



# Estudo da resistência de ligações adesivas usadas no fabrico de embarcações de canoagem

JOÃO CARLOS MOREIRA SANTOS

novembro de 2022

# ESTUDO DA RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES ADESIVAS USADAS NO FABRICO DE EMBARCAÇÕES DE CANOAGEM

João Carlos Moreira Santos

1170650

**2022**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica





# **ESTUDO DA RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES ADESIVAS USADAS NO FABRICO DE EMBARCAÇÕES DE CANOAGEM**

João Carlos Moreira Santos

1170650

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 Doutor Kouider Madani.

**2022**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica





# JÚRI

## **Presidente**

Doutor Hernâni Miguel Reis Lopes

Professor Coordenador, ISEP

## **Orientador**

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

## **Coorientador**

Doutor Kouider Madani

Professor Associado, UDL-SBA

## **Arguente**

Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis

Professor Associado, FCTUC



## AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação de mestrado foi sem dúvida uma longa jornada que contou com vários desafios, experiências, percalços e alegrias, que por fim se traduziram num sentimento de superação. Todo este caminho contou com a ajuda direta e indireta de várias pessoas, às quais gostaria de deixar algumas palavras de agradecimento, em particular:

Ao Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, orientador desta dissertação e dotado de um elevado conhecimento e rigor científico. Agradeço o seu apoio incansável, disponibilidade, a vontade de partilhar o seu conhecimento e por ter acreditado em mim.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), por ter sido a minha casa nestes últimos 5 anos, por todos os ensinamentos dentro e fora de horas, todas as experiências que me permitiu vivenciar e todas as amizades formadas ao longo destes anos.

Aos meus amigos, por todos os momentos que partilhamos, todas as histórias que ficam para contar e todas as churrascadas já feitas e que ainda estão para realizar. Embora que não mencione nenhum nome em específico, vocês sabem bem quem são.

À minha família que está presente e já não se encontra presente fisicamente, um eterno obrigado por estarem lá para mim, por terem estado lá para mim e sem dúvida por serem uma influência enorme no que sou hoje.

Às minhas irmãs, Renata e Rita, agradeço do coração, pelo apoio e dedicação que me deram, por se mostrarem interessadas no meu bem-estar, por todas os momentos que vivemos juntos e simplesmente pela vossa amizade comigo. São sem dúvida um exemplo para mim. Agradeço também aos meus cunhados por toda e qualquer ajuda nestes últimos anos.

Por último, dirijo um agradecimento especial aos meus pais, por todos os sacrifícios que fizeram para que isto fosse possível, pela educação que me deram e pelo amor que tem comigo. Sem vocês nada disto seria possível e palavras não chegam para mostrar o orgulho e amor que tenho em vos ter como meus pais!



## PALAVRAS-CHAVE

Canoagem, Juntas adesivas, Adesivo estrutural, Compósitos, Modelação numérica, Método de elementos finitos, Modelos de dano coesivo.

## RESUMO

A canoagem é uma modalidade náutica que surgiu na história há milhares de anos simplesmente como um meio de sobrevivência. Nos dias de hoje, esta modalidade é praticada em todo o mundo, como meio de lazer ou competição. Face à vontade de melhorar a qualidade de construção e desempenho das embarcações, atualmente o seu fabrico permanece centrado na utilização de materiais compósitos. Apesar de existirem inúmeras formas de unir os diferentes componentes que existem, a que mais se destaca é a ligação adesiva. Por outro lado, para uma empresa de fabrico destas embarcações se manter competitiva no mercado, é necessária a melhoria contínua destas ligações em termos de resistência e custo de fabrico.

Nesta dissertação é estudada numericamente uma ligação adesiva existente numa embarcação de canoagem, mais concretamente, a união entre o casco e o *deck* de um *kayak*. Para avaliar o desempenho desta junta adesiva é necessário conhecer os tipos de materiais implícitos neste tipo de junta, assim como os principais parâmetros geométricos. Inicialmente, o adesivo utilizado foi testado à tração com provetes de adesivo maciço e os respetivos dados tratados, para obter os parâmetros materiais necessários à análise. Para concretizar o objetivo da dissertação, é efetuada uma análise numérica, na qual é testado o método atual de união existente, e ainda analisadas diferentes alterações geométricas e considerados diferentes tipos de adesivos que possam trazer a esta ligação adesiva melhores propriedades. O trabalho numérico consistiu numa análise elástica de tensões da camada de adesivo e previsão de rigidez e resistência, por modelos de dano coesivo (MDC), utilizando-se o *software* ABAQUS®. Para utilização do MDC para estudo das diferentes configurações de junta, antes foi realizada uma validação da técnica com dados experimentais obtidos em trabalhos anteriores.

Este estudo numérico permitiu inicialmente validar com sucesso os MDC e, de seguida, analisar numericamente a influência das alterações geométricas consoante os diferentes tipos de adesivos, possibilitando a verificação de qual geometria se adapta melhor a cada tipo de adesivo considerado.



## KEYWORDS

Canoeing, Adhesive joints, Structural adhesive, Composites, Numerical modeling, Finite element method, Cohesive zone model.

## ABSTRACT

Canoeing is a nautical sport that appeared in history thousands of years ago simply as a means of survival. Nowadays, this sport is practiced all over the world as a hobby or as a means of competition. Given the desire to improve the quality of construction and performance of boats, currently their manufacture is focused on the use of composite materials. Although there are countless ways to join the different components that exist, the one that stands out the most is adhesive bonding. On the other hand, for a manufacturing company of these boats to remain competitive in the market, it is required the continuous improvement of these joints in terms of strength and manufacturing cost.

In this dissertation, an adhesive joint existing in a canoeing boat is numerically studied, more specifically the joint between the hull and the deck of a kayak. To evaluate the performance of this adhesive joint, it is necessary to know the types of materials implicit in this type of joint, as well as the main geometric parameters. Initially, the adhesive used was tensile tested with bulk adhesive specimens and the respective data was processed to obtain the material parameters required for the analysis. To achieve the goal of this dissertation, a numerical analysis is performed, in which the existing joint configuration was tested, different geometric changes were analyzed and different types of adhesives that can bring improved properties to this adhesive bond were considered. The numerical work consisted of an elastic stress analysis of the adhesive layer and prediction of stiffness and strength, by cohesive zone modelling (CZM), using the ABAQUS® software. To use the CZM to study the different joint configurations, a prior validation of the technique was performed with experimental data obtained in a previous work.

Initially, this numerical study enabled to successfully validate the CZM and, then, to numerically evaluate the influence of geometric changes according to different adhesive types, allowing the verification of which geometry best adapts to each adhesive type that was considered.



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

<b>AISI</b>	<i>American Iron and Steel Institute</i>
<b>2D</b>	Bidimensional
<b>3D</b>	Tridimensional
<b>ANOVA</b>	<i>Analysis of variance</i>
<b>ASTM</b>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<b>C</b>	Canoa
<b>C1</b>	Canoa individual
<b>C2</b>	Canoa dupla
<b>C4</b>	Canoa quádrupla
<b>CLS</b>	<i>Critical Longitudinal Strain</i>
<b>COH2D4</b>	<i>Four-node two-dimensional cohesive element</i>
<b>CoV</b>	Coeficiente de variação
<b>CPE4</b>	<i>Four-node plane strain element</i>
<b>DCB</b>	<i>Double-Cantilever Beam</i>
<b>EFG</b>	<i>Element-Free Galerkin</i>
<b>ENF</b>	<i>End-Notched Flexure</i>
<b>FPC</b>	Federação Portuguesa de Canoagem
<b>ICF</b>	<i>International Canoe Federation</i>
<b>IRK</b>	<i>Internationale Repräsentantenschaft Kanusport</i>
<b>ISEP</b>	Instituto Superior de Engenharia do Porto
<b>ISSF</b>	<i>Intensity of Singular Stress Fields</i>
<b>JSS</b>	Junta de sobreposição simples

---

K	<i>Kayak</i>
K1	<i>Kayak individual</i>
K2	<i>Kayak duplo</i>
K4	<i>Kayak quádruplo</i>
MD	Mecânica de dano
MDC	Modelos de dano coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFX	Método de Elementos Finitos eXtendido
MF	Mecânica de Fratura
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica
MM	Métodos sem malha
MMA	Metilmetacrilato
MMC	Mecânica de meios contínuos
OC-1	Canoa de mar individual ( <i>Ocean Canoe</i> )
PAM	<i>Point Assembly Method</i>
PET	Polietileno tereftalato
PIM	<i>Point Interpolation Method</i>
PMMA	Polimetilmetacrilato (acrílico)
PPSU	Polifenilsulfona
PRFC (CFRP)	Polímero reforçado com fibra de carbono
PRFV (GFRP)	Polímero reforçado com fibra de vidro
PU	Poliuretano
PVC	Policloreto de vinila
RCC	<i>Royal Canoe Club</i>
RKP	<i>Reproducing Kernel Particle</i>
RPIM	<i>Radial Point Interpolation Method</i>

---

SMP	<i>Silyl Modified Polymer</i>
SPH	<i>Smoothed Particle Hydrodynamics</i>
SS-1	<i>Surfski individual</i>
SS-2	<i>Surfski duplo</i>
SUP	<i>Stand up paddle</i>
TAST	<i>Thick adherend shear test</i>
TFFV	Técnica do fecho da fenda virtual
UV	Ultravioleta

#### Lista de Unidades

°C	Grau Celsius
%	Porcentagem
°	Grau (ângulo)
cm	Centímetro
cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico
g	Grama
GPa	Giga Pascal
kg	Quilograma
km	Quilómetro
kN	Quilo Newton
m	Metro
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
min	Minuto
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal

---

<b>N</b>	Newton
<b>s</b>	Segundo

---

## Lista de Símbolos

---

<b><math>a</math></b>	Comprimento da fenda
<b><math>a_0</math></b>	Comprimento de pré-fenda inicial
<b><math>B</math></b>	Largura do substrato
<b><math>E</math></b>	Módulo de Young
<b><math>E_1</math></b>	Módulo de Young na direção das fibras
<b><math>E_2</math></b>	Módulo de Young transversal às fibras
<b><math>E_f</math></b>	Módulo de Young das fibras
<b><math>E_m</math></b>	Módulo de Young da matriz
<b><math>G</math></b>	Módulo de elasticidade transversal
<b><math>G_{12}</math></b>	Módulo de elasticidade transversal da camada
<b><math>G_f</math></b>	Módulo de elasticidade transversal das fibras
<b><math>G_{Ic}</math></b>	Tenacidade à tração
<b><math>G_{IIc}</math></b>	Tenacidade ao corte
<b><math>G_m</math></b>	Módulo de elasticidade transversal da matriz
<b><math>G_r</math></b>	Gramagem
<b><math>h</math></b>	Altura mínima do substrato
<b><math>K_{COH}</math></b>	Matriz que relaciona as tensões e deformações em corte e tração dos elementos coesivos
<b><math>L</math></b>	Comprimento do adesivo
<b><math>L_t</math></b>	Comprimento do provete modelizado
<b><math>L_0</math></b>	Comprimento de sobreposição
<b><math>P</math></b>	Força aplicada

---

$P_{\text{máx}}$	Força máxima
$T$	150% da carga máxima
$t$	Espessura
$t_n^0$	Resistência máxima à tração
$t_s^0$	Resistência máxima ao corte
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\nu_{12}$	Coefficiente de Poisson da camada
$V_f$	Fração volúmica das fibras
$\nu_f$	Coefficiente de Poisson das fibras
$\nu_m$	Coefficiente de Poisson da matriz
$\gamma_f$	Deformação de rotura ao corte
$\epsilon_f$	Deformação de rotura à tração
$\eta$	Fator de arranjo
$\rho$	Densidade
$\tau_f$	Tensão de rotura ao corte
$\tau_y$	Tensão de cedência ao corte
$\delta$	Deslocamento
$\delta_n$	Deslocamento em tração
$\delta_n^0$	Deslocamento máximo em tração
$\delta_s$	Deslocamento em corte
$\delta_s^0$	Deslocamento máximo em corte
$\sigma_f$	Tensão de rotura à tração
$\sigma_y$	Tensão limite elástico, de cedência ou de arrancamento na zona de sobreposição, à tração



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Kayak Esquimó [3] .....	9
Figura 2 - Canoa de Índios americanos em 1847 [3] .....	10
Figura 3 - Kayak monolugar (K1) [6] .....	12
Figura 4 - Canoa monolugar (C1) .....	13
Figura 5 - Exemplo de kayak (a) e canoa Va'a (b) [9] .....	14
Figura 6 - Exemplo de K1 (a), C1 (b) e C2 (c) de <i>slalom</i> [9] .....	14
Figura 7 - <i>Surfski</i> monolugar (SS-1) [9] .....	15
Figura 8 - K1 de Águas Bravas [9] .....	16
Figura 9 - Exemplo de embarcação de kayak polo [9] .....	16
Figura 10 - Barco dragão [9] .....	17
Figura 11 - Exemplo da composição interna de uma embarcação de canoagem [24] .....	19
Figura 12 - Exemplo de junta adesiva entre o casco ( <i>hull</i> ) e o <i>deck</i> (linha a vermelho) .....	21
Figura 13 - Exemplo de ligação permanente numa Canoa (linha a vermelho) .....	21
Figura 14 - Exemplo de ligações aparafusadas num <i>kayak</i> .....	22
Figura 15 - Distribuição de tensões em juntas adesivas, rebitadas e soldadas [29] .....	24
Figura 16 - Esforços típicos em juntas adesivas (adaptado de [33]) .....	25
Figura 17 - Tipos de rotura numa ligação adesiva [35] .....	26
Figura 18 - Exemplos de juntas adesivas [36] .....	27
Figura 19 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [57]) .....	32
Figura 20 - Modelo coesivo triangular (adaptado de [70]) .....	34
Figura 21 - Geometria do provete DCB [83] .....	36
Figura 22 - Geometria de provete ENF [83] .....	36
Figura 23 - Distribuição de nós através de um método de previsão com malha (a) e um método sem malha (b) num modelo em duas dimensões (adaptado de [100]) .....	39
Figura 24 – Tipos de ligações adesivas em pequenas embarcações [118] .....	44

