 , δ_n^f e t_n^0 registam uma discrepância bastante baixa, alcançando um desvio de 22,15%, 21,58% e 22,15%, respetivamente.

Tabela 30 - Dados resultantes da lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803, com 0,55% de concentração de fibra de vidro para os ensaios DCB

Proвете	G_{IC} [N/mm]	δ_n^0 [mm]	δ_n^f [mm]	t_n^0 [MPa]
C055_1	7,82	0,034	3,26	4,800
C055_2	7,76	0,025	4,43	3,500
C055_3	Anulado			
Média	7,79	0,029	3,85	4,150
Desvio-Padrão	0,045	0,006	0,830	0,919

Na Figura 103 estão expostas as leis coesivas triangulares obtidas e a respetiva lei coesiva média, formadas através dos dados da Tabela 30, para os provetes validados da concentração de 0,55% de fibra de vidro. As leis apresentam uma semelhança razoável, como os desvios percentuais demonstram. No entanto, comparando o valor de t_n^0 introduzido com o valor médio do mesmo parâmetro, constata-se que este é cerca de 69,64% inferior. Isto é justificável com o facto de se ter reduzido bastante o t_n^0 para garantir semelhança entre as curvas P - δ experimentais e numéricas.

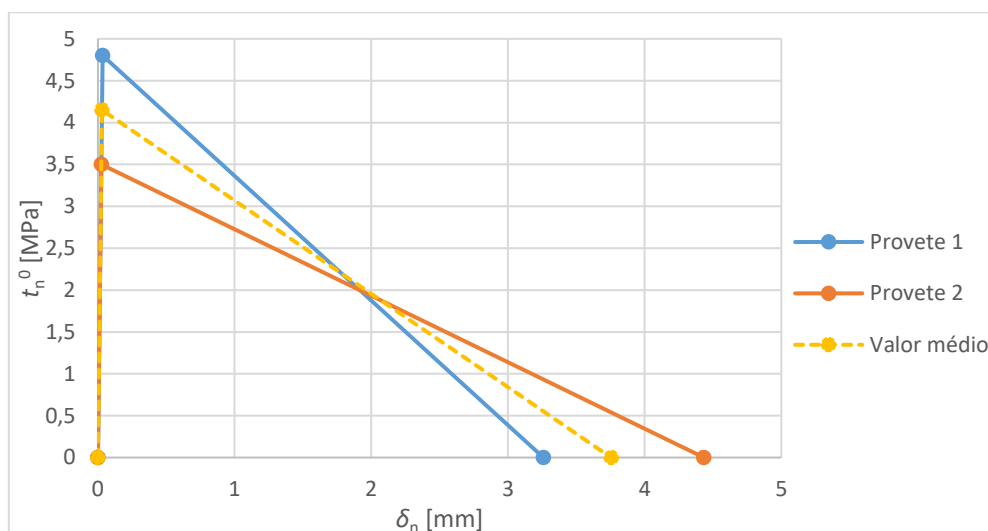


Figura 103 - Lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803 com 0,55% de concentração de fibra de vidro, para o ensaio DCB

3.2.4.2 Ensaio ENF

Com a validação das leis coesivas obtidas para o ensaio DCB, repete-se o mesmo procedimento, mas desta vez para o ensaio ENF.

Primeiramente são demonstrados os valores dos parâmetros, adquiridos através dos ensaios experimentais, e que são utilizados como dados de entrada para modelação dos ensaios numéricos. Posto isto, apresenta-se a Tabela 31 onde se encontram os parâmetros mencionados, para a concentração de 0% de fibra de vidro. Devido à elevada ductilidade e baixa rigidez do adesivo, foi necessário incrementar os valores de E e G para o programa poder ser executado, uma vez que o *software* não consegue modelar as curvas $P-\delta$ com valores de rigidez como 19 MPa, que corresponde ao caso da série de 0% de fibra de vidro, devido às razões supracitadas. Para compensar esta alteração, a proporção inicial entre E e G mantém-se, agora para valores mais elevados. O mesmo procedimento é feito para as restantes concentrações doravante. De qualquer forma, esta manipulação dos valores de E e G não tem influência na obtenção das curvas numéricas, como é demonstrado na análise de sensibilidade dos ensaios ENF, desde que se mantenha a razão de proporcionalidade.

Tabela 31 - Dados de entrada dos ensaios numéricos com 0% de concentração de fibra de vidro, para os provetes ENF do adesivo SikaForce® 803

Provet	E [MPa]	G [MPa]	t_n^0 [MPa]	t_s^0 [MPa]	G_{IC} [N/mm]	G_{IIC} [N/mm]
CO_1	300,00	115,35	7,95	4,84	0,56	16,79
CO_2	Anulado					
CO_3	Anulado					

A Figura 104 apresenta a curva P - δ numérica e experimental para o único provete válido da concentração de 0% de fibra de vidro, para o ensaio ENF. Através da análise das curvas P - δ , é possível visualizar alguma discordância no que concerne à zona de rigidez elástica, uma vez que as curvas apresentam declives bastante diferentes. Esta discordância é justificável pelo facto de o MDC selecionado para este trabalho poder não ser o mais adequado, devido à elevada ductilidade do adesivo. As curvas tornam-se semelhantes apenas no fim de ensaio, após a queda abrupta do P experimental. De resto, e no que diz respeito a $P_{\text{máx}}$ e $\delta_{\text{máx}}$, verifica-se alguma semelhança, principalmente quanto ao primeiro parâmetro, enquanto $\delta P_{\text{máx}}$ regista uma disparidade maior.

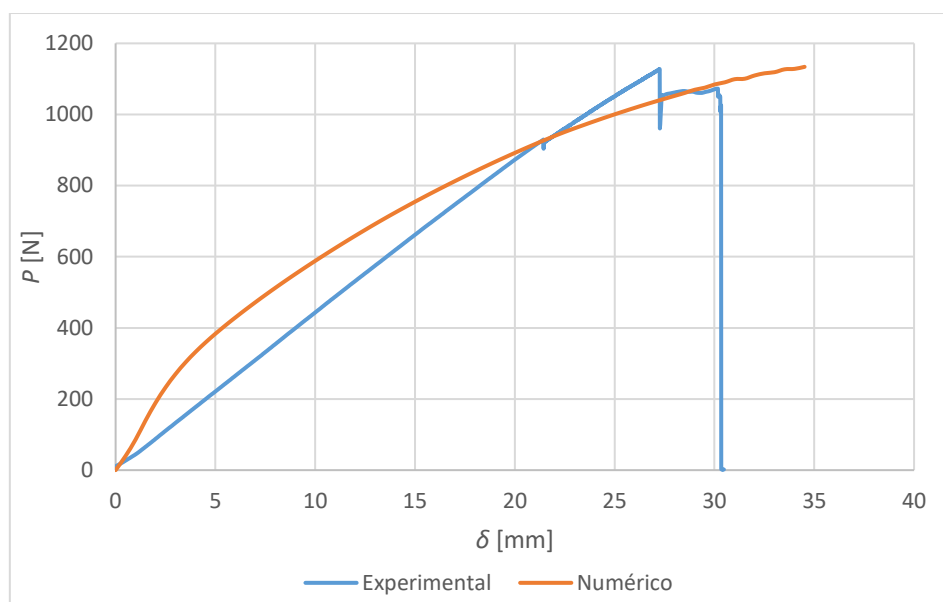


Figura 104 - Curva P - δ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete ENF C0_1

A Tabela 32 resume os valores obtidos para $P_{\text{máx}}$, $\delta P_{\text{máx}}$ e $\delta_{\text{máx}}$ para 0% de fibra de vidro. Constata-se um erro muito residual para $P_{\text{máx}}$ com um registo de apenas 0,57%. Contudo, para os restantes parâmetros, aumenta a discrepância entre as curvas P - δ , com $\delta P_{\text{máx}}$ e $\delta_{\text{máx}}$ a registarem um erro de 26,63% e 13,26%, respetivamente.

Tabela 32 - Comparação dos parâmetros $P_{\text{máx}}$, $\delta P_{\text{máx}}$ e $\delta_{\text{máx}}$ em provetes ENF para 0% de fibra de vidro

Proвете	$P_{\text{máx}}$		Erro [%]	$\delta P_{\text{máx}}$		Erro [%]	$\delta_{\text{máx}}$		Erro [%]
	Num	Exp		Num	Exp		Num	Exp	
C0_1	1134,01	1127,56	0,57	34,52	27,26	26,63	34,52	30,47	13,26
C0_2	Anulado								
C0_3	Anulado								

A Tabela 33 contém os dados dos parâmetros coesivos relativos ao provete C0_1, uma vez que os restantes provetes da concentração de 0% de fibra de vidro foram invalidados. De forma a obter a curva $P-\delta$ numérica, não foi necessário alterar de forma drástica o valor de t_s^0 . De facto, com o valor de entrada presente na Tabela 31 e comparando com o valor pós-iteração da Tabela 33, verifica-se apenas uma subida do t_s^0 em uma unidade alcançando assim 5,84 MPa.

Tabela 33 - Dados resultantes da lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803, com 0% de concentração de fibra de vidro para os ensaios ENF

Proвете	G_{IIC} [N/mm]	δ_s^0 [mm]	δ_s^f [mm]	t_s^0 [MPa]
C0_1	16,79	0,02	5,75	5,84
C0_2	Anulado			
C0_3	Anulado			

A Figura 105 demonstra a lei coesiva triangular após as iterações. Como mencionado anteriormente, houve uma ligeira alteração de t_s^0 , sendo que o primeiro regista um desvio de 17,12% entre o valor inicial e final. Salienta-se o facto de δ_s^f registar um resultado bastante elevado, o qual se deve a G_{IIC} , uma vez que este parâmetro exhibe valores anormalmente elevados para todas as concentrações deste adesivo.