Figura 25 - Estrutura em sandwich aplicada ao fabrico de barcos de competição: (a) pele sob núcleo, (b) visão por tomografia de raio-X dos defeitos do adesivo na interface colada [118] .....	44
Figura 26 - Fabrico do casco de um barco de competição [118] .....	45
Figura 27 - Montagem de tubagens para estruturas <i>offshore</i> [118] .....	45
Figura 28 - Tipos de ligações adesivas e esforços [119] .....	46
Figura 29 - Padrões produzidos por gravura mecânica [120] .....	49
Figura 30 - Moldação manual [124] .....	56
Figura 31 - Moldação em saco de vácuo [124] .....	57
Figura 32 - Pós-cura das estruturas <i>sandwich</i> nos moldes, esquerda- <i>deck</i> e direita-casco (K1) .....	58
Figura 33 - Vista em detalhe da estrutura <i>sandwich</i> fabricada (K1).....	59
Figura 34 - Colagem de calhas para pesos e para o finca-pés num K1 .....	59
Figura 35 - Colocação de adesivo na junta .....	60
Figura 36 - Fecho dos moldes por aperto (K1) .....	60
Figura 37 – Aspeto da junta adesiva fabricada após o barco ser retirado do molde: (a) vista exterior, (b) vista interior.....	61
Figura 38 – Aspeto da junta adesiva fabricada após excesso de resina ser aparado e lixado.....	61
Figura 39 - Dimensões dos provetes maciços pela norma NF T 76-142 (dimensões em mm) .....	62
Figura 40 - Placa intermédia do molde (seis cavidades).....	63
Figura 41 - Aplicação de desmoldante no molde .....	63
Figura 42 - Aplicação do adesivo por moldação em molde aberto .....	64
Figura 43 - Aspeto final dos provetes maciços .....	65
Figura 44 - Máquina de ensaios universal Shimadzu Autograph AG-X 100 e computador com <i>software</i> TRAPEZIUM X .....	65
Figura 45 - Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ dos provetes maciços de adesivo .....	67
Figura 46 - Curvas tensão-deformação ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) da liga de alumínio Al 6082-T651 [115] .....	73
Figura 47 - Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ de provetes maciços de Araldite® AV138 [136].....	74
Figura 48 - Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ de provetes maciços de Araldite® 2015 [68].....	75
Figura 49 - Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ de provetes maciços de Sikaforce® 7752 [134] .....	76
Figura 50 - Geometria da configuração de JSS e condições fronteira [134] .....	77
Figura 51 - Curvas $P$ - $\delta$ , dos provetes, obtidas experimentalmente para as JSS com Araldite® AV138 e $L_0=25$ mm [134].....	78

Figura 52 - Curva $P-\delta$ , dos provetes, obtidas experimentalmente para as JSS com Araldite® 2015 e $L_0=80$ mm [134].....	78
Figura 53 - Curvas $P-\delta$ , dos provetes, obtidas experimentalmente para as JSS com Sikaforce® 7752 e $L_0=37,5$ mm [134].....	79
Figura 54 - Valores de $P_{\text{máx méd}}$ e desvio padrão em função de $L_0$ para os diferentes adesivos nas JSS [134] .....	80
Figura 55 – Atribuição das características dos materiais no ABAQUS® [134] .....	80
Figura 56 - Efeito <i>bias</i> na região de sobreposição da JSS [134].....	81
Figura 57 – Efeito <i>bias</i> da malha na região não ligada dos aderentes para JSS [134] .....	81
Figura 58 - Condições fronteira impostas nos modelos numéricos para JSS [134] .....	81
Figura 59 - Comparação de valores $P_{\text{máx}}$ numéricos com valores experimentais da JSS (adaptado de [134]) .....	84
Figura 60 - Configuração das estruturas <i>sandwich</i> numa embarcação .....	85
Figura 61 - Tecido de fibra de carbono ( <i>plain</i> ) .....	86
Figura 62 - Tecido de fibra de vidro.....	87
Figura 63 - Espuma de PVC (núcleo).....	88
Figura 64 - Secção da embarcação usada para o estudo da junta adesiva .....	92
Figura 65 - Vista em corte de uma secção na direção da proa de um K1 (linha azul – <i>deck</i> ; linha vermelha – casco) .....	92
Figura 66 - Tipo de junta presente num K1 .....	92
Figura 67 - Desenho 2D da geometria do provete no software ABAQUS® .....	93
Figura 68 - Desenho 2D da geometria em detalhe no <i>software</i> ABAQUS® .....	94
Figura 69 - Representação das partições no desenho 2D .....	94
Figura 70 - Atribuição do adesivo à respetiva partição .....	96
Figura 71 - Atribuição do núcleo de PVC às respetivas partições.....	96
Figura 72 - Atribuição do CFRP às respetivas partições.....	97
Figura 73 - Atribuição do GFRP à respetiva partição.....	97
Figura 74 - Utilização da ferramenta " <i>Create Instance</i> ".....	98
Figura 75 - Valores de incrementação utilizados no <i>software</i> ABAQUS® para o caso de estudo .....	98
Figura 76 - Condições de encastramento da junta no <i>software</i> ABAQUS® .....	99
Figura 77 - Condições de deslocamento da junta no <i>software</i> ABAQUS®.....	99

Figura 78 - Atribuição dos controlos de malha aos aderentes .....	100
Figura 79 - Atribuição dos controlos de malha ao adesivo.....	100
Figura 80 - Definição do tipo de elemento de malha dos aderentes .....	101
Figura 81 - Definição do tipo de elemento de malha do adesivo.....	101
Figura 82 – Efeito <i>bias</i> da malha ao longo da junta adesiva .....	102
Figura 83 - Geometria de junta adesiva do tipo topo a topo (atual).....	103
Figura 84 - Geometria de junta adesiva do tipo chanfro, a 45° (tipo 1) .....	104
Figura 85 - Geometria de junta adesiva do tipo chanfro, a 45° (tipo 2) .....	104
Figura 86 - Tipo de malha ao longo da junta adesiva topo a topo .....	105
Figura 87 - Tipo de malha ao longo da junta adesiva topo a topo em detalhe .....	105
Figura 88 - Tipo de malha ao longo da junta adesiva do tipo chanfro (tipo 1).....	106
Figura 89 - Tipo de malha ao longo da junta adesiva do tipo chanfro (tipo 2).....	106
Figura 90 - Tipo de malha ao longo da junta adesiva do tipo chanfro em detalhe (tipo 1) .....	106
Figura 91 - Tipo de malha ao longo da junta adesiva do tipo chanfro em detalhe (tipo 2) .....	106
Figura 92 - Condições fronteira da junta no <i>software</i> ABAQUS® para esforço de: a) tração, b) compressão, c) flexão.....	108
Figura 93 - Condições fronteira da junta no <i>software</i> ABAQUS® para esforço de corte.....	109
Figura 94 – Distribuição das tensões $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ para a geometria topo a topo em função do tipo de adesivo (esforço de tração).....	110
Figura 95 - Distribuição das tensões $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ para a geometria em chanfro 1 em função do tipo de adesivo (esforço de tração).....	111
Figura 96 - Distribuição das tensões $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ para a geometria em chanfro 2 em função do tipo de adesivo (esforço de tração).....	111
Figura 97 - Distribuição das tensões $\sigma_y/\tau_{méd}$ para a geometria topo a topo em função do tipo de adesivo (esforço de tração).....	112
Figura 98 - Distribuição das tensões $\sigma_y/\tau_{méd}$ para a geometria em chanfro 1 em função do tipo de adesivo (esforço de tração).....	113
Figura 99 - Distribuição das tensões $\sigma_y/\tau_{méd}$ para a geometria em chanfro 2 em função do tipo de adesivo (esforço de tração).....	113
Figura 100 - Distribuição das tensões $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ para a geometria topo a topo em função do tipo de adesivo (esforço de compressão).....	115

Figura 101 - Distribuição das tensões $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ para a geometria em chanfro 1 em função do tipo de adesivo (esforço de compressão).....	115
Figura 102 - Distribuição das tensões $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ para a geometria em chanfro 2 em função do tipo de adesivo (esforço de compressão).....	116
Figura 103 - Distribuição das tensões $\sigma_y/\tau_{méd}$ para a geometria topo a topo em função do tipo de adesivo (esforço de compressão).....	117
Figura 104 - Distribuição das tensões $\sigma_y/\tau_{méd}$ para a geometria em chanfro 1 em função do tipo de adesivo (esforço de compressão).....	117
Figura 105 - Distribuição das tensões $\sigma_y/\tau_{méd}$ para a geometria em chanfro 2 em função do tipo de adesivo (esforço de compressão).....	118
Figura 106 - Distribuição das tensões $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ para a geometria topo a topo em função do tipo de adesivo (esforço de flexão) .....	119
Figura 107 - Distribuição das tensões $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ para a geometria em chanfro 1 em função do tipo de adesivo (esforço de flexão) .....	119
Figura 108 - Distribuição das tensões $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ para a geometria em chanfro 2 em função do tipo de adesivo (esforço de flexão) .....	120
Figura 109 - Distribuição das tensões $\sigma_y/\tau_{méd}$ para a geometria topo a topo em função do tipo de adesivo (esforço de flexão) .....	121
Figura 110 - Distribuição das tensões $\sigma_y/\tau_{méd}$ para a geometria em chanfro 1 em função do tipo de adesivo (esforço de flexão) .....	121
Figura 111 - Distribuição das tensões $\sigma_y/\tau_{méd}$ para a geometria em chanfro 2 em função do tipo de adesivo (esforço de flexão) .....	122
Figura 112 - Distribuição das tensões $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ para a geometria topo a topo em função do tipo de adesivo (esforço de corte).....	123
Figura 113 - Distribuição das tensões $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ para a geometria em chanfro 1 em função do tipo de adesivo (esforço de corte).....	123
Figura 114 - Distribuição das tensões $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ para a geometria em chanfro 2 em função do tipo de adesivo (esforço de corte).....	124
Figura 115 - Distribuição das tensões $\sigma_y/\tau_{méd}$ para a geometria topo a topo em função do tipo de adesivo (esforço de corte).....	125
Figura 116 - Distribuição das tensões $\sigma_y/\tau_{méd}$ para a geometria em chanfro 1 em função do tipo de adesivo (esforço de corte).....	125
Figura 117 - Distribuição das tensões $\sigma_y/\tau_{méd}$ para a geometria em chanfro 2 em função do tipo de adesivo (esforço de corte).....	126

---

Figura 118 - Comparação entre curvas $P-\delta$ para esforços de tração na geometria topo a topo .....	127
Figura 119 - Comparação entre curvas $P-\delta$ para esforços de tração na geometria em chanfro 1 .....	127
Figura 120 - Comparação entre curvas $P-\delta$ para esforços de tração na geometria em chanfro 2 .....	128
Figura 121 - Comparação entre curvas $P-\delta$ para esforços de compressão na geometria topo a topo ....	129
Figura 122 - Comparação entre curvas $P-\delta$ para esforços de compressão na geometria em chanfro 1..	129
Figura 123 - Comparação entre curvas $P-\delta$ para esforços de compressão na geometria em chanfro 2..	130
Figura 124 - Comparação entre curvas $P-\delta$ para esforços de flexão na geometria atual.....	131
Figura 125 - Comparação entre curvas $P-\delta$ para esforços de flexão na geometria em chanfro 1 .....	131
Figura 126 - Comparação entre curvas $P-\delta$ para esforços de flexão na geometria em chanfro 2 .....	132
Figura 127 - Comparação entre curvas $P-\delta$ para esforços de corte na geometria topo a topo .....	133
Figura 128 - Comparação entre curvas $P-\delta$ para esforços de corte na geometria em chanfro 1.....	133
Figura 129 - Comparação entre curvas $P-\delta$ para esforços de corte na geometria em chanfro 2.....	134
Figura 130 - Resumo das $P_{máx}$ obtidas na geometria topo a topo .....	135
Figura 131 - Resumo das $P_{máx}$ obtidas na geometria em chanfro 1.....	136
Figura 132 – Resumo das $P_{máx}$ obtidas na geometria em chanfro 2.....	136

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Disciplinas da canoagem [3, 5].....	11
Tabela 2 – Características de um <i>kayak</i> (Velocidade e Maratona) [7, 8] .....	12
Tabela 3 – Características de uma canoa (Velocidade e Maratona) [7, 8] .....	13
Tabela 4 - Características de embarcações de Paracanoagem [10] .....	14
Tabela 5 - Características das embarcações de <i>Slalom</i> [11].....	15
Tabela 6 - Características das embarcações de Águas Bravas [13] .....	16
Tabela 7 - Características de um Barco Dragão [15].....	17
Tabela 8 - Características de ligações permanentes num barco [26].....	21
Tabela 9 - Características de ligações aparafusadas num barco [26] .....	22
Tabela 10 – Características de ligações adesivas [30] .....	24
Tabela 11 - Tipo de adesivo e aplicações [41] .....	29
Tabela 12 – Estado-da-arte no âmbito da revisão de resistência de juntas adesivas .....	40
Tabela 13 - Requisitos típicos para aprovação de adesivos marinhos [118] .....	48
Tabela 14 – Estado-da-arte no âmbito da revisão de juntas adesivas para aplicações náuticas .....	49
Tabela 15 - Obtenção das propriedades mecânicas à tração.....	66
Tabela 16 - Propriedades mecânicas à tração do adesivo X.....	67
Tabela 17 – Resumo das propriedades mecânicas experimentalmente obtidas .....	68
Tabela 18 - Comparação entre as propriedades mecânicas obtidas experimentalmente e as de dois artigos .....	69
Tabela 19 - Propriedades mecânicas ao corte do adesivo X .....	70
Tabela 20 - Propriedades mecânicas à fratura do adesivo X.....	70
Tabela 21 - Propriedades do adesivo Araldite® AV138 [136].....	74
Tabela 22 - Propriedades do adesivo Araldite® 2015 [68, 138] .....	75
Tabela 23 - Propriedades do adesivo Sikaforce® 7752 [139] .....	76
Tabela 24 - Dimensões para a JSS (adaptado de [134]).....	77
Tabela 25 - Valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ [N] para as JSS e para os diferentes adesivos (adaptado de [134]) ...	79

---

Tabela 26 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com uma espessura de 0,2 mm (adaptado de [134]) .....	82
Tabela 27 - Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® 2015 com uma espessura de 0,2 mm (adaptado de [134]) .....	83
Tabela 28 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Sikaforce® 7752 com uma espessura de 0,2 mm (adaptado de [134]) .....	83
Tabela 29 - Configuração das estruturas <i>sandwich</i> numa embarcação .....	85
Tabela 30 - Propriedades do tecido de fibra de carbono [146] .....	86
Tabela 31 - Propriedades do tecido de fibra de vidro [147] .....	87
Tabela 32 - Propriedades da espuma de PVC [148] .....	88
Tabela 33 - Propriedades da resina epóxida RESOLCOAT 1400-1407 (matriz) [149] .....	89
Tabela 34 - Propriedades mecânicas do compósito de fibra de carbono/resina epoxídica .....	91
Tabela 35 - Propriedades mecânicas do compósito de fibra de vidro/resina epoxídica .....	91
Tabela 36 - Definição dos tipos de material e comportamento no separador " <i>Create Part</i> " .....	95
Tabela 37 - Definição dos tipos de secção no separador " <i>Create Section</i> " .....	95
Tabela 38 - Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo X .....	103
Tabela 39 - Parâmetros coesivos em tração e corte dos adesivos considerados para o estudo numérico (adaptado de [134]) .....	107
Tabela 40 - Classificação dos adesivos para os diferentes ensaios em função do parâmetro geométrico considerado .....	137
Tabela 41 - Comparação das geometrias em chanfro com geometria topo a topo para o adesivo X .....	138
Tabela 42 - Comparação das geometrias em chanfro com geometria topo a topo para o adesivo Araldite® AV138 .....	138
Tabela 43 - Comparação das geometrias em chanfro com geometria topo a topo para o adesivo Araldite® 2015 .....	139
Tabela 44 - Comparação das geometrias em chanfro com geometria topo a topo para o adesivo Sikaforce® 7752 .....	140

# ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	3
1.1	Contextualização .....	3
1.2	Objetivos .....	3
1.3	Organização da dissertação .....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Indústria da canoagem.....	9
2.1.1	História da canoagem.....	9
2.1.2	Disciplinas da canoagem .....	11
2.1.3	Tipos de embarcações .....	12
2.1.4	Mecanismos de degradação e dano.....	17
2.1.5	Soluções construtivas .....	18
2.1.6	Tipos de ligações .....	20
2.2	Ligações adesivas .....	23
2.2.1	Caracterização geral das ligações adesivas .....	23
2.2.2	Esforços nas ligações adesivas .....	25
2.2.3	Tipos de rotura em ligações adesivas.....	26
2.2.4	Possíveis configurações de juntas adesivas.....	26
2.2.5	Degradação ambiental de juntas adesivas .....	28
2.2.5.1	Influência da presença de água e/ou humidade.....	28
2.2.5.2	Influência da temperatura .....	28
2.2.6	Aplicações mais relevantes .....	28
2.3	Previsão de resistência de juntas adesivas .....	30
2.3.1	Mecânica de meios contínuos.....	30
2.3.2	Mecânica de fratura .....	31

---

2.3.3	Modelos de dano coesivo.....	32
2.3.3.1	Tipos de leis coesivas.....	33
2.3.3.2	Determinação dos parâmetros coesivos.....	34
2.3.4	Mecânica do dano.....	36
2.3.5	Método de elementos finitos extendido.....	37
2.3.6	Métodos sem malha.....	38
2.3.7	Estado-da-arte.....	39
2.4	Ligações adesivas na indústria naval.....	43
2.4.1	Aplicações adesivas na indústria naval.....	43
2.4.2	Ligações mais comuns.....	46
2.4.3	Particularidades das ligações adesivas.....	47
2.4.4	Estado-da-arte.....	48
3	DESENVOLVIMENTO.....	55
3.1	Objetivos e requisitos do trabalho.....	55
3.2	Processos utilizados atualmente na empresa “A”.....	55
3.3	Descrição do processo de fabrico.....	57
3.4	Trabalho experimental.....	62
3.4.1	Adesivo utilizado.....	62
3.4.2	Ensaio mecânico de tração.....	62
3.4.2.1	Fabrico dos provetes.....	62
3.4.2.1.1	Preparação do molde.....	63
3.4.2.1.2	Aplicação e cura do adesivo.....	64
3.4.2.2	Ensaio de tração.....	65
3.4.2.3	Análise de resultados.....	66
3.4.2.3.1	Curva $\sigma$ - $\epsilon$ .....	66
3.4.2.3.2	Propriedades mecânicas à tração.....	67
3.4.3	Comparação com ficha técnica e discussão.....	68
3.4.4	Propriedades mecânicas ao corte e à fratura.....	69

---

3.5	Trabalho numérico.....	71
3.5.1	Modelo de dano coesivo triangular.....	71
3.5.2	Validação do modelo numérico.....	72
3.5.2.1	Materiais utilizados nas juntas adesivas.....	73
3.5.2.1.1	Substratos.....	73
3.5.2.1.2	Adesivos.....	73
3.5.2.2	Geometria da junta de sobreposição simples.....	77
3.5.2.3	Ensaio experimental das JSS e resultados obtidos.....	77
3.5.2.3.1	Curvas $P-\delta$ .....	78
3.5.2.3.2	Resistência das juntas.....	79
3.5.2.4	Análise numérica no ABAQUS®.....	80
3.5.2.4.1	Condições da análise numérica.....	80
3.5.2.4.2	Determinação das propriedades coesivas.....	81
3.5.2.4.3	Validação do modelo numérico - Previsão da resistência.....	83
3.5.3	Estudo numérico de ligação adesiva entre o casco e o <i>deck</i> .....	85
3.5.3.1	Geometria da estrutura sandwich de uma embarcação.....	85
3.5.3.1.1	Tecido de fibra de carbono.....	86
3.5.3.1.2	Tecido de fibra de vidro.....	87
3.5.3.1.3	Espuma de PVC (núcleo).....	88
3.5.3.1.4	Resina epóxida (matriz).....	89
3.5.3.1.5	Determinação das propriedades das camadas.....	89
3.5.3.2	Secção da embarcação para estudo.....	92
3.5.4	Condições da análise numérica.....	93
3.5.5	Determinação das propriedades coesivas.....	102
3.5.6	Estudo de geometrias e adesivos alternativos.....	103
3.5.6.1	Geometrias a analisar.....	103
3.5.6.1.1	Tipo de malha utilizada nas geometrias a analisar.....	105
3.5.6.2	Adesivos a analisar.....	106
3.5.6.3	Ensaio a realizar.....	107
3.5.7	Análise de tensões na junta.....	109

---

3.5.7.1	Esforço de tração .....	110
3.5.7.1.1	Tensões de corte .....	110
3.5.7.1.2	Tensões de arrancamento.....	112
3.5.7.2	Esforço de compressão .....	114
3.5.7.2.1	Tensões de corte .....	114
3.5.7.2.2	Tensões de arrancamento.....	116
3.5.7.3	Esforço de flexão.....	118
3.5.7.3.1	Tensões de corte .....	118
3.5.7.3.2	Tensões de arrancamento.....	120
3.5.7.4	Esforço de corte .....	122
3.5.7.4.1	Tensões de corte .....	122
3.5.7.4.2	Tensões de arrancamento.....	124
3.5.8	Resistência das juntas .....	126
3.5.8.1	Esforço de tração .....	126
3.5.8.2	Esforço de compressão .....	128
3.5.8.3	Esforço de flexão.....	131
3.5.8.4	Esforço de corte .....	133
3.5.8.5	Comparação de resultados entre geometrias .....	135
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>143</b>
4.1	Conclusões .....	143
4.2	Propostas de trabalhos futuros.....	145
<b>5</b>	<b>BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....</b>	<b>149</b>
<b>6</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>159</b>
6.1	Anexo A. Desmoldante Loctite® Frekote 770-NC.....	159
6.2	Anexo B. Tecido de fibra de carbono 160 g/m <sup>2</sup> , <i>plain</i> .....	163
6.3	Anexo C. Tecido de fibra de vidro 220 g/m <sup>2</sup> , <i>plain</i> .....	167
6.4	Anexo D. Espuma de PVC .....	173

---

6.5	Anexo E. Resina epóxi RESOLCOAT 1400-1407 .....	177
-----	---	-----



# 1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

1.2 OBJETIVOS

1.3 ORGANIZAÇÃO



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

A integridade de uma solução industrial geralmente é determinada pelas suas ligações. Em relação aos métodos tradicionais, como ligações soldadas ou aparafusadas, as ligações adesivas são frequentemente usadas pelas vantagens que apresentam. Associados aos adesivos destacam-se os materiais compósitos que, por si só, não se apresentam como uma mais-valia. No entanto, em conjunto com ligações adesivas estes permitem que se fabrique as mais complexas geometrias, destacando-se a sua elevada resistência específica, rigidez específica e reduzido peso associado.

A indústria do desporto não passa ao lado do uso de materiais compósitos nas suas soluções construtivas. Um exemplo disso é a canoagem, apesar do uso destes materiais estar associado por vezes a altos custos, quando se trata de alta competição, a procura por ser um décimo de segundo mais rápido que o adversário pode discutir vitórias. Atualmente, as embarcações são fabricadas através de um molde, tanto para o casco como para o *deck*, e a união das duas metades dá-se através de uma ligação adesiva. O tipo de adesivo e de geometria a utilizar nesta junta adesiva pode influenciar em muito a resistência da embarcação. A par disto, surge a necessidade de efetuar a previsão do comportamento das juntas adesivas para verificar a sua adequabilidade e posteriormente poderem ser aplicados com confiança na construção das embarcações.

Uma das técnicas principais utilizadas na previsão do comportamento de juntas adesivas, é centrado nos modelos de dano coesivo (MDC), apesar de normalmente serem usadas e validadas para geometrias de teste simples, podem ser extrapoladas ao projeto de geometrias reais usadas na indústria. Em termos gerais, os métodos numéricos apresentam-se como uma solução viável ao projeto de uma estrutura, uma vez que, quando comparados ao método experimental, permitem desenvolver modelos com mais rapidez, menor custo e possuem facilidade de alterar o modelo geométrico de forma a melhor adaptar-se às condições a que vai estar imposto.

## 1.2 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação centra-se na realização de um estudo numérico com o intuito de avaliar a resistência de uma junta adesiva formada entre o casco e o *deck* de uma embarcação utilizada para a prática de canoagem. Com vista ao

cumprimento do objetivo proposto, será efetuada a obtenção de valores de referência retirados de ensaios de tração em provetes de adesivo maciço para a obtenção de valores de referência que serão utilizados na parte numérica.

Posteriormente, o trabalho numérico consistiu na aplicação do método de elementos finito (MEF) através do modelo de dano coesivo triangular para a previsão do comportamento das ligações adesivas, utilizando-se o *software* ABAQUS®. Pretende-se simular o comportamento que diferentes adesivos e tipos de geometria influenciam na resistência das juntas adesivas, tendo como característica comum, o tipo de materiais utilizados para os aderentes, nesta situação, em estrutura *sandwich*. Assim é esperado verificar a credibilidade da configuração base, e verificar a possibilidade de obter uma configuração com melhores características de resistência e rigidez para o fabrico de uma embarcação. Dado à necessidade, em termos de competitividade e custos, para otimizar a geometria atual.

### 1.3 Organização da dissertação

Para melhor interpretação e análise do trabalho realizado, esta dissertação foi dividida em quatro capítulos, sendo dispostos da seguinte forma:

O primeiro capítulo é destinado à contextualização do tema proposto, apresentando-se os objetivos que se pretende obter do estudo realizado e, por fim, é apresentada a organização do mesmo.

No segundo capítulo, é espelhada a revisão bibliográfica, que por sua vez encontra-se dividida em quatro subcapítulos com vista a simplificar a interpretação do tema principal. Assim aborda-se a temática da canoagem, seguida das ligações adesivas, previsão de resistência de juntas adesivas e as ligações adesivas na indústria naval. Numa parte final dos dois últimos subcapítulos são abordados alguns estudos relativos no contexto geral de juntas adesivas e de juntas adesivas para aplicações náuticas.

No terceiro capítulo, é abordado todo o desenvolvimento desta dissertação. Este capítulo inicia-se com a apresentação requisitos que são necessários cumprir para atingir os objetivos propostos. De seguida, são explicados os principais processos de fabrico que a empresa “A” utiliza no fabrico das suas embarcações, e noutro subcapítulo, é apresentada uma descrição detalhada do processo de fabricação de uma embarcação, onde se destaca como ponto principal a aplicação de adesivo e a colagem entre o casco e o *deck* do barco. Após conhecidos os principais pontos associados ao fabrico de uma embarcação, é realizado um trabalho experimental que tem como objetivo determinar as propriedades de tração do adesivo base, e também, apresentar as restantes propriedades mecânicas do adesivo necessárias para se realizar o trabalho numérico. Na última etapa deste terceiro capítulo, é realizada uma análise numérica que teve por base a utilização do modelo de dano coesivo triangular. Inicialmente é validade o

modelo numérico considerado, procedendo-se depois à determinação de todos os parâmetros geométricos necessários à elaboração do modelo no *software* ABAQUS®. Ainda neste capítulo são analisadas possíveis alternativas de geométricas e adesivos para o estudo numérico, com vista a validar a melhor configuração possível.

Na última etapa, correspondente ao capítulo 4, apresentam-se as conclusões obtidas ao longo de todo o trabalho realizado, bem como, sugestões para possíveis trabalhos futuros.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INDÚSTRIA DA CANOAGEM

2.2 LIGAÇÕES ADESIVAS

2.3 PREVISÃO DE RESISTÊNCIA DE JUNTAS ADESIVAS

2.4 LIGAÇÕES ADESIVAS NA INDÚSTRIA NAVAL



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Indústria da canoagem

#### 2.1.1 História da canoagem

Desde tempos antigos que o Homem procura explorar o meio aquático. A canoagem surge como um dos primeiros meios de locomoção sobre a água. Devido à necessidade de sobrevivência, o ser humano procura os rios e mares para pescar, caçar ou até mesmo os atravessar. Os vestígios mais antigos desta modalidade foram encontrados num tumulo de um rei sumério, através de escavações arqueológicas perto do rio Eufrates (Ásia Ocidental) e remontam a cerca de seis mil anos [1].

Ao longo desta longa história, surgiram dois tipos de embarcações que caracterizam de maneira geral o desporto em todo o mundo. Um de um estilo “fechado”, propulsionado por uma pagaia de pá dupla conhecido como *kayak*; e outro de um estilo “aberto”, propulsionado por uma pagaia simples conhecida como canoa.