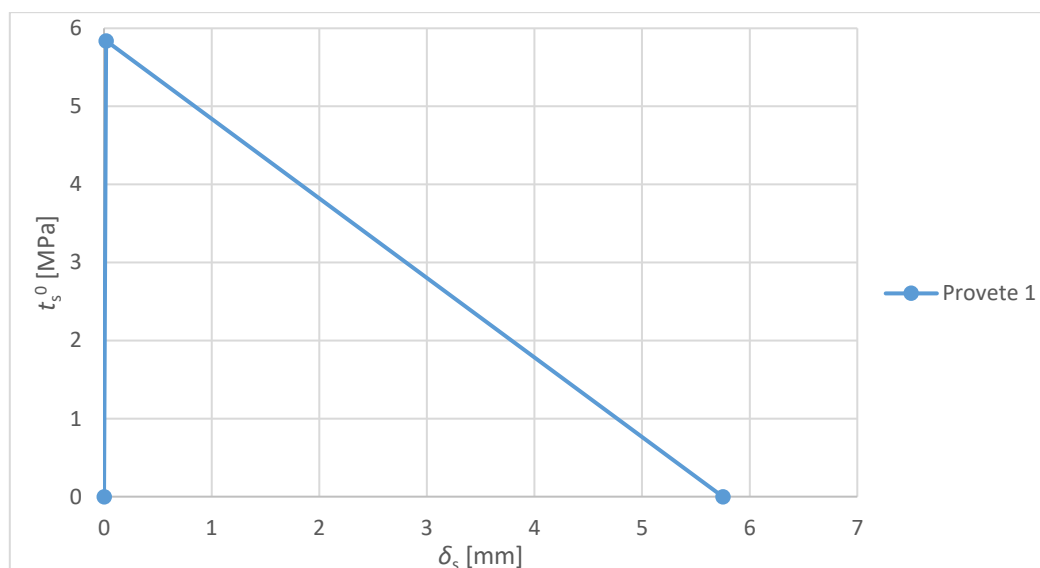


Figura 105 - Lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803 com 0% de concentração de fibra de vidro, para o ensaio ENF

Apresentada a lei coesiva da série de 0% de fibra de vidro, muda-se o foco para a série de 0,15%. Assim, na Tabela 34 indicam-se os valores de entrada para a modelação das curvas $P-\delta$ da concentração em questão.

Tabela 34 – Dados de entrada dos ensaios numéricos com 0,15% de concentração de fibra de vidro, para os provetes DCB do adesivo SikaForce® 803

Provete	E [MPa]	G [MPa]	t_n^0 [MPa]	t_s^0 [MPa]	G_{IC} [N/mm]	G_{IIC} [N/mm]
C015_1	Anulado					
C015_2	300,00	115,35	6,89	4,61	3,30	25,97
C015_3	Anulado					

Finalizado o processo de iteração, exibe-se a curva P - δ numérica e experimental através da Figura 106. A semelhança entre curvas é bastante maior do que a observada na série de 0%. Verifica-se uma concordância aceitável na fase inicial da aplicação da carga, embora as curvas comecem a divergir ligeiramente posteriormente. No entanto, na fase final do ensaio volta a existir semelhança entre as curvas, o que acontece após uma queda abrupta de P no ensaio experimental. A semelhança mantém-se até um pouco antes de se atingir $P_{máx}$ da curva experimental. Por último, convém mencionar um aumento de $P_{máx}$ alcançado em relação à concentração anterior, em cerca de 300 N, o que sugere que a adição de fibra de vidro ao adesivo aumenta a sua tenacidade.

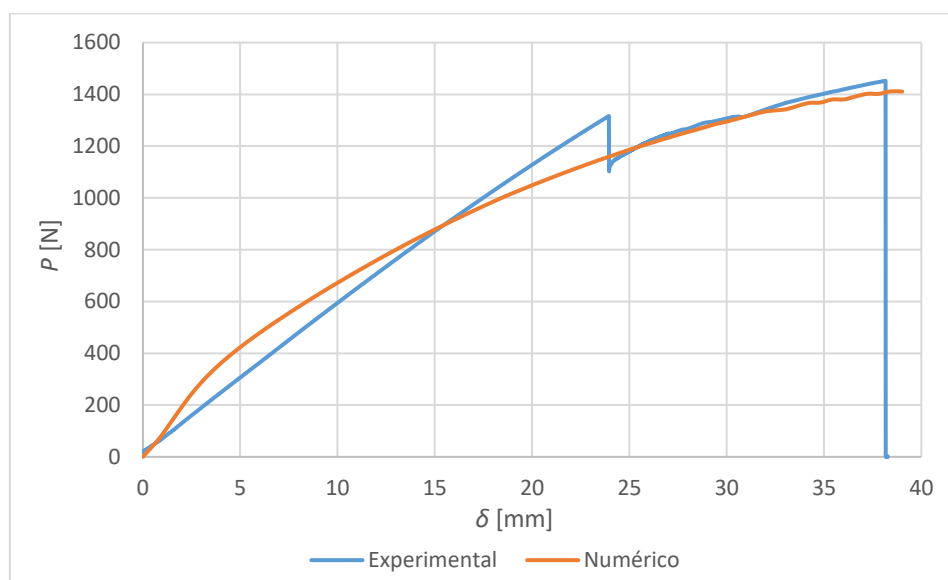


Figura 106 - Curva P - δ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete ENF C015_2

Na Tabela 35 verifica-se um aumento dos valores dos parâmetros em estudo e uma diminuição substancial dos erros em relação à concentração anteriormente analisada. O erro existente entre o $P_{máx}$ das curvas em questão é de apenas 2,82%, sendo este correspondente à maior discrepância registada para esta série. Os restantes parâmetros, $\delta P_{máx}$ e $\delta_{máx}$, exibem um erro de apenas 0,72% e 1,93%, respetivamente.

Tabela 35 - Comparação dos parâmetros $P_{\text{máx}}$, $\delta P_{\text{máx}}$ e $\delta_{\text{máx}}$ em provetes ENF para 0,15% de fibra de vidro

Provete	$P_{\text{máx}}$		Erro [%]	$\delta P_{\text{máx}}$		Erro [%]	$\delta_{\text{máx}}$		Erro [%]
	Num	Exp		Num	Exp		Num	Exp	
C015_1	Anulado								
C015_2	1411,40	1452,35	2,82	38,42	38,15	0,72	39,02	38,28	1,93
C015_3	Anulado								

De seguida apresenta-se a Tabela 36, que contém os valores finais de G_{IIC} , δ_s^0 , δ_s^f e t_s^0 . Os valores destes parâmetros resultam das leis coesivas e do processo iterativo efetuado. Denota-se um valor reduzido de δ_s^0 , enquanto δ_s^f demonstra um valor muito elevado, devido às mesmas razões mencionadas para o caso dos ensaios da concentração de 0%. Tendo em conta a Tabela 34 e em comparação com a Tabela 36, verifica-se uma ligeira diminuição de t_s^0 , de apenas 0,61 MPa, resultando em 4,40 MPa.

Tabela 36 - Dados resultantes da lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803, com 0,15% de concentração de fibra de vidro para os ensaios ENF

Provete	G_{IIC} [N/mm]	δ_s^0 [mm]	δ_s^f [mm]	t_s^0 [MPa]
C015_1	Anulado			
C015_2	25,97	0,02	11,81	4,40
C015_3	Anulado			

Para concluir a validação da lei coesiva do ensaio ENF, apresenta-se a Figura 107. O valor de t_s^0 inicial sofreu uma ligeira diminuição, revelando um desvio entre t_s^0 inicial e pós-iterações de apenas 4,77%. Em comparação com a concentração anteriormente analisada, e da mesma forma que δ_s^f do provete C0_1 apresenta um valor elevado, o provete C015_2 também revela um resultado assinalável, atingindo os 11,81 mm.

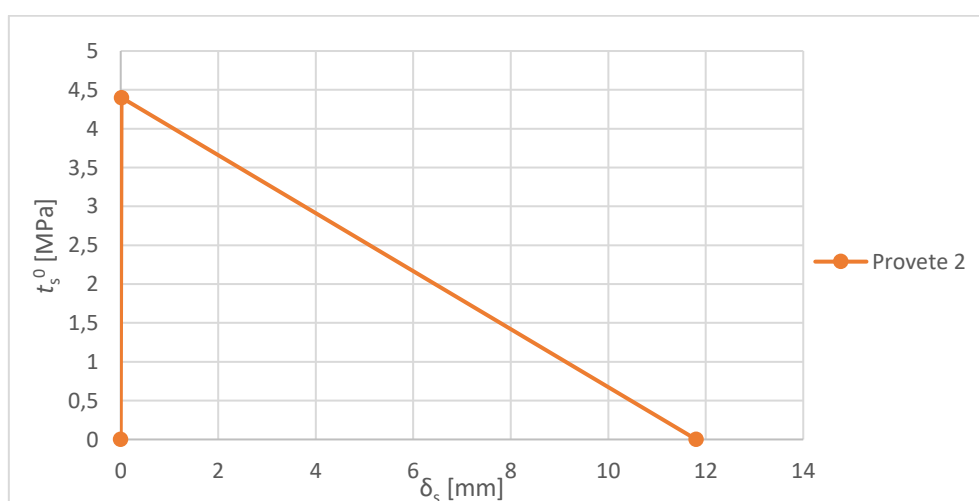


Figura 107 - Lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803 com 0,15% de concentração de fibra de vidro, para o ensaio ENF

De seguida, muda-se o foco para a concentração de 0,35% de fibra de vidro apresentando a Tabela 37, na qual constam os valores dos parâmetros de entrada no *software* Abaqus®. Em comparação com a tabela da série anterior, a concentração atual mostra um ligeiro aumento de G_{IIC} , t_s^0 e G_{IC} , embora este último não tenha influência no ensaio ENF, uma vez que este é um ensaio de corte puro.

Tabela 37 - Dados de entrada dos ensaios numéricos com 0,35% de concentração de fibra de vidro, para os provetes DCB do adesivo SikaForce® 803

Proвете	E [MPa]	G [MPa]	t_n^0 [MPa]	t_s^0 [MPa]	G_{IC} [N/mm]	G_{IIC} [N/mm]
C035_1	300,00	115,35	6,39	4,91	5,66	26,26
C035_2	Anulado					
C035_3	Anulado					

A *posteriori*, exibe-se a Figura 108, que contém as curvas P - δ numérica e experimental do provete C035_1. A comparação das curvas permite afirmar que existe alguma divergência da zona inicial de rigidez elástica, embora se verifique uma convergência na região final da aplicação da carga, mais precisamente após a queda abrupta de P da curva experimental. Realça-se o facto de ambas as curvas atingirem $P_{máx}$ semelhante, embora este seja alcançado com valores de deslocamentos diferentes.

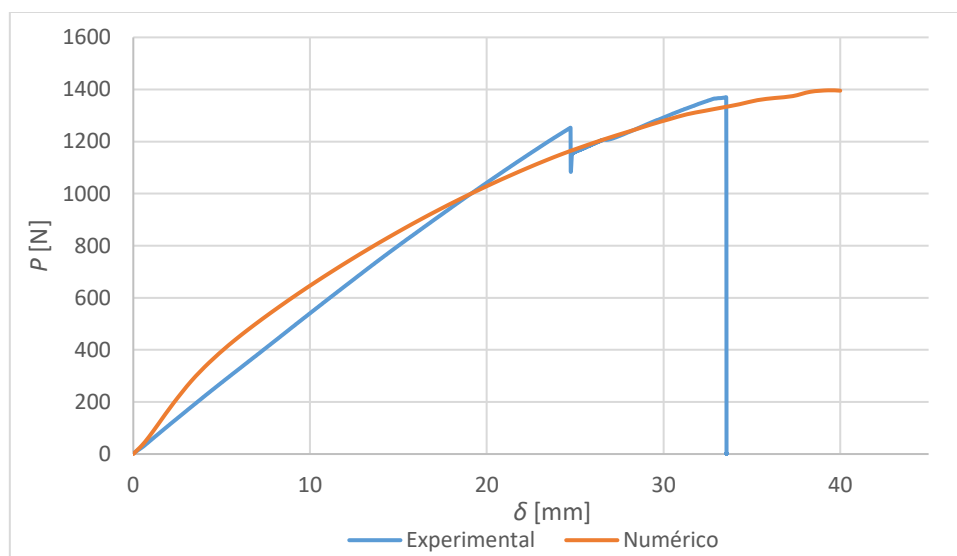


Figura 108 - Curva P - δ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete ENF C035_1

A Tabela 38 demonstra a comparação dos parâmetros $P_{máx}$, $\delta P_{máx}$ e $\delta_{máx}$ para a curva numérica e experimental. Contrariamente à série de 0,15% de fibra de vidro, a presente concentração regista erros percentuais de $\delta P_{máx}$ e $\delta_{máx}$ ligeiramente mais elevados, sendo estes de 14,20% e 14,14%, respetivamente. Em relação a $P_{máx}$, este contém um desvio residual de apenas 1,94%.

Tabela 38 - Comparação dos parâmetros $P_{\text{máx}}$, $\delta P_{\text{máx}}$ e $\delta_{\text{máx}}$ em provetes ENF para 0,35% de fibra de vidro

Provete	$P_{\text{máx}}$		Erro [%]	$\delta P_{\text{máx}}$		Erro [%]	$\delta_{\text{máx}}$		Erro [%]
	Num	Exp		Num	Exp		Num	Exp	
C035_1	1396,79	1370,24	1,94	38,31	33,55	14,20	38,31	33,57	14,14
C035_2	Anulado								
C035_3	Anulado								

De seguida apresenta-se a Tabela 39, na qual constam os valores dos deslocamentos resultantes da lei coesiva, além do G_{IIC} e t_s^0 pós-iterações. Comparando a Tabela 37 com a Tabela 39, obtém-se uma ideia de como varia t_s^0 , sendo que este parâmetro regista uma subida de apenas 1 MPa.

Tabela 39 - Dados resultantes da lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803, com 0,35% de concentração de fibra de vidro para os ensaios ENF

Provete	G_{IIC} [N/mm]	δ_s^0 [mm]	δ_s^f [mm]	t_s^0 [MPa]
C035_1	26,26	0,02	8,89	5,91
C035_2	Anulado			
C035_3	Anulado			

A análise da lei coesiva para a concentração de 0,35% termina com a demonstração da Figura 109. Comparando o t_s^0 obtido através das várias iterações efetuadas com o valor de t_s^0 dos parâmetros de entrada, assinala-se um desvio de apenas 16,92%.

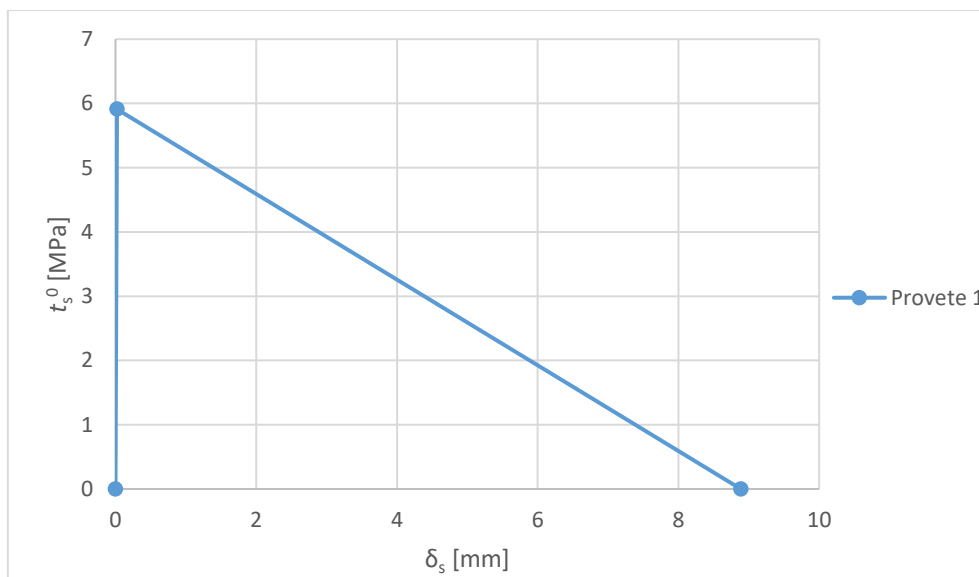


Figura 109 - Lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803 com 0,35% de concentração de fibra de vidro, para o ensaio ENF

Por fim, resta realizar a análise da lei coesiva para a série de 0,55% de fibra de vidro, e para isso apresenta-se a Tabela 40, que contém os parâmetros de entrada para a modelação das curvas numéricas. Esta concentração, ao contrário das outras, serve-se de dois provetes validados, ao invés de apenas um provete.

Tabela 40 - Dados de entrada dos ensaios numéricos com 0,55% de concentração de fibra de vidro, para os provetes DCB do adesivo SikaForce® 803

Proвете	E [MPa]	G [MPa]	t_n^0 [MPa]	t_s^0 [MPa]	G_{IC} [N/mm]	G_{IIC} [N/mm]
C055_1	300,00	115,35	6,31	4,99	7,89	31,41
C055_2	Anulado					
C055_3	300,00	115,35	6,31	5,26	7,89	30,26

A Figura 110 e Figura 111 contêm as curvas P - δ numéricas e experimentais para a série de 0,55% de fibra de vidro. Não se verifica semelhança no declive das curvas e, portanto, da rigidez elástica em ambas as figuras. Todavia, há uma coincidência entre curvas, que se regista durante a propagação da fenda. Esta ocorrência dá-se após a queda acentuada de P que se faz notar nas curvas P - δ de ambos os provetes. Observando a figura relativa ao provete C055_1, denota-se uma congruência de valores de $P_{máx}$, embora exista uma maior discrepância para $\delta P_{máx}$ e $\delta_{máx}$. Em relação ao provete C055_3, este demonstra um desvio maior para $P_{máx}$, $\delta P_{máx}$ e $\delta_{máx}$, existindo por isso uma menor semelhança entre a curva numérica e experimental deste provete.

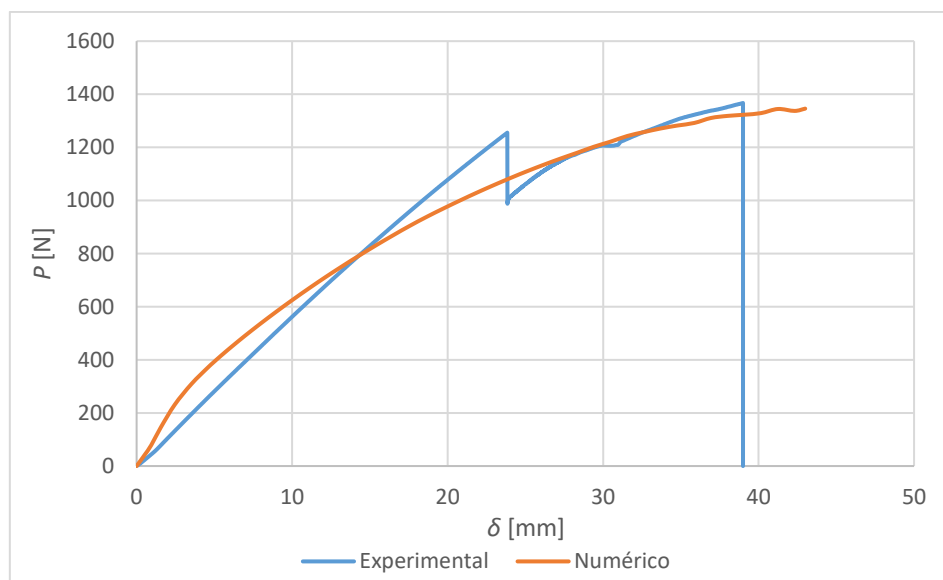


Figura 110 - Curva P - δ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete ENF C055_1