O *Kayak*<sup>1</sup> teve origem na Gronelândia, onde os esquimós (Figura 1) o usavam como meio de transporte individual e para atividades de caça e pesca. As embarcações primitivamente eram feitas com uma estrutura em osso de baleia envolvidas em pele de foca. Em alto mar os remadores utilizavam um saiote para prevenir a entrada de água na embarcação, o que facilitava o seu uso em mares instáveis [1, 2].



Figura 1 - Kayak Esquimó [3]

---

<sup>1</sup> *Kayak* (ki ak) significa homem-barco em língua esquimó

A Canoa (Figura 2), por outro lado, foi utilizada a uma escala mundial, das tribos nativas americanas aos povos polinésios. Devido ao seu estilo aberto, facilitava o transporte de mercadorias em expedições além da pesca e caça. As primeiras embarcações foram fabricadas a partir de troncos de árvore, mas rapidamente estas foram obtidas através de diferentes materiais, com uma variedade de tamanhos e conseqüentemente possibilidade de albergar vários remadores [2, 3].



Figura 2 - Canoa de Índios americanos em 1847 [3]

A modalidade propriamente conhecida nos dias de hoje começou a ganhar a sua forma durante o século XIX, quando surgiu a primeira associação de canoagem na cidade de Londres, o *Royal Canoe Club*. Mas só após cerca de 40 anos, em 1924, é que se criou uma entidade internacional de canoagem, a *Internationale Repräsentantenschaft Kanusport* (IRK) que, mais tarde, em 1946, tomou o nome de *International Canoe Federation* (ICF). Atualmente a federação conta com cerca de 150 países membros [1, 2].

O aparecimento da canoagem em Portugal é pouco conhecido, mas crê-se que surgiu nos anos 30. Realizando-se algumas descidas de rios e outras aventuras, podendo até se realizar competições. No entanto, apenas em 1979 é que foi fundada a Federação Portuguesa de Canoagem (FPC), que no ano seguinte entrou na ICF. A primeira participação desta modalidade nos Jogos Olímpicos deu-se em 1988 em Seul (Coreia do Sul) e até aos dias de hoje foram conquistadas em competições olímpicas uma medalha de prata (Emanuel Silva e Fernando Pimenta – Londres 2012) e uma medalha de bronze (Fernando Pimenta – Tóquio 2021); e em competições paralímpicas uma medalha de bronze (Norberto Mourão – Tóquio 2021) [4].

### 2.1.2 Disciplinas da canoagem

A canoagem consiste em diferentes tipos de barcos propulsionado por pagaias de simples ou dupla pá sem ponto de apoio no barco em que os remadores estão voltados na direção do movimento. De acordo com a ICF, as disciplinas que perfazem a modalidade são as apresentadas na Tabela 1 [3, 5].

Tabela 1 – Disciplinas da canoagem [3, 5]

Disciplina	Descrição
Velocidade (incluído paracanoagem)	É praticada em água calmas com 9 pistas (9 metros de largura cada), sendo consideradas as distâncias oficiais 200, 500 e 1000 metros para competição. As competições de 5000 metros também são realizadas dentro desta disciplina, mas sem o uso das pistas.
Maratona	É praticada em águas calmas onde os atletas têm de realizar no mínimo duas portagens e devem desembarcar numa área definida, transportar os seus barcos e voltar a embarcar. Em escalão sénior (19 a 35 anos) a distância a percorrer varia entre 26 e 30 km e em escalão júnior (17 a 18 anos) entre 18 e 22 km.
Slalom	É praticada em água agitadas onde o remador tem de passar entre pórticos durante o seu percurso e, caso falhe algum, sofre uma penalidade. O percurso tem entre 200 e 300 m de extensão. É obrigatório o uso de colete e capacete.
Canoagem de mar	Competições realizadas numa ou várias etapas, em percursos na sua totalidade no mar ou estuários.
Águas bravas	Também realizada em águas agitadas, é obrigatório o uso de capacete e colete. Descidas e <i>Rafting</i> são exemplos desta disciplina.
Estilo livre	É caracterizada como uma especialidade de exibição, no âmbito da qual os atletas realizam manobras de difícil execução.
Kayak polo	A competição é realizada entre duas equipas de 5 jogadores num campo aquático definido.
Barco dragão	A competição realiza-se com pelo menos duas embarcações em prova. As embarcações longas contam com 20 remadores enquanto as curtas contam com 10 remadores. Além disso, ambos os barcos têm um timoneiro e um baterista. A embarcação costuma ser decorada com a cabeça e cauda de um dragão.
Kayaksurf e Waveski	É em tudo semelhante ao <i>surf</i> , mas realizada com um <i>kayak</i> . O atleta recebe pontos pelas manobras realizadas durante a onda.
Turismo náutico	Realiza-se em águas interiores ou no mar e não visa a expressão máxima do rendimento desportivo.

### 2.1.3 Tipos de embarcações

Diferentes tipos de disciplinas envolvem diferentes tipos de embarcações. Através da ordem do capítulo anterior são apresentadas as embarcações das vertentes mais populares.

#### 1. Velocidade e Maratona

As disciplinas de Velocidade e Maratona partilham o mesmo tipo de embarcações, mas com diferentes especificações para cada disciplina.

O *Kayak* (K) (Figura 3) é caracterizado por o remador se encontrar numa posição sentada e tendo um apoio para os seus pés. O barco possui um leme para controlo da embarcação, que é controlado com os pés [6].



Figura 3 - Kayak monolugar (K1) [6]

Na Tabela 2 [7, 8] é possível encontrar algumas das características de um kayak, conforme o número de lugares e o tipo de disciplina.

Tabela 2 – Características de um *kayak* (Velocidade e Maratona) [7, 8]

Velocidade	Comprimento máximo	Massa mínima
K1	520 cm	12 kg
K2	650 cm	18 kg
K4	1100 cm	30 kg
Maratona		
K1	520 cm	8 kg
K2	650 cm	12 kg

A Canoa (C) (Figura 4) é caracterizada por o remador se encontrar ajoelhado apenas com um joelho sobre um calço (bloco de borracha). Ao contrário do *kayak* não possui leme e a mudança de direção é realizada com o uso da pagaia.



Figura 4 - Canoa monolugar (C1)

Na Tabela 3 [7, 8] podem-se observar as características relativas a este tipo de embarcação.

Tabela 3 – Características de uma canoa (Velocidade e Maratona) [7, 8]

Velocidade	Comprimento máximo	Massa mínima
C1	520 cm	14 kg
C2	650 cm	20 kg
C4	900 cm	30 kg
Maratona		
C1	520 cm	10 kg
C2	650 cm	14 kg

## 2. Paracanoagem

A Paracanoagem é uma vertente que pertence à disciplina de Velocidade, destinada a atletas com deficiência física. O *kayak* desta disciplina também é munido de um leme que dependendo das condições físicas do atleta, pode ser ou acionada com os pés para mudança de direção; já a canoa é substituída por uma do tipo  $Va'a^2$  (Figura 5) [9].

<sup>2</sup> Também conhecida por canoa havaiana, canoa polinésia ou *outrigger*



Figura 5 - Exemplo de kayak (a) e canoa Va'a (b) [9]

Na Tabela 4 [10] podem-se consultar algumas características deste tipo de barcos. Os eventos são apenas constituídos por embarcações monolugar.

Tabela 4 - Características de embarcações de Paracanoagem [10]

Paracanoagem	Comprimento máximo	Massa mínima
Kayak	520 cm	12 kg
Va'a	730 cm	13 kg

### 3. Slalom

Em canoagem de *slalom* existem três tipos de embarcações, o kayak monolugar (K1), a canoa monolugar (C1) e a canoa dupla (C2) (Figura 6) [9].



Figura 6 - Exemplo de K1 (a), C1 (b) e C2 (c) de *slalom* [9]

Na Tabela 5 [11] podem-se consultar as características destas embarcações.

Tabela 5 - Características das embarcações de *Slalom* [11]

<i>Slalom</i>	Comprimento máximo	Largura mínima	Massa mínima
K1	350 cm	60 cm	9 kg
C1	350 cm	60 cm	9 kg
C2	410 cm	75 cm	15 kg

#### 4. Canoagem de mar

Dentro da canoagem de mar não existem limitações aplicadas à construção das embarcações [12]. Os barcos oficiais reconhecidos pela ICF são o *surfski* monolugar (SS-1) (Figura 7), *surfski* duplo (SS-2), SUP e a canoa *outrigger* (OC-1) [9].



Figura 7 - *Surfski* monolugar (SS-1) [9]

#### 5. Águas bravas

Em canoagem de águas bravas são reconhecidas três embarcações, o *kayak* monolugar (K1), a canoa monolugar (C1) e a canoa dupla (C2) (Figura 8) [9].



Figura 8 - K1 de Águas Bravas [9]

Na Tabela 6 podem-se consultar as características destas embarcações [13].

Tabela 6 - Características das embarcações de Águas Bravas [13]

Águas Bravas	Comprimento máximo	Massa mínima
K1	450 cm	10 kg
C1	430 cm	11 kg
C2	500 cm	17 kg

## 6. Kayak polo

Em *Kayak polo* (Figura 9) apenas são utilizadas embarcações para um atleta [9]. Cada *kayak* utilizado deve respeitar um comprimento máximo de 300 cm, uma largura máxima de 65 cm e uma massa mínima de 7 kg [14].



Figura 9 - Exemplo de embarcação de kayak polo [9]

## 7. Barco dragão

São conhecidas por serem embarcações por trabalho em equipa. O Barco dragão (Figura 10) pode ser encontrado numa versão longa para 20 remadores ou uma curta para 10 remadores [9].



Figura 10 - Barco dragão [9]

Na Tabela 7 [15] podem ser conhecidas algumas das especificações deste tipo de embarcação.

Tabela 7 - Características de um Barco Dragão [15]

Barco dragão	Barco pequeno (10 p.)	Barco longo (20 p.)
Comprimento	965 cm	1249 cm
Largura	116 cm	116 cm
Altura	55 cm	55 cm
Massa mínima	140 kg	250 kg

### 2.1.4 Mecanismos de degradação e dano

Uma embarcação apresenta uma vida útil variada. No entanto, esta pode ser prolongada ou reduzida a depender de alguns fatores. Sabe-se que o desgaste natural existe, mas para além disto existem outras causas que influenciam a degradação de um barco, tais como:

- Falta de limpeza ou limpeza inadequada (uso de químicos que possam danificar a pintura);
- Exposição solar prolongada;

- Colocar o barco diretamente nas *rack* metálicas;
- Apertar demasiado o barco nas *rack* de transporte;
- Transportar ou guardar o barco dentro do saco sem que ele esteja totalmente seco (caso o saco não seja de tecido respirável);
- Choques (entre barcos, rochas ou lixo) que possam provocar danos;
- Falta de manutenção ou manutenção imprópria.

É aconselhado, pelos fabricantes [6, 16-18], que o utilizador recorra sempre a entidades comprovadas para a manutenção da sua embarcação.

### 2.1.5 Soluções construtivas

É de extrema importância adotar sempre os melhores materiais no fabrico de um barco. Na prática não acontece, pois, como se sabe, os barcos normalmente são fabricados por encomenda de um cliente e isso vai ditar o material escolhido entre os possíveis que cada fabricante oferece.

A construção de embarcações em madeira costumava ser muito popular há cerca de um século atrás. Atualmente esta construção ainda é utilizada dada a sua durabilidade e resistência, são menos flexíveis que outros tipos de barcos, o que pode torná-los ótimos para águas agitadas. Este material pode comumente utilizado em embarcações de turismo [19, 20].

Os *kayaks* construídos em borracha ou estrutura insuflável, podem ser encontrados desde as águas mais calmas, para lazer e recreação, às águas mais turbulentas, principalmente na disciplina de *rafting*, devido à sua estabilidade e resistência. *Nylon* e poliéster são materiais populares no fabrico destas embarcações [21, 22].

Os barcos fabricados em polímero (plástico) vencem pela versatilidade e ampla aplicação que oferecem. Embora estes barcos não sejam muito usados em competição de água calmas, devido ao baixo nível de deslizamento e peso normalmente acima do aceitável, utilizar este tipo de material é uma das formas mais em conta de fabricar um barco e têm uma ótima resistência ao desgaste. O material principal utilizado para o fabrico é o polietileno; e o processo de fabrico primordial é a rotomoldagem [21-23].

Os materiais compósitos devido ao excelente compromisso entre o baixo peso e elevada resistência mecânica, estas são os mais comuns em barcos de alta competição. A fibra de vidro foi considerada um dos materiais pioneiros no fabrico de material compósito e ainda hoje é amplamente utilizados devido ao baixo preço e facilidade de reparação. Atualmente, os materiais mais encontrados são o carbono e o *kevlar*. O primeiro possui uma elevada rigidez específica (excelente para competição de velocidade), enquanto o segundo torna o casco mais resistente aos impactos, devido à flexibilidade do material [21, 23].

Na canoagem é muito comum ver a associação de diferentes materiais ao fabrico de um barco (Figura 11), pois um material traz uma vantagem que outro não consegue garantir [24].