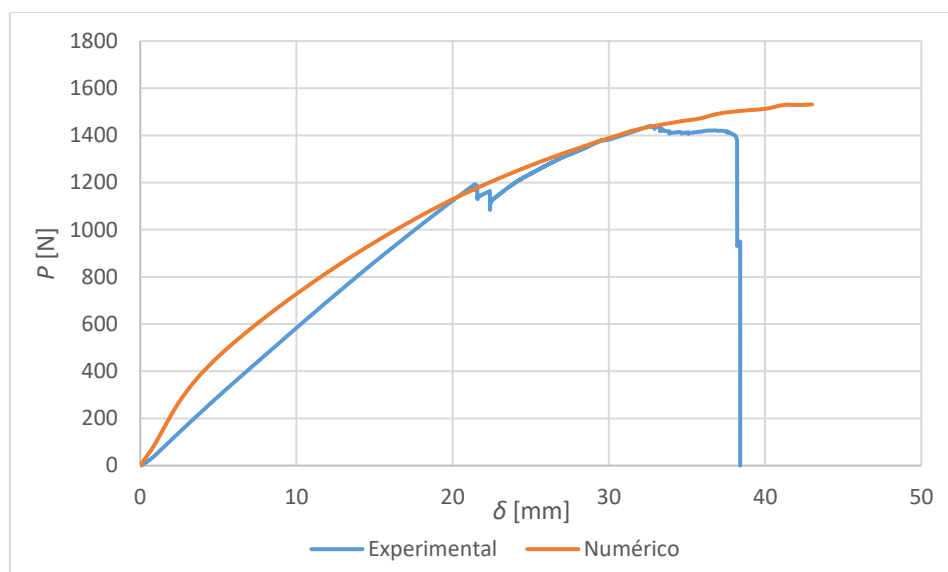


Figura 111 - Curva P - δ para validação das leis coesivas obtidas através do adesivo SikaForce® 803 do provete ENF C055_3

Com a observação da Tabela 41, é possível obter uma noção da discrepância dos parâmetros em questão. O provete C055_1, como explicado anteriormente, demonstra uma maior coincidência entre a curva numérica e experimental, com os resultados da tabela a provar isso mesmo. Entre $\delta P_{\text{máx}}$ e $\delta_{\text{máx}}$ registam-se erros absolutos iguais, de 5,75%, enquanto $P_{\text{máx}}$ demonstra um desvio menor, com 1,66% de erro. Em relação ao provete C055_3, $P_{\text{máx}}$ e $\delta_{\text{máx}}$ indicam desvios entre curvas algo semelhantes, com erros de 6,18% e 7,24%, respetivamente. Existe uma maior divergência quanto a $\delta P_{\text{máx}}$, sendo o valor do erro deste parâmetro cerca de 26,19%. Em suma, a média de erro absoluto de $P_{\text{máx}}$ e $\delta_{\text{máx}}$ dos dois provetes é deveras baixa, consistindo apenas de 3,92% e 6,50%, enquanto $\delta P_{\text{máx}}$ aumenta para 15,97%, o que representa ainda assim um valor razoável.

Tabela 41 - Comparação dos parâmetros $P_{\text{máx}}$, $\delta P_{\text{máx}}$ e $\delta_{\text{máx}}$ em provetes ENF para 0,55% de fibra de vidro

Proвете	$P_{\text{máx}}$		Erro [%]	$\delta P_{\text{máx}}$		Erro [%]	$\delta_{\text{máx}}$		Erro [%]
	Num	Exp		Num	Exp		Num	Exp	
C055_1	1344,50	1367,14	1,66	41,24	39,00	5,75	41,24	39,00	5,75
C055_2	Anulado								
C055_3	1528,89	1439,97	6,18	41,19	32,64	26,19	41,19	38,40	7,24
Média			3,92	Média		15,97	Média		6,50
Desvio-Padrão			3,20	Desvio Padrão		14,45	Desvio Padrão		1,05

A Tabela 42 demonstra os valores dos parâmetros coesivos, além dos respetivos deslocamentos (δ_s^0 e δ_s^f) obtidos após a aplicação da lei coesiva. Fazendo uma análise à tabela, verifica-se a existência de uma razoável concordância dos valores que nela constam. Em relação aos desvios percentuais entre provetes, δ_s^0 e t_s^0 registam desvios semelhantes, sendo ambos cerca de 8,50%, respetivamente. O deslocamento restante apresenta discrepâncias maiores entre provetes, sendo que δ_s^f atinge um desvio de 18,06%. Por último, convém realçar o facto de ser na série de 0,55% de fibra de vidro onde se alcança a maior média de G_{IIC} . Face aos valores obtidos na Tabela 41 e Tabela 42, é possível atestar a veracidade e robustez dos ensaios realizados.

Tabela 42 - Dados resultantes da lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803, com 0,55% de concentração de fibra de vidro para os ensaios ENF

Proвете	G_{IIC} [N/mm]	δ_s^0 [mm]	δ_s^f [mm]	t_s^0 [MPa]
C055_1	31,41	0,01	15,74	3,99
C055_2	Anulado			
C055_3	30,26	0,02	13,45	4,50
Média	30,84	0,01	14,60	4,25
Desvio-Padrão	0,81	0,001	1,62	0,36

A Figura 112 contém as leis coesivas triangulares, juntamente com a lei coesiva média, tendo estas sido obtidas com recurso ao processo de iteração da curva $P-\delta$ numérica. Verifica-se um bom nível de homogeneidade entre as leis apresentadas, embora exista uma ligeira discrepância relativamente a δ_s^f . A comparação do valor de t_s^0 de entrada com o valor homólogo obtido pós-iterações permite afirmar que existe um desvio de cerca de 20,73%, sendo este considerado um valor aceitável.

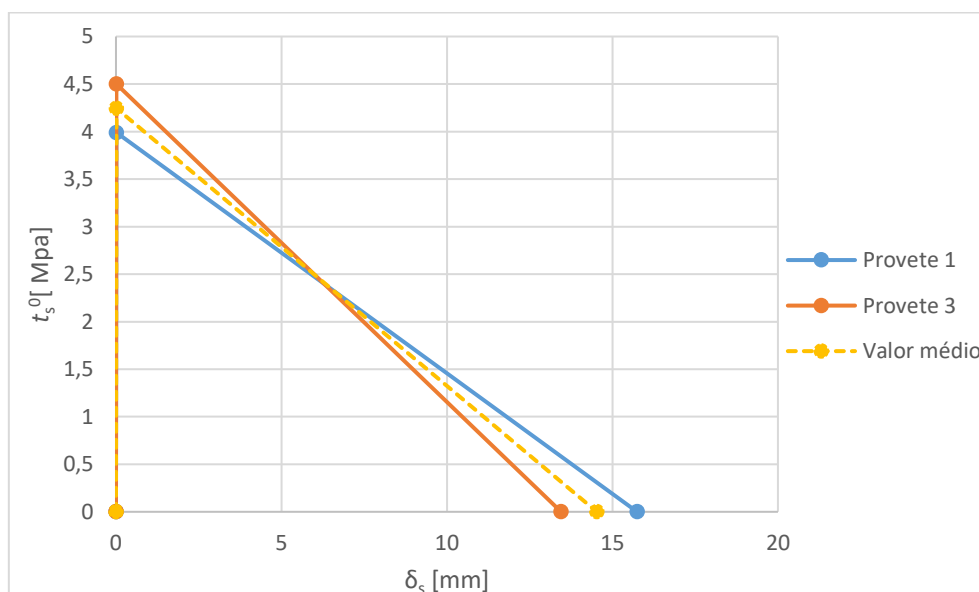


Figura 112 - Lei triangular coesiva do adesivo SikaForce® 803 com 0,55% de concentração de fibra de vidro, para o ensaio ENF

3.2.5 Análise de sensibilidade às leis coesivas obtidas

Neste capítulo é realizada a análise da sensibilidade dos vários parâmetros coesivos utilizados neste estudo. Mais especificamente, a análise consiste no estudo da influência que certas variáveis como E , G_{IC} , G_{IIC} , t_n^0 e t_s^0 possam ter nas curvas $P-\delta$ obtidas pelos modelos numéricos para os ensaios DCB e ENF. De facto, e como anteriormente referido, através dos ensaios experimentais DCB e ENF obtiveram-se os valores de G_{IC} e G_{IIC} para o adesivo SikaForce® 803 com as diferentes concentrações de fibra de vidro. De seguida, determinaram-se os valores de t_n^0 e t_s^0 por intermédio de iterações realizadas no Abaqus®, facilitando assim a compreensão do impacto que a variação de G_{IC} e G_{IIC} possa ter. Portanto, esta análise estuda a influência e sensibilidade dos parâmetros mencionados, com o auxílio das curvas $P-\delta$ numéricas obtidas no Abaqus®. Para isso, consideraram-se intervalos de $\pm 25\%$ em relação ao valor médio experimental, desde -75% até perfazer $+100\%$.

3.2.5.1 Ensaio DCB

A Tabela 43 contém os parâmetros que servem de *input* para o *software* Abaqus® e tem como objetivo a análise da sensibilidade da curva $P-\delta$, tendo em conta a variação de E , G_{IC} e t_n^0 . Assim, pretende-se averiguar se existem diferenças provocadas pelas mudanças de valores dos parâmetros nas curvas $P-\delta$ e se são dignas de registo. Convém também referir que a variação das variáveis mencionadas presume que os restantes parâmetros se mantenham constantes.

Tabela 43 – Variação dos parâmetros numéricos de entrada do adesivo SikaForce® 803 para ensaios DCB

	-75%	-50%	-25%	0%	25%	50%	75%	100%
E	40,75	81,50	122,25	163,00	203,75	244,50	282,25	326,00
G_{IC}	1,95	3,90	5,85	7,80	9,75	11,70	13,65	15,60
t_n^0	1,63	3,25	4,88	6,50	8,13	9,75	11,38	13,00

Na Figura 113 é observável a reduzida influência de E nas curvas $P-\delta$ do adesivo SikaForce® 803. O declive, $P_{máx}$ e $\delta P_{máx}$ mantêm-se iguais durante toda a duração do ensaio numérico, variando apenas o $\delta_{máx}$, sendo que este último aumenta simultaneamente com E . No entanto, esta variação não é significativa, pelo que se conclui que E não tem virtualmente influência no resultado da simulação. Por fim, convém ressaltar que E varia em consonância com G , através da Lei de Hooke, mantendo sempre a mesma proporção entre os dois parâmetros.