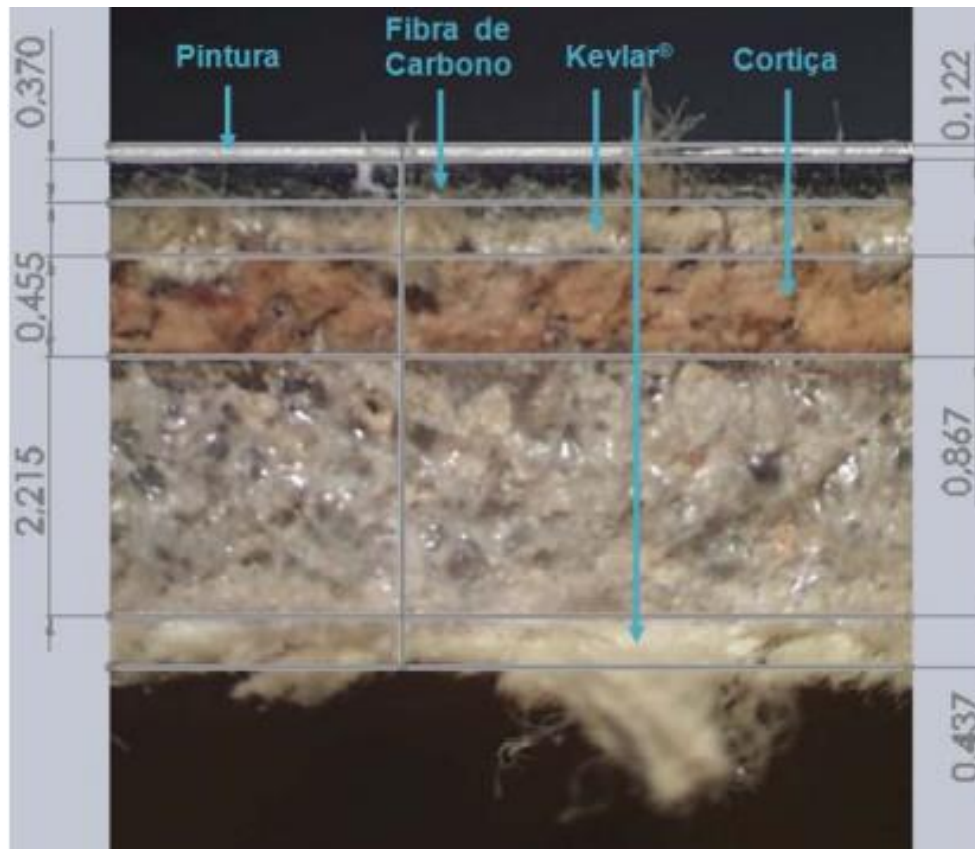


Figura 11 - Exemplo da composição interna de uma embarcação de canoagem [24]

O fabrico de uma embarcação em material compósito segue um processo de 5 etapas [25].

#### 1. Aplicação de Gelcoating

Uma embarcação é construída usando dois moldes, um para o casco (*hull*) e outro para o *deck*. O processo começa por colocar um *spray gelcoat* (resina pigmentada que dá ao barco a sua cor e brilho exterior) nos moldes polidos. O *gelcoating*, além do propósito cosmético, é essencial para proteger o laminado da abrasão e raios UV. Com vista a obter um melhor acabamento, o *gelcoat* deve curar até formar um revestimento duro antes de se iniciar a segunda etapa, a laminação.

#### 2. Laminação

Após a cura do *gelcoat* inicia-se o processo de laminação manual, que consiste na aplicação de várias camadas de reforços de tecido e uma resina plástica líquida no molde. Como as camadas são colocadas individualmente, a laminação manual pode

reter bolhas microscópicas de ar entre as camadas de tecido. Após este processo, o molde e o laminado é selado sob um material plástico (*vacuum bag*). O ar entre o material plástico e o molde é evacuado através de uma bomba de vácuo. Este processo é importante para remover o excesso de resina contida no laminado, diminuindo o peso e aumentando a resistência do barco. Para obter as melhores propriedades, o laminado deve ser feito através de um processo de infusão a vácuo ou através da utilização de matérias pré-impregnadas.

### 3. Pós-cura

A pós-cura consiste na colocação do molde num forno aquecido durante cerca de 8 horas. Este processo promove um melhor acabamento das peças e ajuda a ligar quimicamente as moléculas individuais na resina (uma reação chamada “reticulação”), aumentando a resistência da estrutura.

### 4. Corte e colagem

Assim que os moldes são retirados do forno, as metades são desenformadas dos moldes. As aberturas necessárias são cortadas no *deck* e as bordas são aparadas e lixadas. Após isso, o casco e o *deck* estão preparados para ser colados e formarem uma peça só. A união é efetuada com resina e um reforço em compósito, e de seguida lixada, obtendo-se uma superfície uniforme.

### 5. Acabamento final

Com o casco e o *deck* unidos, são realizados os acabamentos finais e colocados todos os acessórios (banco, finca-pés, calhas). Por fim, é realizada uma inspeção visual para garantir a qualidade do barco.

## 2.1.6 Tipos de ligações

No geral as ligações são divididas em dois grupos, permanentes e desmontáveis. Dentro das ligações permanentes podem-se encontrar, mais frequentemente, ligações obtidas por soldadura e ligações adesivas; e dentro das desmontáveis encontram-se normalmente ligações aparafusadas.

Dado que as embarcações são fabricadas em materiais não metálicos, as ligações obtidas por soldadura são descartadas deste processo construtivo. Na Tabela 8 [26] é possível verificar algumas características das ligações permanentes e exemplos relevantes da sua aplicação.

Tabela 8 - Características de ligações permanentes num barco [26]

Benefícios	Limitações
<ul style="list-style-type: none"><li>• Distribuição uniforme de tensões;</li><li>• Peso reduzido relativo a juntas mecânicas;</li><li>• Superfícies externas lisas;</li><li>• Boa rigidez de junta adesiva.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Difícil para desmontagem;</li><li>• Preocupação com armazenamento do adesivo, tempo de cura e vida útil;</li><li>• Durabilidade das propriedades adesivas nas juntas adesivas devido à potencial degradação.</li></ul>

**Exemplo 1.** Colagem entre o casco (*hull*) e o *deck*.

Figura 12 - Exemplo de junta adesiva entre o casco (*hull*) e o *deck* (linha a vermelho)

**Exemplo 2.** Colagem do estrado e calhas para fixação do suporte de pé e calço numa canoa; e barra transversal para promover rigidez lateral.



Figura 13 - Exemplo de ligação permanente numa Canoa (linha a vermelho)

Tendo em conta que as embarcações são fabricadas em modelos divididos pelo peso do utilizador, a facilidade de serem ajustadas ao gosto de cada atleta ou utilizador é um aspeto importante. As ligações desmontáveis surgem com esse mesmo propósito. Na Tabela 9 é possível ver onde são aplicadas.

Tabela 9 - Características de ligações aparafusadas num barco [26]

Benefícios	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inspeção de qualidade mais fácil de realizar;</li> <li>• Pouco trabalho de preparação superficial;</li> <li>• Facilmente ajustável.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencial corrosão do material, dependendo do material selecionado, pode trazer consequências ao material construtivo da embarcação;</li> <li>• Concentração de tensões em juntas aparafusadas;</li> <li>• Maior peso associado comparativamente a juntas adesivas.</li> </ul>

**Exemplo 1.** Ligação aparafusada de: (a) um finca-pés num *kayak* e (b) um banco num *kayak*.

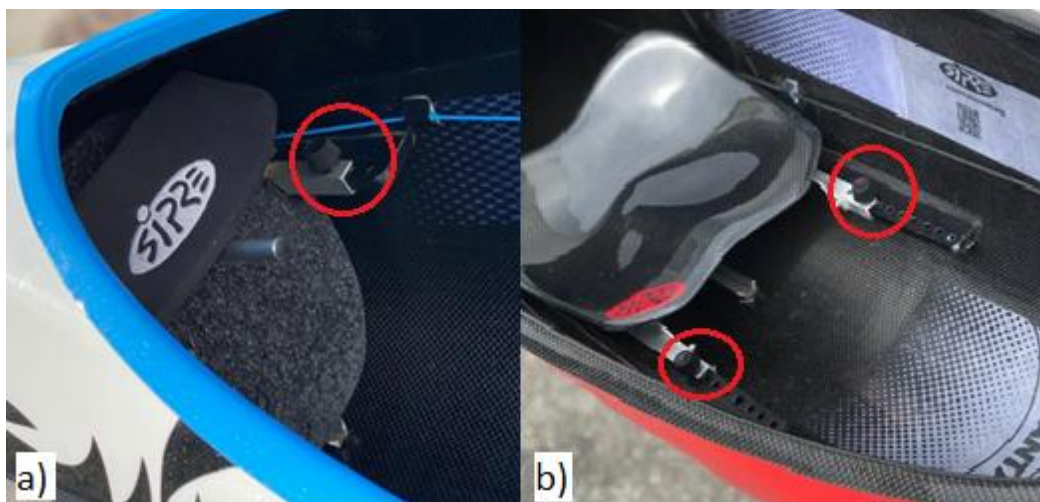


Figura 14 - Exemplo de ligações aparafusadas num *kayak*

Apesar de os exemplos apresentados estarem associados a construções em material compósito, as características apresentadas são comuns a todos os materiais possíveis para fabrico.

## 2.2 Ligações adesivas

Os adesivos são usados desde há milhares de anos, mas até há 100 anos, a vasta maioria provinha de origem natural, como animais ou plantas. No início do século XIX, os adesivos de base polimérica foram introduzidos no mercado. No entanto a sua utilização era limitada devido ao custo elevado e propriedades mecânicas pouco atrativas. Há cerca de 80 anos iniciou-se a expansão do conhecimento químico dos polímeros em prol dos adesivos que aprimorou por completo as propriedades e o custo de obtenção dos mesmos. Hoje em dia é quase impossível ver um mundo sem ligações adesivas, podendo estas ser encontradas desde as mais complexas indústrias até à simples utilização doméstica [27].

Um adesivo pode ser definido como um material que, quando aplicado às superfícies de outros materiais, os pode unir e evitar a sua separação. Os materiais a unir são normalmente chamados de substratos ou aderentes. Dá-se o nome substrato como designação dos componentes da junta antes da ligação e o termo aderentes para designar os componentes após a colagem. Deste processo de união surge o termo junta adesiva.

### 2.2.1 Caracterização geral das ligações adesivas

As ligações adesivas estão cada vez mais presentes na sociedade e são vistas como uma alternativa aos métodos tradicionais. Considerando que os métodos tradicionais só podem ser aplicados em materiais acima de certos valores mínimos de espessura para evitar danos no material durante a união (por exemplo, rasgo, dobra, queima), os adesivos são vantajosos, pois podem ser aplicados a materiais de qualquer espessura, além de eliminarem a necessidade de realizar furação, o que resulta na inexistência de situações de *stress* nesses pontos.

Graças aos mais inovadores adesivos, atualmente é possível unir a maioria dos materiais díspares, como metais, plásticos ou vidro. Para além disso, as ligações adesivas estão associadas a menores custos de realização, melhor resistência à fadiga e elevada capacidade de amortecimento de vibrações. No entanto, as juntas adesivas também são afetadas por inúmeras desvantagens, como por exemplo a necessidade de uma preparação cuidadosa dos aderentes, um tempo de cura muito longo, a reparação de juntas defeituosas é praticamente impossível, entre outras [28, 29].

As principais características apresentadas pelas ligações adesivas encontram-se sumariamente descritas na Tabela 10 [30].

Tabela 10 – Características de ligações adesivas [30]

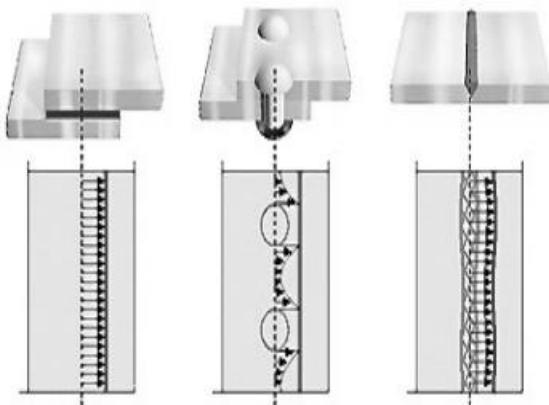
<b>Características</b>	
<b>Tipo de ligação</b>	Ligação usualmente permanente
<b>Distribuição de tensões</b>	Distribuição de tensões uniforme ao longo da largura da junta 
<b>Aspetto</b>	Junta quase invisível
<b>Ligação dos materiais</b>	Ideal para unir quase todos os materiais dissimilares
<b>Resistência à temperatura</b>	Pobre resistência a temperaturas elevadas
<b>Resistência mecânica</b>	Excelentes propriedades à fadiga
<b>Preparação de junta</b>	Limpeza de superfície normalmente necessária
<b>Pós-processamento</b>	Normalmente não necessário
<b>Equipamento</b>	Equipamentos de grandes dimensões têm elevados preços
<b>Custos</b>	Adesivos estruturais de custo elevado
<b>Cadência de produção</b>	De segundos a horas, dependendo do tipo de processo
<b>Garantia de qualidade</b>	Métodos de avaliação limitados

Figura 15 - Distribuição de tensões em juntas adesivas, rebitadas e soldadas [29]

### 2.2.2 Esforços nas ligações adesivas

Numa ligação adesiva, a qualidade da adesão é um fator predominante que está relacionado com a resistência que a junta poderá oferecer. Uma vez que a rutura ocorre em locais em que as tensões excedem a resistência local, as concentrações de tensões têm uma grande influência na resistência à rutura de uma junta [31].

Estas concentrações de tensão ocorrem de forma inesperada e podem determinar a resistência real que a junta pode suportar. Desta forma, um projetista tem de conhecer os esforços a que a junta pode estar sujeita de forma a minimizar os efeitos sentidos. Existem cinco tipos básicos de esforços a que uma junta pode estar sujeita (Figura 16) [32, 33]:

- Esforço de tração e esforço de compressão – Surgem quando as forças atuam perpendicularmente ao plano da junta e são distribuídas ao longo da superfície colada;
- Esforço de corte – Desenvolve-se quando as forças atuam paralelamente ao plano da junta adesiva, que tende a separar os substratos por deslizamento. As juntas adesivas são muito mais resistentes quando solicitadas a este tipo de esforço, já que uma maior parte da área colada contribui para a resistência da junta;
- Esforço de clivagem e esforço de arrancamento – São o tipo de esforços mais prejudiciais às juntas adesivas. A clivagem ocorre quando as forças nas extremidades atuam de forma a promover a separação dos substratos. Embora o esforço de arrancamento ocorra de forma similar, só acontecem em casos em que um ou ambos os substratos são flexíveis. A resistência de uma junta adesiva a este esforço é muito inferior quando comparada ao de tração, compressão e corte.

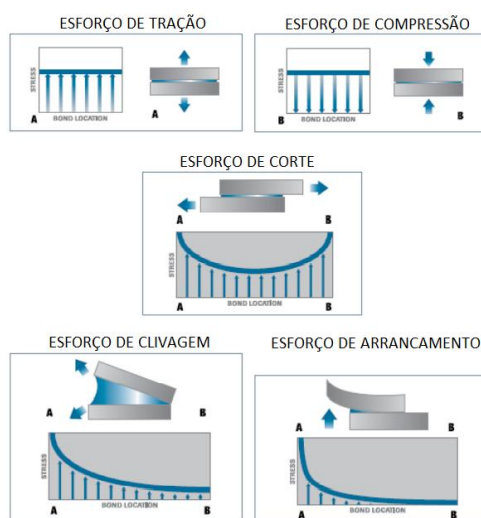


Figura 16 - Esforços típicos em juntas adesivas (adaptado de [33])

### 2.2.3 Tipos de rotura em ligações adesivas

Os esforços sentidos nas ligações adesivas são responsáveis por produzir a rotura, mas não são diretamente responsáveis pelo tipo de rotura que podem acontecer. Os quatro principais tipos de rotura numa junta adesiva são os seguintes (Figura 17) [34, 35]:

- Rotura adesiva – Surge na interface entre o adesivo e um dos substratos, resultando num substrato sem quase quaisquer resíduos de adesivo. Uma má preparação da superfície dos substratos poderá ser uma causa associada;
- Rotura coesiva – Surge quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do adesivo;
- Rotura do substrato – Surge quando a junta adesiva é bem conseguida, ou seja, quando a resistência interna do substrato é inferior à de zona de ligação entre o adesivo e o substrato;
- Rotura mista – Trata-se de um modo de rotura que combina características de uma rotura adesiva e de uma rotura coesiva. A sua origem pode estar associada a uma limpeza ineficaz de uma determinada secção das zonas a unir.

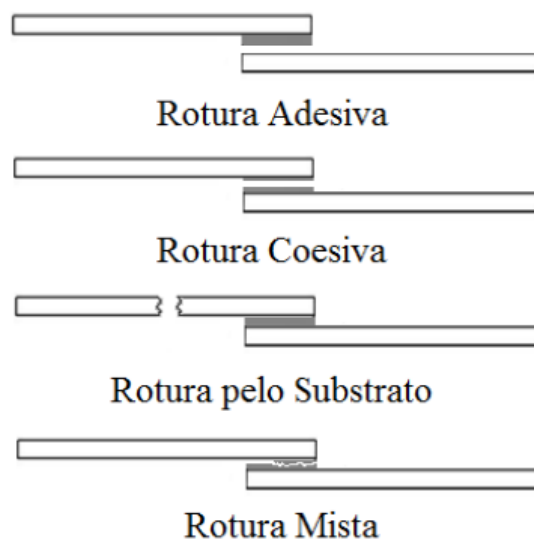


Figura 17 - Tipos de rotura numa ligação adesiva [35]

Dentro das juntas adesivas em materiais compósitos, ainda existe a possibilidade de se verificar outro tipo de rotura, a rotura nas fibras. Este tipo de rotura surge quando existe uma falha por parte do laminado que pode ser influenciada pela orientação das camadas ou pela sequência de empilhamento.

### 2.2.4 Possíveis configurações de juntas adesivas

Ao projetar uma ligação adesiva é importante ter em consideração o tipo de junta a aplicar. Uma compreensão dos vários tipos de junta que existem é uma etapa essencial

para encontrar a solução ideal para uma dada aplicação. Na Figura 18 são apresentados alguns dos tipos de juntas adesivas mais comuns [30, 33, 36].

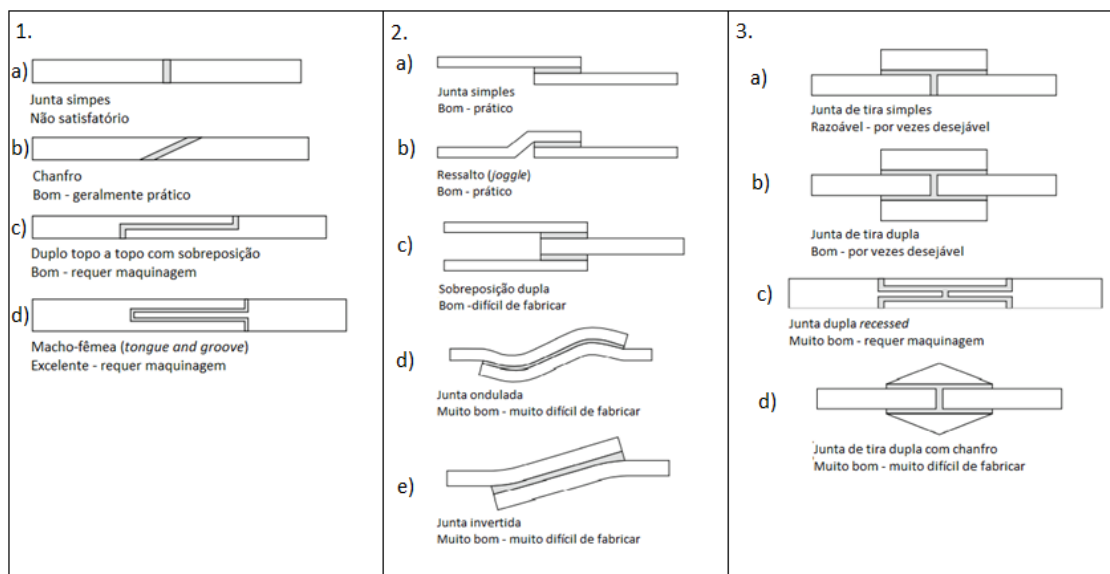


Figura 18 - Exemplos de juntas adesivas [36]

### Coluna 1 – Juntas de topo

Dentro das juntas de topo, as juntas de topo a topo (1.a) são as mais simples de fabricar, no entanto, este tipo de junta não resiste a cargas de flexão porque isso coloca o adesivo em esforço por clivagem. Daí o aparecimento de juntas “macho-fêmea”, como o caso das juntas por chanfro (1.b), apesar de diminuírem os efeitos de clivagem nas extremidades, o tempo de fabrico torna-se mais moroso e conseqüentemente mais caro para este tipo de juntas.

### Coluna 2 – Juntas de sobreposição

As juntas de sobreposição são o tipo mais comum de juntas adesivas devido à facilidade de serem fabricadas. A junta de sobreposição simples (2.a) é a mais utilizada dentro deste tipo de juntas, é de fabrico fácil e promove a que os adesivos estejam solicitados ao esforço de corte. Contudo, o carregamento não é colinear o que pode resultar em carregamentos por flexão. Assim surge a junta de sobreposição dupla (2.c) que reduz este efeito de flexão, apesar de não requer maquinagem dos aderentes, o processo de fabrico é mais demorado.

### Coluna 3 – Juntas de tira

As juntas de tira têm uma resistência superior às juntas de sobreposição. Sempre que possível deve-se optar pelas juntas de tira dupla (3.b), mesmo que o tempo de fabrico seja superior às juntas de tira simples (3.a), de forma que a carga exercida seja colinear. Além disso, reduz o esforço de momento-fletor, o que se traduz numa junta mais resistente.

Existem outros tipos de juntas adesivas, não tão comuns [36]:

- Juntas adesivas cilíndricas;
- Juntas adesivas em T;
- Juntas adesivas de canto;
- Juntas adesivas de reforço.

### 2.2.5 Degradação ambiental de juntas adesivas

Durante a sua vida útil, as juntas adesivas podem ser expostas a várias condições ambientais e diferentes tipos de esforços. Diferentes tipos de adesivos têm diferentes tipos de suscetibilidades aos mais diferentes ambientes, que podem comprometer as suas características físicas e mecânicas e conduzir a uma rutura prematura [37].

#### 2.2.5.1 *Influência da presença de água e/ou humidade*

Na presença de água, a resistência química das ligações adesivas diminui significativamente. Todavia, não existe uma teoria geral que explique o seu modo de atuação na deterioração da junta. Existem autores [38] que justificam que se trata de quebras de ligações de hidrogénio, mas mesmo assim todo esta ideia gera uma controvérsia. Se a junta for exposta à água durante muito tempo, promoverá a rotura adesiva [37]. Já a presença de humidade gera elevados níveis de porosidade, permitindo o agrupamento de grupos de moléculas de água, que vão funcionar como criadores de fendas na estrutura do adesivo, destruindo a sua integridade física e mecânica [39].

#### 2.2.5.2 *Influência da temperatura*

A exposição prolongada, ou mesmo a exposição de curto prazo, a temperaturas elevadas muitas vezes produz alterações químicas e físicas irreversíveis. Nestas condições, o tipo de falha mais provável é a rotura coesiva [37]. Temperatura elevada com ambiente húmido acelera o processo de degradação. Isto acontece porque a temperatura acelera a permeação das moléculas de água junto à camada limite de superfície [40].

### 2.2.6 Aplicações mais relevantes

Os adesivos são projetados para as mais diversas aplicações. Para além do seu principal papel no uso de ligações adesivas, estes também podem ser vistos como agentes de vedação. Os vedantes podem ser usados como isoladores térmicos ou elétricos, alisar ou filetar. Mas diferenciam-se dos adesivos por terem uma menor capacidade de adesão. No entanto, alguns vedantes podem ser usados como adesivos e outros adesivos podem ser usados como vedantes. São maioritariamente usados para unir os seguintes substratos: metais, plásticos, compósitos, espumas, materiais elastómeros, madeira, vidro e cerâmicos. As principais áreas a utilizar ligações adesivas são as seguintes [41]:

- Transporte: montagem de automóveis, camiões e autocarros, aeronaves, estruturas aeroespaciais e embarcações;
- Construção: instalação de azulejos e pisos contínuos, fabricação de vigas e treliças pré-fabricadas, adesivos de revestimento de piso, instalação de coberturas;
- Medicina: aplicações biomédicas e farmacêuticas, curativos, selar feridas;
- Embalagens: colagem de caixas e tampas, produtos descartáveis, embalagens especiais;
- Fitas: industriais, cirúrgicas e de consumo diário.
- Outras ligações rígidas: fabrico de móveis, portas, armários de cozinha, aparelhos eletrónicos, montagem de máquinas indústrias;
- Outras ligações não rígidas: fabrico de calçado, equipamentos desportivos, encadernações, fabrico de filtros de ar e tapeçaria.

Na Tabela 11 observam-se os tipos de adesivos mais comuns e aplicações industriais.

Tabela 11 - Tipo de adesivo e aplicações [41]

Tipo de Adesivo	Aplicações mais recorrentes
Natural	Indústria da madeira Indústria alimentar Indústria de papel e derivados Fabrico de vedantes para indústria de madeira e metal Indústria médica
Sintético e semissintético	Indústria do calçado Indústria médica
Termoplástico	Embalagens Indústria do vidro Ligações de materiais não-metálicos Indústria de papel Indústria automóvel
Termoendurecível	Indústria da madeira Vedantes para construção Vedantes elétricos Vedantes para aplicações críticas como aeronáutica ou aeroespacial Indústria metalúrgica

## 2.3 Previsão de resistência de juntas adesivas

O processo evolutivo das juntas adesivas está intimamente relacionado com o desenvolvimento de metodologias de previsão fiáveis que permitam aumentar a eficiência na sua utilização. Com estas metodologias é possível ultrapassar o paradigma das juntas adesivas sobredimensionadas que resultavam em estruturas mais dispendiosas e mais pesadas, devido à falta de modelos materiais precisos e de critérios de rotura adequados que se faziam notar há algumas décadas. As duas metodologias que podem ser aplicadas para a análise de juntas adesivas são as análises de forma fechada (métodos analíticos) e os métodos numéricos.

Os estudos que permitiram um avanço no estudo das juntas adesivas remontam à década de 30 com o modelo analítico de Volkersen [42], que parte do princípio de que os materiais são inteiramente elásticos e a deformação do adesivo apenas ocorre em corte. Em contrapartida, a formulação analítica torna-se mais complexa na eventualidade de o adesivo se deformar plasticamente, da utilização de substratos de compósito ou de materiais diferentes. O MEF [43] é a técnica numérica mais comumente utilizada para a análise de juntas adesivas, tendo sido inicialmente aplicada por Harris e Adams [44], que introduziram fatores como a rotação da junta, a plasticidade dos aderentes, a plasticidade do adesivo e a influência dos filetes. Recorreu-se então à mecânica dos meios contínuos para a previsão da resistência das juntas adesivas, que requer a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado.

O MEF também pode ser combinado com técnicas da mecânica de fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade das tensões quer por abordagens energéticas como a técnica do fecho da fenda virtual (TFFV). Porém, estas técnicas de modelação dificultam o processo de avaliação do crescimento da fenda devido à necessidade de voltar a criar a malha na eventualidade da propagação da fenda, o que tem repercussão ao nível do esforço computacional [45]. Ao longo das últimas décadas a modelação numérica foi alvo de grandes avanços, sendo um deles a modelação de dano por MDC. Esta técnica acopla a modelação convencional por MEF para as regiões em que não é previsto dano com a mecânica de fratura, através da utilização de elementos coesivos para promover a propagação de fendas.

Mais recentemente, começou-se a usar outra técnica, o Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX), que utiliza funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento descontínuo.

### 2.3.1 Mecânica de meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos consiste numa técnica que utiliza modelos analíticos ou numéricos como o MEF para obtenção dos valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação. A previsão é efetuada através da utilização de critérios como

a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite. Para o efeito, são comparados os valores obtidos pelos modelos com os valores admissíveis dos materiais, o que permite estimar a resistência das ligações adesivas. Na previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição através de métodos analíticos, uma solução simples é usar o modelo de Volkersen [42], que considera que o adesivo deforma apenas ao corte. Assim, considera-se a tensão máxima de corte como um critério de rotura. Adams et al. [46] usaram o critério da tensão principal máxima obtida pelo MEF para prever a resistência de juntas adesivas, com bons resultados. Para os mesmos autores, um aspeto importante na análise das tensões e deformações por métodos numéricos é a dimensão da malha, devido à existência de singularidade das tensões nas extremidades de  $L_0$ . Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos são considerados bastante intuitivos e conseguem em alguns casos reproduzir resultados satisfatórios [47]. No entanto, estes podem ser bastante complexos sem que as suas previsões sejam realistas. Estes critérios não levam em conta as concentrações de tensões existentes em entalhes e ranhuras, assim como a presença de defeitos no adesivo. De acordo com Harris e Adams [44], em situações onde se utilizam adesivos dúcteis, os critérios existentes baseados em tensões não são adequados pois, após o adesivo ceder, ainda suporta deformações elevadas antes da rotura.