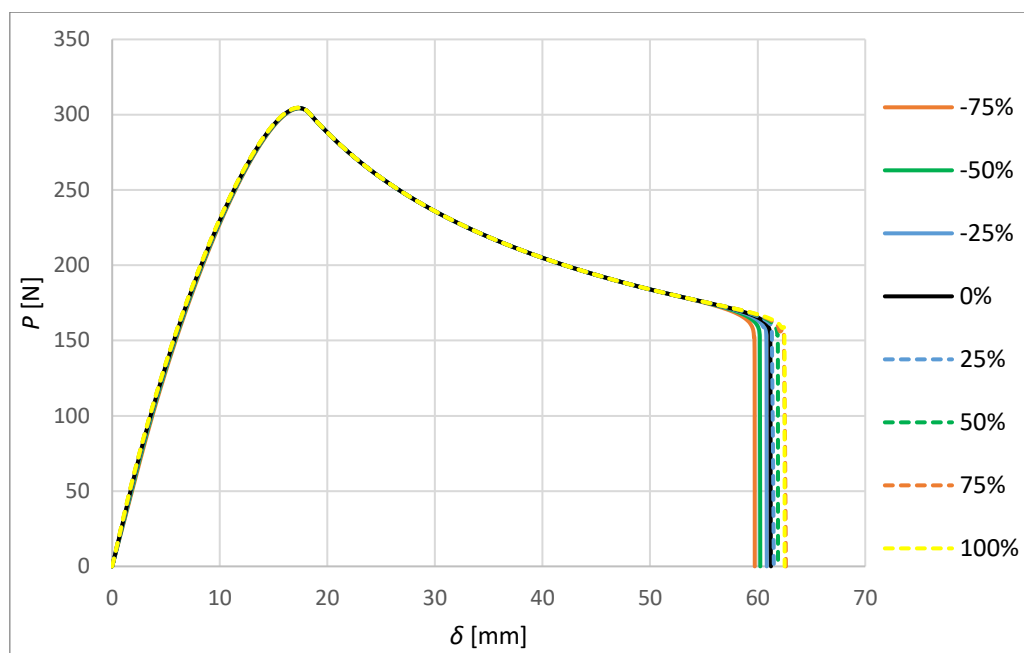


Figura 113 - Variação de E nas curvas P - δ para os provetes DCB

A Figura 114 demonstra a variação de G_{IC} e a sua influência nas curvas P - δ do adesivo SikaForce® 803. Esta variação tem um claro efeito nos valores de $P_{m\acute{a}x}$, $\delta P_{m\acute{a}x}$ e $\delta_{m\acute{a}x}$. De facto, estes valores aumentam ou diminuem de forma coerente embora não proporcional, consoante a variação positiva ou negativa de G_{IC} , respetivamente. Por outro lado, o declive das curvas P - δ inalterado, o que sugere que o provete diverge um pouco quanto à sua rigidez elástica.

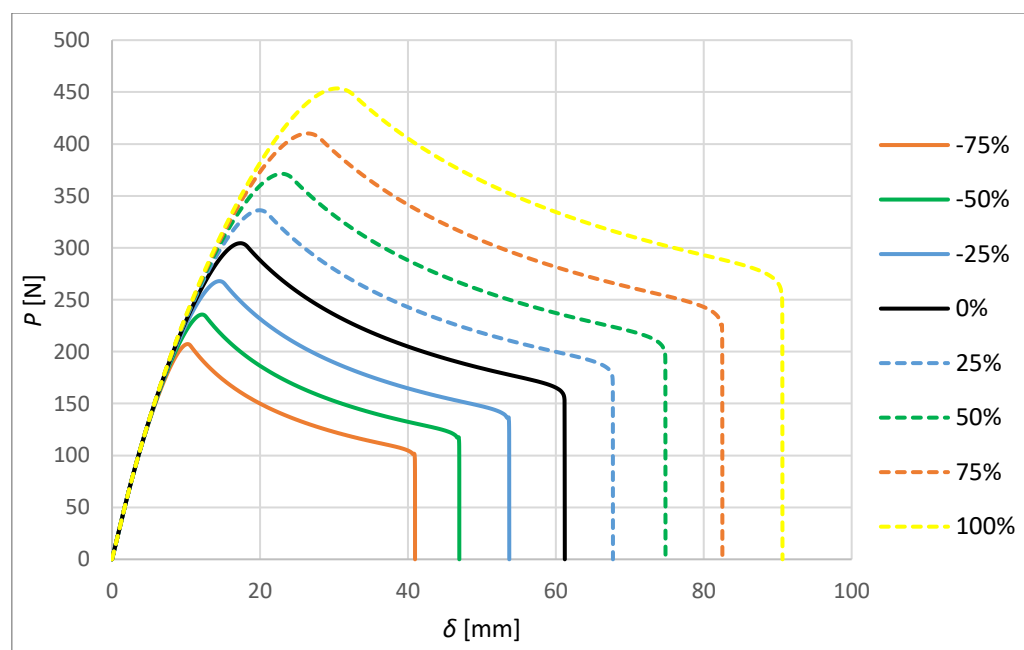


Figura 114 - Variação de G_{IC} nas curvas P - δ para os provetes DCB

Na Figura 115 são apresentadas as curvas P - δ influenciadas pela variação de t_n^0 , sendo possível concluir que, com o aumento do parâmetro em questão, a rigidez do provete também aumenta antes de $P_{\text{máx}}$. Observando o declive da curva, também se deve realçar o facto de a influência de t_n^0 ser cada vez menor, quanto maior for o valor deste parâmetro. É possível tirar dois factos contrastantes a partir da Figura 115. Salienta-se o pormenor de que, para valores de t_n^0 superiores a 0%, ocorre uma diminuição bastante significativa da rigidez antes de se atingir $P_{\text{máx}}$, sugerindo a ocorrência de um amaciamento prematuro assinalável. Por outro lado, para valores de t_n^0 inferiores a 0%, acontece o contrário, com a rigidez elástica a registar um aumento. Por último, o $\delta_{\text{máx}}$ varia de acordo com o aumento de t_n^0 .

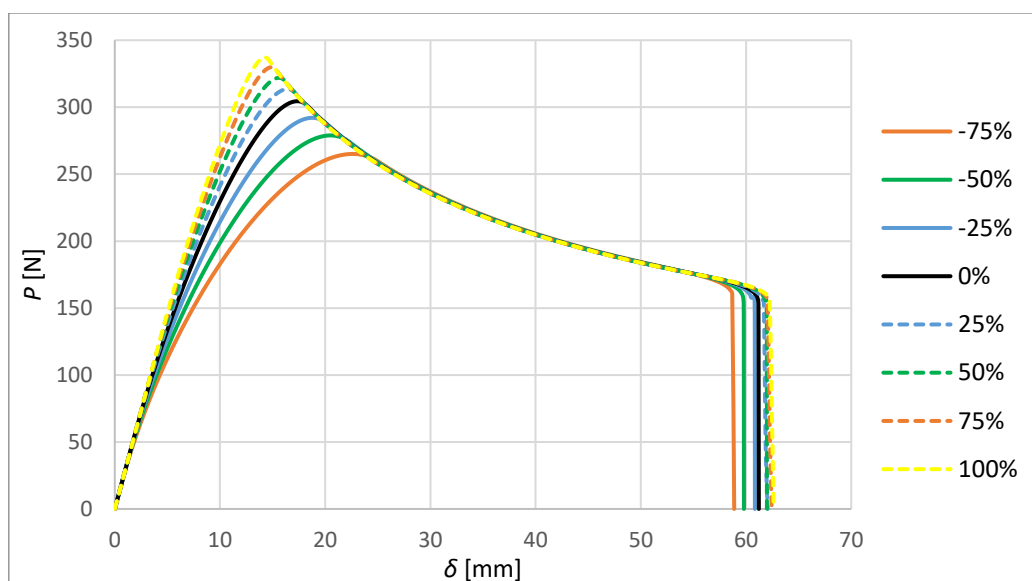


Figura 115 - Variação de t_n^0 nas curvas P - δ para os provetes DCB

3.2.5.2 Ensaio ENF

Realizada a análise de sensibilidade dos parâmetros coesivos do ensaio DCB, repete-se agora o mesmo procedimento para o ensaio ENF, embora com variação de parâmetros diferentes. A Tabela 44 apresenta as variáveis que servem de entrada para o *software* Abaqus® e seus respectivos valores. Os parâmetros que variam para o ensaio ENF são G , G_{IIC} e t_s^0 e é estudado o efeito que a variação possa ter nas curvas P - δ . Salienta-se o facto de G variar em conformidade com E , mantendo a mesma razão de proporção para todas as variações, tendo por base a Lei de Hooke para materiais isotrópicos.

Tabela 44 - Variação dos parâmetros numéricos de entrada do adesivo SikaForce® 803 para ensaios ENF

	-75%	-50%	-25%	0%	25%	50%	75%	100%
G	115,38	230,77	346,15	461,54	576,92	692,31	807,69	923,08
G_{IIC}	7,71	15,42	23,12	30,83	38,54	46,25	53,95	61,66
t_s⁰	1,26	2,52	3,78	5,04	6,30	7,56	8,82	10,08

A análise de sensibilidade é principiada pelo estudo da variação de G , através da observação da Figura 116. Não há muitas ilações a tirar uma vez que, de acordo com as curvas P - δ da figura anteriormente mencionada, não existe qualquer influência de G no comportamento das respetivas curvas. Todos os parâmetros se mantêm iguais, além do declive e, por consequência, a rigidez elástica.

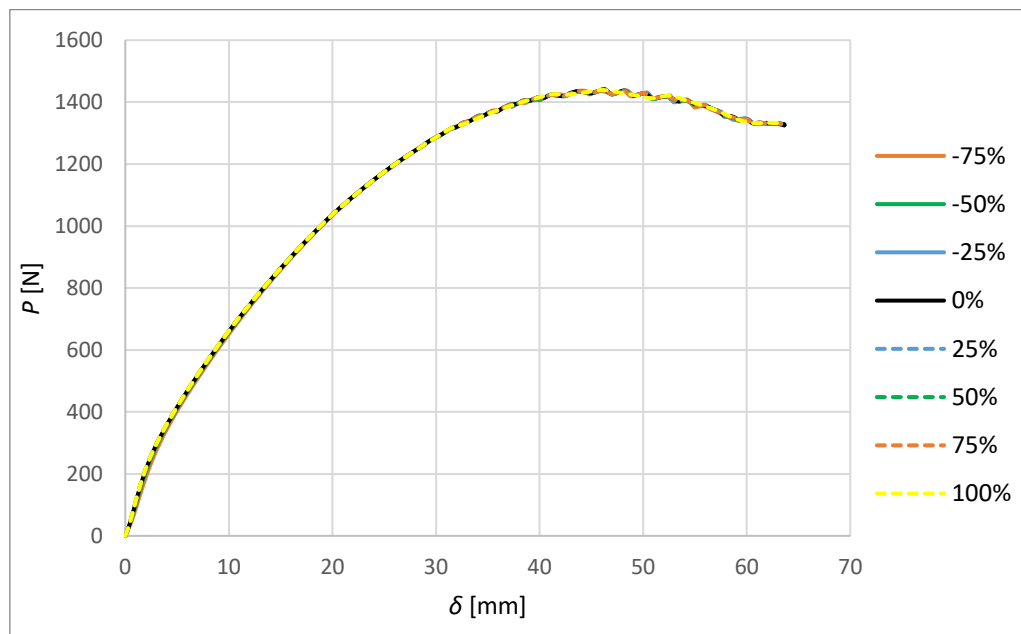


Figura 116 - Variação de G nas curvas P - δ para os provetes ENF

A Figura 117 demonstra a variação de G_{IIC} ao longo da variação do mesmo parâmetro. Fazendo um paralelismo com G_{IC} do ensaio DCB, as curvas P - δ não exibem a mesma tendência, e que seria esperada. De facto, era expectável que a variação de G_{IIC} tivesse um impacto assinalável nas curvas e, mais especificamente, que $P_{máx}$ e $\delta P_{máx}$ aumentassem e diminuíssem da mesma forma que se aumenta ou diminui a variável em questão. Em vez disso, observa-se um desvio considerável de $P_{máx}$ e diminuição do declive da curva P - δ de -75% para as restantes, as quais são bastante homogêneas. De resto, e embora todas as curvas P - δ sejam semelhantes, excetuando a de -75%, nota-se um ligeiro incremento de $P_{máx}$ em conformidade com o aumento de G_{IIC} . A possível razão para não existirem elevadas discrepâncias entre as variações, além da -75%, pode ter a ver com o facto de G_{IIC} consistir em valores demasiado elevados, o que realmente acontece como demonstra a Tabela 44, e o *software* Abaqus® ter dificuldades em reconhecer tais valores. Por outras palavras, valores de G_{IIC} acima de 23,12 N/mm podem não ter muito impacto no comportamento das curvas P - δ , uma vez que estes valores já são demasiado elevados.

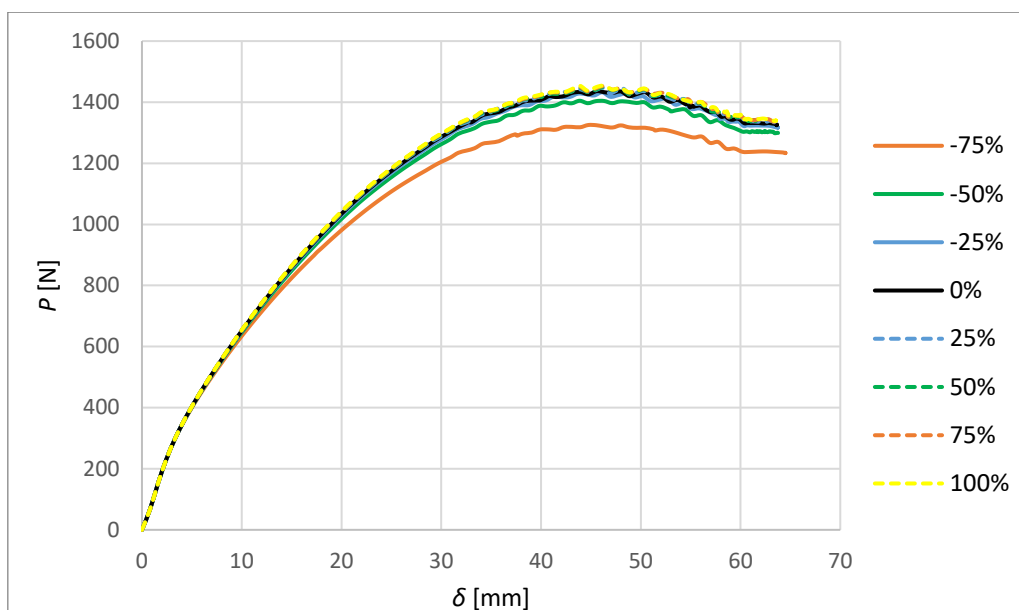


Figura 117 - Variação de G_{IIc} nas curvas P - δ para os provetes ENF

Através da Figura 118, é possível perceber o efeito que a variação de t_s^0 tem nas curvas P - δ , sendo claro que tem uma clara influência no $P_{máx}$ e na rigidez elástica. O aumento de t_s^0 provoca um aumento de $P_{máx}$ de forma coerente, embora não proporcional, além de aumentar a rigidez elástica. Uma diminuição de t_s^0 faz com que $P_{máx}$ e a rigidez diminuam, também estes de forma congruente. Por fim, regista-se uma ligeira diminuição de $\delta_{máx}$ e $\delta P_{máx}$ com o aumento de t_s^0 .

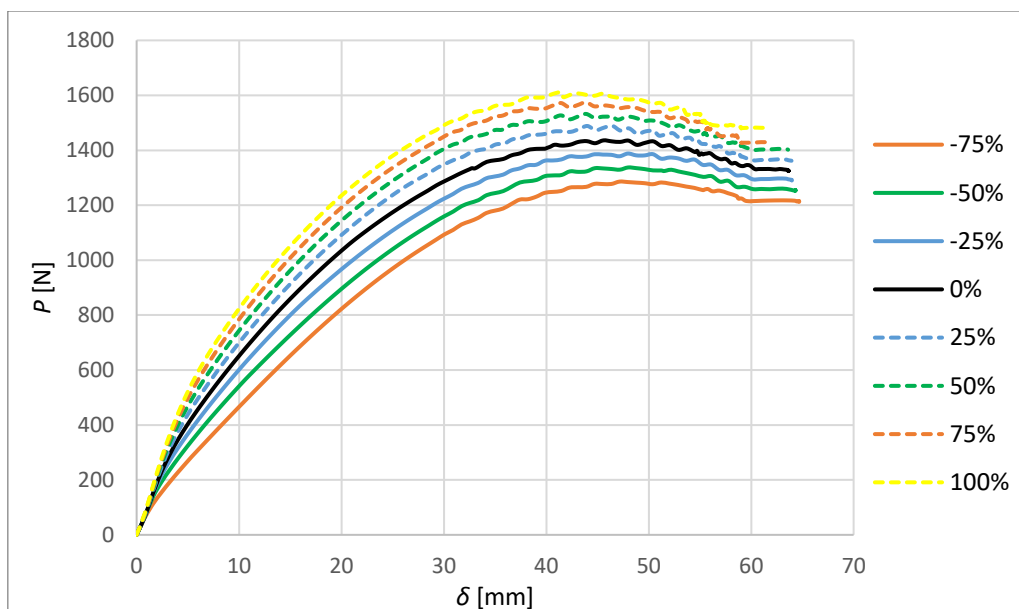


Figura 118 - Variação de t_s^0 nas curvas P - δ para os provetes ENF

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 Conclusões

4.2 Proposta de trabalhos futuros

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 CONCLUSÕES

A realização deste trabalho consistiu na modelação numérica do comportamento de juntas adesivas estruturais com o adesivo SikaForce® 803 reforçado através de microfibras de vidro. A caracterização da fratura à tração e ao corte foi realizada através dos ensaios DCB e ENF, respetivamente, para as concentrações mássicas de fibra de vidro de 0%, 0,15%, 0,35% e 0,55%. As conclusões obtidas são de seguida apresentadas divididas por tópicos:

- Primeiramente, procedeu-se ao estudo do tamanho de elemento da malha, através do $P_{máx}$, $\delta P_{máx}$ e $\delta_{máx}$ (apenas ensaio DCB):
 - Para o ensaio DCB, denotou-se uma diminuição geral de $P_{máx}$ com um crescente refinamento da malha, com uma estabilização para dimensões inferiores a 0,2 mm. Com a observação das curvas de $\delta P_{máx}$, os valores mantêm-se constantes para o tamanho de elemento igual ou superior a 0,5 mm. Para $\delta_{máx}$, existe uma razoável estabilização dos valores quando a dimensão do elemento toma valores entre 0,5 mm e 1 mm. Conclui-se assim que o tamanho ideal devia ser 0,2 mm, uma vez que este valor não exige elevado tempo computacional e ao mesmo tempo garante uma boa precisão na obtenção das curvas P - δ ;
 - O estudo da convergência da malha do ensaio ENF permitiu concluir que o tamanho do elemento aceitável é de 0,5 mm. Analisando as curvas obtidas para $P_{máx}$, verifica-se uma menor divergência deste parâmetro quando o tamanho do elemento é inferior a 0,5 mm. Quanto ao $\delta P_{máx}$, é evidente pelas curvas que existe uma estabilidade de valores para dimensões do elemento entre 0,5 mm e 1 mm.
- Posteriormente procedeu-se à validação das leis coesivas triangulares pela comparação entre as curvas P - δ numéricas e experimentais. Os resultados obtidos pelo MDC dos ensaios DCB exibem uma rigidez elástica muito idêntica à experimental. Em relação aos ensaios ENF, a rigidez das curvas numéricas é ligeiramente diferente da rigidez observada nas curvas experimentais:
 - Os provetes DCB com 0% de fibra de vidro apresentam valores de desvio aceitáveis de $P_{máx}$, $\delta P_{máx}$ e $\delta_{máx}$. Desde logo, o erro médio de $P_{máx}$ regista apenas 1,60%. Porém, o erro torna-se maior para $\delta P_{máx}$ e $\delta_{máx}$, registando 22,79% e 25,12%, respetivamente. Com 0,15% de fibra de vidro, $P_{máx}$ aumenta bastante em relação à série anterior. Porém,

observou-se uma maior discrepância dos valores de $P_{\text{máx}}$, $\delta P_{\text{máx}}$ e $\delta_{\text{máx}}$, sendo que estes parâmetros registam valores de 32,78%, 31,60% e 28,47%, respetivamente. Os erros médios de $P_{\text{máx}}$ e $\delta P_{\text{máx}}$ da série de 0,35% de fibra de vidro são semelhantes, com valores de 5,14% e 5,95%, respetivamente. Contudo, $\delta_{\text{máx}}$ aumenta bastante, alcançando um erro médio de 41,99%. Para 0,55% de fibra de vidro, verifica-se uma semelhança razoável entre as curvas P - δ numéricas e experimentais. Os erros médios de $P_{\text{máx}}$ e $\delta_{\text{máx}}$ são aceitáveis, rondando 21,05% e 7,46%, respetivamente. Todavia, $\delta P_{\text{máx}}$ atinge um erro médio de 120,14%;

- Para os ensaios ENF e 0% de fibra de vidro, verifica-se uma maior discrepância entre as curvas numéricas e experimentais, ao contrário dos provetes DCB. O erro de $P_{\text{máx}}$ é bastante aceitável, situando-se em 0,57%, enquanto as divergências de $\delta P_{\text{máx}}$ e $\delta_{\text{máx}}$ aumentam para 26,63% e 13,26%, respetivamente. A análise da concentração de 0,15% de fibra de vidro revela erros inferiores à concentração anterior, no que concerne $P_{\text{máx}}$, $\delta P_{\text{máx}}$ e $\delta_{\text{máx}}$, registando apenas 1,94%, 0,72% e 1,93%, respetivamente. Deve-se salientar o facto de $P_{\text{máx}}$ ter aumentado em cerca de 300 N em relação à série de 0% de fibra de vidro. Para 0,35% de fibra de vidro, observa-se alguma discrepância entre a curva P - δ numérica e experimental. O erro de $P_{\text{máx}}$ é bastante satisfatório, embora o desvio para $\delta P_{\text{máx}}$ e $\delta_{\text{máx}}$ aumente (14,20% e 14,14%, respetivamente). O valor de $P_{\text{máx}}$ estabiliza nesta série, sendo praticamente igual à da concentração de 0,15%. Finalmente, para 0,55% de fibra de vidro observa-se uma boa semelhança durante a propagação da fenda entre as curvas P - δ numéricas e experimentais, embora na região inicial exista alguma divergência. Os erros de $P_{\text{máx}}$ e $\delta_{\text{máx}}$ são baixos, demonstrando erros médios de 3,92% e 6,50%, respetivamente, apesar de a diferença entre $\delta P_{\text{máx}}$ aumentar para 15,97%, sendo ainda assim aceitável.
- De seguida realizou-se um estudo para aferir a sensibilidade de vários parâmetros coesivos, tais como E , G , G_{IC} , G_{IIC} , t_n^0 e t_s^0 , no comportamento dos modelos numéricos criados para os ensaios efetuados:
 - Conclui-se que E não tem virtualmente influência no resultado dos modelos numéricos, variando apenas $\delta_{\text{máx}}$ com o consequente aumento do mesmo parâmetro. Em relação a G , é evidente o facto de que a variação deste parâmetro não apresenta influência visível;
 - A variação de G_{IC} tem elevada influência no comportamento e resultados das curvas P - δ . Denota-se um aumento claro de $P_{\text{máx}}$, $\delta P_{\text{máx}}$ e $\delta_{\text{máx}}$, à medida que se aumenta G_{IC} . G_{IIC} apenas tem impacto assinalável para valores inferiores a cerca de 15 N/mm, uma vez que para importâncias maiores a influência decresce;
 - A variação entre 0% e 100% de t_n^0 permite concluir que existe um aumento da rigidez antes de se atingir $P_{\text{máx}}$. Por outro lado, para valores

de variação de t_n^0 negativos, ocorre uma diminuição acentuada da rigidez, o que provoca um amaciamento prematuro assinalável do provete. Com a análise de t_s^0 , entende-se que o aumento desta variável provoca um incremento de $P_{máx}$ de forma congruente e não proporcional, além de aumentar a rigidez elástica. Pelo contrário, a diminuição de t_s^0 leva a uma diminuição de $P_{máx}$.

- Em suma, a realização desta dissertação tornou possível a compreensão do efeito do reforço de microfibras de vidro no adesivo SikaForce® 803. Parâmetros como o E e G demonstraram um contínuo crescimento, em consonância com a adição de fibra de vidro, enquanto t_n^0 e t_s^0 variaram muito ligeiramente e de forma não-proporcional. Salienta-se o facto de os valores de G_{IC} demonstrarem uma incrementação bastante linear e proporcional com o aumento das concentrações do reforço. Por último, G_{IIC} aumenta ligeiramente com o crescente reforço da fibra de vidro, embora estabilize entre 0,15% e 0,35% de concentração do aditivo em questão.

4.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Com sugestão para propostas de trabalhos futuros, apresentam-se as seguintes indicações:

- Realizar o mesmo estudo comparativo com utilização de reforço e adesivo diferentes, mas com concentrações iguais;
- Substituição do ensaio ENF pelo 4ENF para melhorar a estabilidade na propagação da fenda;
- Uso de uma lei coesiva triangular mais aproximada ao tipo de adesivo em questão (tipo trapezoidal), para melhorar os resultados obtidos pelo ensaio ENF no que concerne ao ajuste entre curvas P - δ numéricas e experimentais;
- Testar as diferentes concentrações de fibra de vidro em diferentes geometrias de junta em modo misto para comprovar a melhoria da resistência com a adição das fibras de vidro ao adesivo.

REFERÊNCIAS

5 REFERÊNCIAS

1. Campilho, R.D.S.G., *Repair of composite and wood structures*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2009.
2. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhaes, e M.F.S. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. Porto: Publindústria Portugal, 2007.
3. Deng, J. e M.M.K. Lee, *Effect of plate end and adhesive spew geometries on stresses in retrofitted beams bonded with a CFRP plate*. Composites Part B: Engineering, 2008. **39**(4): p. 731-739.
4. Teixeira, F.G. e L.F.M. da Silva, *Study of Influence of Substrate Topography on Stress Distribution in Structural Adhesive Joints*. The Journal of Adhesion, 2011. **87**(7-8): p. 671-687.
5. Da Silva, L.F., A. Öchsner, e R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011, Heidelberg: Springer Science & Business Media.
6. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2007.
7. Neves, L.F.R., *Utilização do integral-J para medição da tenacidade à fratura de adesivos estruturais em modo misto*. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal, 2020.
8. Cognard, P., *Adhesives and sealants: basic concepts and high tech bonding*. Vol. 2. Amesterdão: Elsevier, 2005.
9. DELO. Aerospace Adhesives. [10/01/21]; Disponível em: <https://www.delo-adhesives.com/en/applications/aerospace-adhesives/>.
10. ASTM 5573-99. *Standard practice for classifying failure modes in fiber-reinforced-plastic (FRP) joints*. 2002: ASTM International.
11. Fernandes, T.A.B., *Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas*. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal, 2014.
12. Mallick, K.L.P., S. K., *Structural Adhesive Joints: Design, Analysis and Testing*. 2020: WILEY, Nova Jérĩa.
13. Da Silva, L.F., et al., *Testing adhesive joints: best practices*. 2012: John Wiley & Sons, Nova Jérĩa.
14. AFNOR, *NF T76-142 - Méthode de préparation de plaques d'adhésifs structuraux pour la réalisation d'éprouvettes d'essai de caractérisation*. 1988.
15. Standardization, I.I.O.f., *ISO 527-2: Determination of tensile properties—Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics*. 1993.
16. Da Silva, L.F., R. Adams, e M. Gibbs, *Manufacture of adhesive joints and bulk specimens with high-temperature adhesives*. International journal of adhesion and adhesives, 2004. **24**(1): p. 69-83.
17. Broughton, B. e M. Gower, *Measurement good practice guide No. 47 preparation and testing of adhesive joints*. Teddington, 2001.
18. Pinto, S.D.M., *Determinação das propriedades mecânicas à tração de adesivos estruturais frágeis e dúcteis*. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal, 2013.
19. ASTM D1002-10, *Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)*. 2019: ASTM International.