### 2.3.2 Mecânica de fratura

A mecânica dos meios contínuos estabelece que a estrutura e o seu material são contínuos, o que não se adequa no caso de existirem defeitos no material, para materiais que tenham cantos reentrantes ou outras singularidades de tensão. Por outro lado, a mecânica da fratura assume que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo apresentar defeitos (fendas) causados por processos de fabrico ou por qualquer acidente durante o seu funcionamento. Teoricamente, existe uma singularidade sempre que o ângulo das faces adjacentes é inferior a  $180^\circ$ . Este efeito é extensível para a singularidade de tensões na interface entre dois materiais ligados. Neste caso, a descontinuidade de tensões continua a existir, embora deixem de existir superfícies livres. A mecânica da fratura permite avaliar se estes defeitos são suscetíveis de causar uma rotura catastrófica, ou se, durante o período de vida da estrutura, estes se mantêm com dimensões inferiores às críticas, embora se possam propagar, de forma a manter a segurança da estrutura. A fratura pela propagação de fissuras pode ser despoletada por diferentes fatores, como a aplicação de cargas lentas, de impacto, por fadiga, devido a gradientes de temperatura ou ainda por deformações dependentes do tempo [48]. Os princípios básicos da mecânica da fratura devem-se ao estudo pioneiro de Griffith [49] através do estudo de fraturas em fibras de vidro, que lhe permitiu

concluir que todos os corpos apresentam defeitos, e que a fratura ocorre a partir do mais crítico.

No ramo da indústria aeronáutica foi introduzido o conceito de projeto com tolerância ao dano, que se baseava em conceitos da mecânica de fratura linear elástica. No caso de materiais dúcteis, uma determinada quantidade de material plastifica antes da iniciação da fenda, e a fenda propaga-se de forma estável, antes da rotura final [50]. Como a teoria da Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) não é apropriada para este tipo de materiais, então foi criada a solução de HRR (Hutchinson-Rice-Rosengreen) por Hutchinson [51] e por Rice [52] para modelar roturas dúcteis.

A maioria dos estudos em juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia,  $G_I$  ou  $G_{II}$ , e o respetivo valor crítico ou resistência à fratura,  $G_c$  [53], em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade. A fratura de juntas adesivas tem lugar em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos em tração e corte e também pelo efeito dos substratos, pelo que se torna necessário introduzir o conceito de envelope da fratura. Este fornece uma função para a rotura que envolve as componentes de tenacidade de tração e corte quando as duas estão presentes na sollicitação.

### 2.3.3 Modelos de dano coesivo

O conceito de MDC teve início com estudos de Barenblatt [54] e Dugdale [55], que descreveram o dano na zona de processo da fratura na frente da fenda sob o efeito cargas estáticas, dando assim início a métodos mais refinados para caraterizar o dano em estruturas. Os MDC passaram a permitir analisar o início de uma fenda e a propagação desta no interior ou na interface de materiais, ou ainda em delaminação de compósitos. A implementação dos MDC pode ser feita em elementos de mola ou, mais convencionalmente, em elementos coesivos [56].

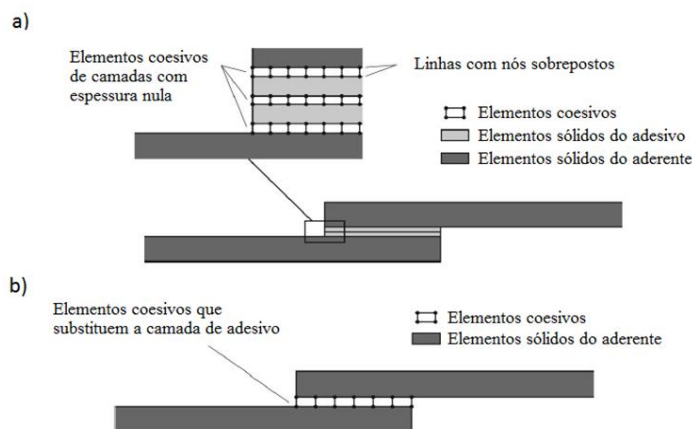


Figura 19 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [57])

Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [58]. O princípio fundamental dos MDC é que é possível introduzir artificialmente zonas de propagação de dano em estruturas, e assim avaliar o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. A técnica consiste em estabelecer leis coesivas (tração-separação) para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos (Figura 19), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos – aproximação local [59], ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva – aproximação contínua [60].

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, desvalorizando os fenômenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação das leis de tensão-deslocamento relativo entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda. Estes modelos são usados para simular a evolução elástica da tensão e conseqüentemente amaciamento até à rotura completa, permitindo desta forma simular a deterioração gradual das propriedades dos materiais. As leis de tração-separação são normalmente construídas por relações lineares em cada uma das etapas de carregamento, embora possam ser definidas de uma forma distinta, de maneira a possibilitar uma representação mais fiel do comportamento dos materiais [61]. Este modelo está implementado em *softwares*, como o caso do ABAQUS®, em duas dimensões (2D) e três dimensões (3D), para uma análise estática. O modelo 3D, relativamente ao 2D, apresenta uma componente adicional de corte [62].

#### 2.3.3.1 Tipos de leis coesivas

Ao longo dos anos, foram estudados vários MDC, como o modelo linear parabólico [63], triangular [64], exponencial [65], polinomial [66] e trapezoidal [67]. Com base no comportamento do material ou na interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos [68]. A lei triangular é a mais usada devido à sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais [69]. Trata-se de um modelo coesivo baseado em MEF de interface [68] de quatro nós e espessura nula, compatíveis com os elementos sólidos bidimensionais de oito nós do ABAQUS®. Neste tipo de modelo de dano são apresentadas duas versões distintas: modo puro e modo misto (Figura 20).

O modo puro (lei de maiores dimensões) caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva correspondente. O modo misto é a lei de menores dimensões e caracteriza-se por utilizar critérios energéticos e de tensões para combinar os modos puros de tração e corte [70]. Outro tipo de lei coesiva bastante utilizada é a

lei coesiva trapezoidal, que visa a simulação do comportamento mecânico de camadas finas de adesivos dúcteis. Estas leis simulam adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivos dúcteis em modo I [71] e modo II [72].

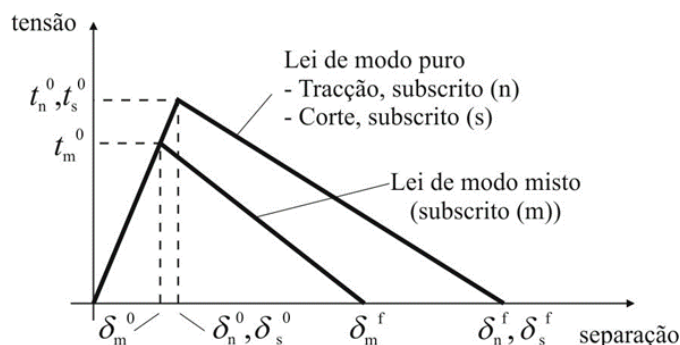


Figura 20 - Modelo coesivo triangular (adaptado de [70])

### 2.3.3.2 Determinação dos parâmetros coesivos

As análises por MDC permitem explicar o comportamento do dano em juntas adesivas. Contudo, os parâmetros coesivos devem ser calibrados com ensaios experimentais e respetivamente validados, de forma a simular com maior precisão a rotura da ligação [73]. Vários estudos têm sido publicados sobre a definição dos parâmetros coesivos ( $t_n^0$ ,  $t_s^0$ ,  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$ ). Contudo, segundo Jung Lee et al. [74], alguns parâmetros como  $t_n^0$  e  $t_s^0$  ainda não se encontram devidamente padronizados. Assim surgem algumas técnicas de análise de dados, como por exemplo o método de definição individual de parâmetros, o método direto e o método indireto, sendo que estes apresentam diferentes graus de complexidade e de precisão. Alguns trabalhos realizados para validar ensaios em modo misto, estimando os MDC em modo puro através de ensaios DCB, ENF e JSS, alcançaram bons resultados [75, 76].

O método de definição individual dos parâmetros consiste na definição isolada dos parâmetros das leis coesivas através de ensaios adequados. No entanto, este método é particularmente crítico devido a desvios entre os parâmetros do adesivo em material maciço e a ligação adesiva [77]. Este problema surge causado pelo efeito de restrição às deformações de uma camada fina de adesivos entre dois aderentes, e também devido ao modo misto de propagação de fendas em ligações adesivas. De facto, as fendas em materiais maciços tendem a crescer de forma perpendicular à direção de tensão principal máxima [78]. Em ligações adesivas finas, como o adesivo é tipicamente mais fraco e flexível do que os aderentes, as fendas são obrigadas a propagar do sentido longitudinal da ligação. O método inverso consiste no procedimento iterativo de ajuste entre as previsões numéricas e os dados experimentais, considerando por exemplo a curva  $P-\delta$ , o que permite a estimativa de leis coesivas simplificadas para as condições específicas em que se está a executar o ajuste de parâmetros. Nos métodos de definição dos parâmetros e inverso é seleccionada uma forma parametrizada da lei coesiva (por

exemplo, bilinear ou trilinear) para obter o MDC, com base no comportamento do material a ser simulado. Por outro lado, o método direto define a forma exata as leis coesivas, na medida que este método calcula os MDC da ligação adesiva a partir da informação fornecida pelos ensaios de caracterização à fratura [77], pela diferenciação das curvas  $G_I-\delta_h$  ou  $G_{II}-\delta_s$  (em que  $\delta_h$  é deslocamento em tração e  $\delta_s$  é deslocamento em corte). No entanto, no que respeita aos parâmetros dos MDC,  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$  são normalmente os principais parâmetros a determinar, em função do papel preponderante que desempenham nos resultados globais. Para avaliação de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$ , os métodos baseados na MFLE são geralmente mais simples de aplicar, embora só possam ser utilizados em adesivos que não apresentem uma ductilidade muito acentuada. De facto, a MFLE não é viável em adesivos com grande plastificação e, nestas condições, o integral- $J$  surge como alternativa para definição de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$ .

Independentemente da técnica utilizada para avaliação dos parâmetros coesivos, os ensaios tipicamente usados para a determinação de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$  são o ensaio DCB (tração) e ENF (corte). O ensaio DCB é o mais utilizado para determinar  $G_{Ic}$  pois apresenta uma geometria simples e de fácil fabrico dos provetes. Existem vários métodos para obter  $G_{Ic}$ , como métodos baseados na teoria de vigas (corrigida ou não), métodos baseados no comprimento equivalente ou integral- $J$  [79]. Rice [52] tornou possível obter uma expressão para o valor de  $G_{Ic}$  em provetes DCB através do método de integral- $J$ , que também permite obter a relação entre as tensões transmitidas e os deslocamentos na extremidade da fenda, ou seja, a lei coesiva [80]. O ensaio DCB é constituído por dois substratos colados entre si com uma camada fina de adesivo. Durante a fabricação do provete, é provocada uma fenda inicial numa das extremidades do mesmo. Todavia, podem ser sentidas algumas dificuldades quando se determina o valor de  $G_{Ic}$ . Por vezes a propagação da fenda pode ser instável e, nesses casos, a medição do comprimento de fenda durante o ensaio torna-se difícil. Em alguns ensaios DCB, a ponta da fenda pode não ser claramente visível, dependendo do adesivo utilizado [81]. A norma referente ao ensaio DCB é a norma ASTM D3433-99 [82], onde está enunciado o método para execução de ensaio. O esquema definido para este ensaio encontra-se representado na Figura 21. Na mesma norma é indicada a forma de determinar a altura mínima do substrato ( $h$ ), de forma a evitar deformação plástica dos substratos durante o ensaio, pela equação (1) em que  $T$  corresponde a 150% da carga máxima necessária para iniciar a fenda na ligação adesiva,  $a$  é o comprimento da fenda,  $B$  é a largura do substrato e  $\sigma_y$  corresponde à tensão de cedência do material do substrato.

$$h = \sqrt{\frac{6Ta}{B\sigma_y}} \quad (1)$$

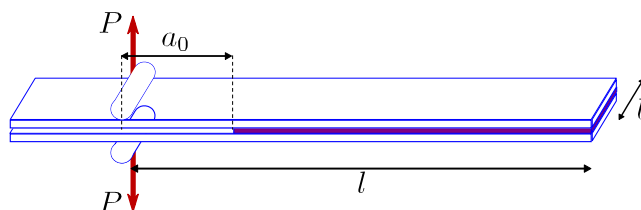


Figura 21 - Geometria do provete DCB [83]

O ensaio ENF descreve-se como uma viga simplesmente apoiada nas extremidades e carregada a meio vão, com um comprimento da pré-fenda inicial ( $a_0$ ) definido, onde a meio é aplicada uma carga  $P$  (Figura 22). A solicitação aplicada origina a propagação da fenda sem haver a separação dos aderentes. Para que a propagação da fenda seja estável, é necessário que o  $a_0$  seja pelo menos igual a 70% do comprimento total do provete ( $2l$ ) [84]. Como os métodos utilizados para determinação dos parâmetros coesivos tipicamente requerem a medição de  $a$  durante a propagação, podem-se observar dificuldades na estimativa de  $G_{IIC}$  por esta medição [85].

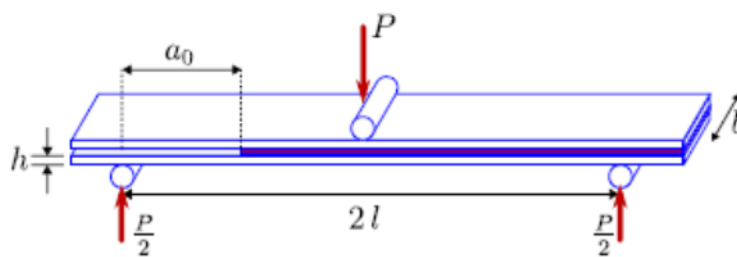


Figura 22 - Geometria de provete ENF [83]

#### 2.3.4 Mecânica do dano

A mecânica do dano apresentada neste capítulo diz respeito a métodos alternativos aos MDC, que permitem a introdução de dano nos elementos pela redução dos esforços transmitidos. Os métodos utilizados na mecânica do dano estabelecem um parâmetro de dano para modificar a resposta dos materiais através da redução de resistência ou rigidez. Como exemplos desta metodologia referem-se os trabalhos de Daudeville e Ladevèze [86] para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou de Khoramshad et al. [87] para camadas finas de adesivo. Como resultado do parâmetro de dano estabelecido, torna-se possível a simulação gradual do dano e da fratura de uma fenda, com trajetória pré-definida ou arbitrária dentro de uma região finita [56].