20. da Silva, L., et al., *Projecto fim de Curso-Avaliação experimental e numérica do Thick Adherend Shear Test*. ISEP.
21. ASTM D5379/D5379M-12-Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method. 2012, ASTM International West Conshohocken.
22. ISO 11003-2: Determination of shear behaviour of structural adhesives–Part 2: Tensile test method using thick adherends. 2001.
23. Faneco, T.M.d.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal, 2014.
24. Monteiro, J., et al., *Experimental estimation of the mechanical and fracture properties of a new epoxy adhesive*. Applied Adhesion Science, 2015. **3**(1): p. 25.
25. Blackman, B., A. Kinloch, e M. Paraschi, *The determination of the mode II adhesive fracture resistance, GIIC, of structural adhesive joints: an effective crack length approach*. Engineering Fracture Mechanics, 2005. **72**(6): p. 877-897.
26. Bennati, S., et al. *An enhanced beam model of the Asymmetric Double Cantilever Beam (ADCB) test for composite laminates*. in *8th Seminar on Experimental Techniques and Design in Composite Materials*. 2007, Cagliari, Itália.
27. Bennati, S., et al., *An enhanced beam-theory model of the asymmetric double cantilever beam (ADCB) test for composite laminates*. Composites Science and Technology, 2009. **69**(11): p. 1735-1745.
28. Da Silva, L., V. Esteves, e F. Chaves, *Fracture toughness of a structural adhesive under mixed mode loadings*. International Scientific Journal, 2011. **42**(5): p. 460-470.
29. Nunes, F.A.A. e R.D.S.G. Campilho, *Mixed-mode fracture analysis of adhesively-bonded joints using the ATDCB test specimen*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018. **85**: p. 58-68.
30. Yoshihara, H., *Initiation and propagation fracture toughness of solid wood under the mixed Mode I/II condition examined by mixed-mode bending test*. Engineering Fracture Mechanics, 2013. **104**: p. 1-15.
31. Oliveira, J.M.Q., et al., *Numerical analysis of the MMB test for mixed-mode I/II wood fracture*. Composites Science and Technology, 2007. **67**(9): p. 1764-1771.
32. Nemati Giv, A., et al., *Effect of reinforcements at different scales on mechanical properties of epoxy adhesives and adhesive joints: a review*. Journal of Adhesion, 2018. **94**(13): p. 1082-1121.
33. You, M., et al., *Effect of metal as part of fillet on the tensile shear strength of adhesively bonded single lap joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2003. **23**(5): p. 365.
34. Da Silva, L.F. e R. Adams, *Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion, 2007. **27**(3): p. 227-235.
35. Da Silva, L.F. e M.J.C. Lopes, *Joint strength optimization by the mixed-adhesive technique*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(5): p. 509-514.
36. Fitton, M.D. e J. Broughton, *Variable modulus adhesives: an approach to optimised joint performance*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2005. **25**(4): p. 329-336.
37. Khayal, O.M.E.S., *Literature review on imperfection of composite laminated plates*. Journal of Microscopy and Ultrastructure, 2017. **5**(3): p. 119-122.
38. Zheng, Y., Y. Zheng, e R. Ning, *Effects of nanoparticles SiO₂ on the performance of nanocomposites*. Journal of Materials Science Letters, 2003. **57**(19): p. 2940-2944.

39. Kaboorani, A. e B. Riedl, *Nano-aluminum oxide as a reinforcing material for thermoplastic adhesives*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2012. **18**(3): p. 1076-1081.
40. Labulo, A.H., et al., *Advances in carbon nanotubes as efficacious supports for palladium-catalysed carbon-carbon cross-coupling reactions*. Journal of Materials Science, 2017. **52**(16): p. 9225-9248.
41. Kalpakjian, S., S. Schmid, e V. Sekar, *Manufacturing Engineering and Technology*. 7th edition ed. 2013: Pearson.
42. Saleh, H., *Polyester*. 2012: IntechOpen.
43. Prashanth, S., et al., *Fiber reinforced composites-a review*. Journal of Materials Science and Engineering, 2017. **6**(341): p. 2169.
44. Nemati Giv, A., et al., *The effect of orientations of metal macrofiber reinforcements on mechanical properties of adhesively bonded single lap joints*. The Journal of Adhesion, 2018. **94**(7): p. 541-561.
45. Reynaud, E., et al., *Nanofillers in polymeric matrix: a study on silica reinforced PA6*. Polymer Journal, 2001. **42**(21): p. 8759-8768.
46. Buggy, M., G. Bradley, e A. Sullivan, *Polymer-filler interactions in kaolin/nylon 6, 6 composites containing a silane coupling agent*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005. **36**(4): p. 437-442.
47. Ayatollahi, M., S. Shadlou, e M. Shokrieh, *Mixed mode brittle fracture in epoxy/multi-walled carbon nanotube nanocomposites*. Engineering Fracture Mechanics, 2011. **78**(14): p. 2620-2632.
48. Shokrieh, M.M., A.R. Kefayati, e M. Chitsazzadeh, *Fabrication and mechanical properties of clay/epoxy nanocomposite and its polymer concrete*. Materials & Design, 2012. **40**: p. 443-452.
49. Ayatollahi, M.R., et al., *Mechanical and electrical properties of epoxy/multi-walled carbon nanotube/nanoclay nanocomposites*. Iranian Polymer Journal, 2011.
50. Spanoudakis, J. e R. Young, *Crack propagation in a glass particle-filled epoxy resin*. Journal of Materials Science and Engineering, 1984. **19**(2): p. 473-486.
51. Adachi, T., et al., *Fracture toughness of nano-and micro-spherical silica-particle-filled epoxy composites*. Journal of Acta Materialia, 2008. **56**(9): p. 2101-2109.
52. Barbosa, A., et al., *Methods to increase the toughness of structural adhesives with micro particles: an overview with focus on cork particles*. Materials Science and Engineering Technology, 2016. **47**(4): p. 307-325.
53. Alessi, S., et al., *Accelerated ageing due to moisture absorption of thermally cured epoxy resin/polyethersulphone blends. Thermal, mechanical and morphological behaviour*. Journal of Polymer Degradation and Stability, 2011. **96**(4): p. 642-648.
54. Bal, S. e S. Saha, *Effect of sea and distilled water conditioning on the overall mechanical properties of carbon nanotube/epoxy composites*. International Journal of Damage Mechanics, 2017. **26**(5): p. 758-770.
55. Duan, K., X. Hu, e Y.-W. Mai, *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2004. **18**(1): p. 39-53.
56. Ji, G., et al., *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47**(18): p. 2445-2458.
57. Pardoen, T., et al., *Constraint effects in adhesive joint fracture*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005. **53**(9): p. 1951-1983.
58. Xie, D. e A.M. Waas, *Discrete cohesive zone model for mixed-mode fracture using finite element analysis*. Journal of Engineering fracture mechanics, 2006. **73**(13): p. 1783-1796.
59. Kumar, S. e K.L. Mittal, *Advances in modeling and design of adhesively bonded systems*. 2013: John Wiley & Sons, Nova Jérsea.
60. Liljedahl, C.D.M., et al., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1): p. 147-161.

61. De Moura, M., et al., *Prediction of compressive strength of carbon–epoxy laminates containing delamination by using a mixed-mode damage model*. Journal of Composite Structures, 2000. **50**(2): p. 151-157.
62. Jousset, P. e M. Rachik, *Comparison and evaluation of two types of cohesive zone models for the finite element analysis of fracture propagation in industrial bonded structures*. Journal of Engineering Fracture Mechanics, 2014. **132**: p. 48-69.
63. Campilho, R.D., M. De Moura, e J. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
64. Warriar, A., et al., *The effect of adding carbon nanotubes to glass/epoxy composites in the fibre sizing and/or the matrix*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010. **41**(4): p. 532-538.
65. Mariam, M., et al., *Tensile and fatigue properties of single lap joints of aluminium alloy/glass fibre reinforced composites fabricated with different joining methods*. Journal of Composite Structures, 2018. **200**: p. 647-658.
66. Alomayri, T., *The microstructural and mechanical properties of geopolymer composites containing glass microfibres*. Ceramics International, 2017. **43**(5): p. 4576-4582.
67. Kanani, A.Y., et al., *Fracture mechanisms of hybrid adhesive bonded joints: Effects of the stiffness of constituents*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020. **102**: p. 102649.
68. Campilho, R.D., et al., *Strength prediction of single-and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
69. SikaForce, *SikaForce® 803 L45 - Structural Elastic 2-component Polyurethane Adhesive*. Ficha técnica.
70. Van der Woude, J. e E. Lawton, *Composite design and engineering*, in *Fiberglass and Glass Technology*. 2010, Springer: Heidelberg. p. 125-173.
71. LANXESS, *Microfibra de vidro MF 7980*. Ficha técnica.
72. Figueiras, M.Â.P., *Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural reforçado com microfibras de cortiça*. Tese de Mestrado. ISEP, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal, 2020.
73. Antunes, R.P.R.O., *Estudo numérico do efeito da espessura do adesivo na tenacidade à tração de juntas adesivas*. Tese de Mestrado. ISEP, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal, 2020.
74. De Moura, M., et al., *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. 2008. **68**(10-11): p. 2224-2230.
75. Chaves, F.J.P., *Fracture mechanics applied to the design of adhesively bonded joints*. Tese de Doutoramento. FEUP, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2014.
76. Gholami, R., H. Khoramishad, e L.F.M. da Silva, *Glass fiber-reinforced polymer nanocomposite adhesive joints reinforced with aligned carbon nanofillers*. Composite Structures, 2020. **253**: p. 112814.
77. Campilho, R.D.S.G., et al., *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **44**: p. 48-56.
78. Kafkalidis, M. e M. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
79. Chandra, N., et al., *Some issues in the application of cohesive zone models for metal–ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
80. Chen, J., *Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and repaired sandwich panel by decohesion models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15**(5): p. 429-442.

81. Allix, O. e A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111-140.
82. Alfano, G. e M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International Journal For Numerical Methods In Engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
83. Pinto, A.M.G., et al., *Single-lap joints of similar and dissimilar adherends bonded with an acrylic adhesive*. 2009. **85**(6): p. 351-376.
84. Rocha, R. e R. Campilho, *Evaluation of different modelling conditions in the cohesive zone analysis of single-lap bonded joints*. The Journal of Adhesion, 2018. **94**(7): p. 562-582.
85. Campilho, R.D., M. De Moura, e J. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
86. Lee, E.-H., T.B. Stoughton, e J.W. Yoon, *A yield criterion through coupling of quadratic and non-quadratic functions for anisotropic hardening with non-associated flow rule*. International Journal of Plasticity, 2017. **99**: p. 120-143.
87. Da Silva, L.F. e R.D. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints*, in *Advances in numerical modeling of adhesive joints*. 2012, Springer: Heidelberg. p. 1-93.