As variáveis de dano podem ser classificadas em dois grupos. No primeiro grupo as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, embora estas não estejam diretamente relacionadas com o mecanismo de dano. No segundo grupo, as variáveis são relacionadas com a definição física de um género específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [88]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [89] ou do número de ciclos para análises de

fadiga [90, 91]. Comparativamente aos MDC, e em aplicações específicas, a mecânica do dano pode ser recomendada caso o dano seja generalizado ou caso o caminho de propagação da fenda não seja conhecido já que, pelos MDC, a propagação da fenda é limitada a trajetos pré-definidos [92].

Hua et al. [93] propuseram um modelo de mecânica do dano com resultados independentes da malha para a previsão de resistência de juntas adesivas com um adesivo dúctil sujeitas a degradação ambiental. Na modelação numérica, este efeito era alcançado com a introdução de um parâmetro de dano com base no deslocamento na equação constitutiva dos materiais, dependente do grau de humidade. Este parâmetro de dano foi calibrado através de ensaios à fratura em provetes à flexão em modo misto, e permitiu reduzir os valores de tensão na junta dependendo do deslocamento plástico equivalente, o que permitiu obter resultados independentes da malha. As previsões da resistência da junta e do caminho do dano foram coerentes com os resultados experimentais.

Chen et al. [94] usaram uma técnica da mecânica do dano em JSS baseada na energia de deformação plástica média para a previsão do início e propagação do dano, e também da carga de rotura. A técnica utilizada consistiu em analisar, após obter uma solução convergente num dado incremento de carga, se a condição de rotura tinha sido atingida nalgum elemento da estrutura. Perante estas condições, os valores de  $E$  e do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) do material na respetiva zona eram reduzidos quase até zero para simular a existência de rotura. A comparação dos resultados obtidos por esta técnica e os ensaios experimentais revelou resultados bastante positivos.

### 2.3.5 Método de elementos finitos estendido

O MEFX é uma evolução recente do MEF, que permite a análise e modelação do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas, baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura, em vez dos valores de  $t_n^0/t_s^0$  ou  $\delta_n^0/\delta_s^0$  (deslocamentos de tração e corte correspondentes a  $P_{máx}$ , respetivamente) utilizados no MDC, pela mesma ordem. No MEFX, comparativamente com os MDC, deixa de ser necessário que a fenda siga um caminho pré-definido, o que constitui uma vantagem significativa. Assim, a fenda passa a poder propagar livremente no interior da estrutura sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das descontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [95]. Belytschko e Black [96], no final dos anos 90, apresentaram as características fundamentais deste método, baseadas no conceito de partição de unidade, e que pode ser implementado no MEF pela introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto extremidade da fenda, para permitir o crescimento e separação entre as faces da fenda [97]. Devido ao crescimento da fenda, a extremidade desta muda a sua posição e orientação continuamente, dependendo das condições de carga e da geometria da estrutura, e em simultâneo são

criadas funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos elementos finitos na proximidade da extremidade da fenda.

O MEFX considera inicialmente um comportamento linear elástico dos materiais, que é representado por uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as separações normais e de corte. O dano e a rotura são simulados pelo MEFX por critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós fantasmas e reais de elementos fraturados. Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões principais máximas ou das deformações principais máximas, enquanto as leis tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fratura podem ser lineares ou exponenciais [98].

### 2.3.6 Métodos sem malha

Os métodos de previsão de resistência que não recorrem ao uso de malha têm vindo a tornar-se, cada vez mais, uma alternativa aos restantes métodos de previsão. Apesar de esta técnica já se encontrar bastante estudada em diversos ramos da engenharia, poucos trabalhos se encontram direcionados à previsão de resistência no que diz respeito a ligações adesivas.

Ainda que o MEF seja usado com sucesso em diversos estudos, este apresenta algumas limitações. Situações em que ocorram grandes deformações afetam o rigor deste método, devido a distorções na malha. Uma reorganização da malha poderia solucionar o problema, no entanto isto resultaria num aumento acentuado do esforço computacional. Por isto, o MEF não é a alternativa mais viável em situações em que há a constante necessidade de reajustar a malha. Assim, para transpor os problemas destes métodos, surge a necessidade de desenvolver métodos sem malha [99].

A aplicação de um método sem malha normalmente segue os seguintes princípios. Primeiro, estuda-se a geometria do problema e estabelece-se o domínio sólido e contorno. De seguida definem-se as condições naturais e essenciais dos limites. Posto isto, o domínio e fronteiras do problema são definidos por um conjunto de nós com uma distribuição que pode ser regular ou irregular. Como representado na Figura 23, ao contrário dos métodos de previsão mais convencionais, neste método o conjunto de nós não forma uma malha, uma vez que para a formulação das funções (de aproximação ou interpolação) não é necessário qualquer tipo de conhecimento prévio relativo à relação entre cada um dos nós. Na verdade, a única informação necessária é a localização espacial de cada nó.

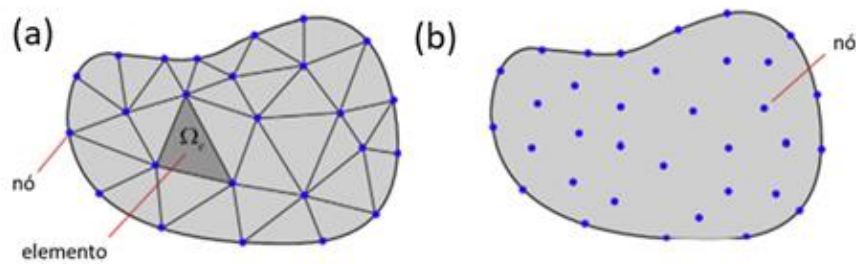


Figura 23 - Distribuição de nós através de um método de previsão com malha (a) e um método sem malha (b) num modelo em duas dimensões (adaptado de [100])

Assim como os métodos dependentes de malha, a densidade de nós, bem como a sua distribuição, afetam o desempenho dos métodos sem malha. Uma distribuição de nós mais refinada leva a resultados mais precisos. No entanto, ao aumento do número de nós está também associado a um aumento do esforço computacional. Assim, zonas em que seja previsível uma elevada concentração de tensões devem apresentar uma densidade nodal maior, quando comparadas com zonas em que a concentração de tensões não é espetável. A utilização destes métodos pode apresentar diferentes modelos. Alguns dos modelos mais comuns são: *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) [101, 102], *Element-Fre Galerkin* (EFG) [103], *Reproducing Kernel Particle* (RKP) [104, 105] e *Radial Point Interpolation Method* (RPIM) [106], que surge como melhoria dos modelos *Point Interpolation Method* (PIM) [107] e *Point Assembly Method* (PAM) [108].

No que toca a ligações adesivas, este método torna-se verdadeiramente vantajoso quando usado em problemas de mecânica da fratura ou de dano, uma vez que é possível simular a evolução do dano, sem que para isso seja necessário o reajuste da malha. Na verdade, nos modelos que não recorrem ao uso de malhas, o caminho de propagação da fenda é independente da distribuição das partículas no modelo [109]. Ainda que estes modelos sejam de uma elevada complexidade de aplicação e exijam um elevado esforço computacional, estudos recentes comprovam que este tipo de análise é mais capaz e preciso que outros métodos mais convencionais. De facto, o uso correto de métodos sem malha pode até resultar numa eficiência computacional superior à de modelos em 3D, obtidos por elementos finitos [110].

### 2.3.7 Estado-da-arte

Na Tabela 12 estão apresentados alguns dos estudos atuais mais relevantes na matéria de resistência de juntas adesivas, considerados de extrema importância na contextualização do referido tema e os seus conceitos fundamentais.

Tabela 12 – Estado-da-arte no âmbito da revisão de resistência de juntas adesivas

Artigo	Descrição
Ramalho et al. [111]	<p>O presente artigo de revisão teve por base comparar os métodos mais relevantes para a previsão de resistência de juntas adesivas. Os autores dividem a análise de tensões e previsão de resistência em dois tipos de métodos, métodos analíticos e numéricos. Os métodos analíticos estão associados a resultados rápidos e são na sua maioria fáceis de programar num <i>software</i> para análise de dados utilizando uma folha de cálculo como o Microsoft Excel® ou <i>software</i> de manipulação como o Matlab®. Estes métodos tipicamente negligenciam a ductilidade dos adesivos, logo só podem dar previsões satisfatórias com adesivos frágeis. Já os métodos numéricos são objeto de estudo intenso por parte de diferentes autores. As abordagens numéricas foram divididas em seis categorias diferentes, nomeadamente mecânica de meios contínuos (MMC), mecânica de fratura (MF), mecânica do dano (MD), modelo de dano coesivos (MDC), método de elementos finitos estendido (MEFX) e métodos sem malha (MM). Conclui-se que, embora os métodos analíticos tenham evoluído ao longo dos anos, estes não são a melhor opção para estudar a resistência dos diferentes <i>designs</i> de juntas adesivas. Dentro dos métodos numéricos os autores concluíram que a mecânica de fratura e mecânica do dano não são adequadas para juntas adesivas. Por outro lado, o MDC foi o método que melhor previu a resistência de vários <i>designs</i> de juntas adesivas com os menores erros.</p>
Sousa et al. [112]	<p>O presente trabalho teve por objetivo comparar diferentes métodos analíticos e numéricos na previsão da resistência de juntas de sobreposição simples com diferentes comprimentos de sobreposição (<math>L_0</math>). Para a análise experimental foram fabricadas juntas adesivas com aderentes em liga de alumínio (AW6082 T651) e três tipos de adesivos diferentes: um adesivo epóxi frágil (Araldite® AV138), um adesivo epóxi moderadamente dúctil (Araldite® 2015) e um adesivo poliuretano dúctil (Sikaforce® 7888). A largura de sobreposição era constante (<math>B=40</math> mm) e <math>L_0</math> variava entre quatro medidas diferentes (12,5, 25, 37,5 e 50 mm). Para a previsão de resistência entre diferentes valores de <math>L_0</math> e três tipos de adesivos foram utilizados diferentes métodos analíticos, juntamente com duas técnicas</p>

---

numéricas: modelos de dano coesivo (MDC) e o método de elementos finitos eXtendido (MEFX). Comparativamente aos resultados experimentais, os métodos analíticos evidenciaram que só dão resultados relativamente exatos em condições muito específicas. O modelo de Volkersen é preciso ao prever o comportamento de adesivos frágeis em  $L_0$  curtos, mas falha em comprimentos de sobreposição maiores ou adesivos dúcteis (independentemente do  $L_0$ ). Os modelos de Goland e Reissner, previram de forma aceitável os resultados para todos os adesivos e configurações de junta possíveis, ainda que, assim como o modelo de Volkersen sejam mais precisos em adesivos frágeis. Já o modelo Hart-Smith, revelou ser o melhor para todos os adesivos e várias configurações. A análise de MDC com a lei triangular revelou ser um método muito preciso, com exceção à aplicação perante adesivos muito dúcteis. Por outro lado, a análise MEFX não foi adequada, especialmente para o crescimento de fendas em modo misto.

---

**Dionísio et al. [113]**

Este trabalho teve por princípio a utilização da mecânica de fratura (MF) com vista a propor e avaliar um novo método para a determinação das singularidades críticas de tensão em juntas adesivas utilizadas na adesão entre materiais compósitos. Para a análise experimental foram fabricados provetes constituídos por aderentes de PRFC colado com adesivo Araldite® AV138 e oito comprimentos de sobreposição diferentes ( $L_0$ ). As análises numéricas foram realizadas através do MEF e tiveram por base a implementação do critério ISSF (abordagem utilizada para avaliar as descontinuidades em cantos de interface) e do *software* Matlab®. Sobre a metodologia proposta, os resultados numéricos encontrados podem ser considerados promissores quando comparados com os resultados experimentais. Por outro lado, considerou-se a simplicidade do método uma das mais valias na análise de juntas adesivas. Em suma, foi possível concluir que o método proposto foi aplicado com sucesso.

---

**Kim et al. [114]**

Neste artigo, a análise tradicional de elementos finitos (MEF) foi combinada com a mecânica de dano (MD) a fim de considerar o comportamento que a variação de diferentes parâmetros de material adesivo traz para juntas de sobreposição simples. Foram considerados dois tipos de adesivos, o Araldite® AV138 (frágil) e o Araldite® 2015 (dúctil), considerando cada um em separado e o conjunto

---

---

dos dois em três juntas com percentagens diferentes (Fração de volume de adesivo dúctil: 40%, 50% e 60%). O método Taguchi (método estatístico) pode ser utilizado para determinar parâmetros que afetam a previsão da carga máxima a nível de falhas em JSS. Foi utilizado o ABAQUS® UMAT para realizar a análise numérica tendo em conta a mecânica de dano (modelo de dano contínuo de modo misto). O método utilizado permitiu prever o caminho da propagação da fenda e zona de fratura na camada adesiva. Para além disto, este estudo permitiu comprovar que a utilização de dois adesivos em conjunto pode aumentar significativamente a resistência a falhas estruturais, em comparação ao JSS que utilizam apenas um adesivo.

---

**Campilho et al. [115]**

Este artigo visou avaliar as capacidades e/ou limitações que o *software* ABAQUS® tem para avaliar o comportamento e resistência das juntas adesivas, considerando MDC ou MEFX. Foram consideradas juntas adesivas de sobreposição simples e dupla, fabricadas através de aderentes em alumínio e adesivo Araldite® AV138. A testagem incidu sobre provetes com comprimentos de sobreposição variável entre 5 e 20 mm. Através da comparação direta entre os dados experimentais e os resultados das simulações, foi concluído que a modelação por MDC é precisa. Já o MEFX não mostrou ser adequado para avaliar o comportamento da resistência de juntas adesivas, uma vez que a propagação da fenda não refletiu o comportamento real das juntas. No entanto, devido à fragilidade do adesivo, o MEFX foi satisfatório para prever a resistência das juntas através da consideração da rotura pelo início da fenda no adesivo.

---

**Ramalho et al. [116]**

Neste artigo foram utilizados dois métodos numéricos em conjunto, a MF e o RPIM (método sem malha) para prever a resistência de juntas adesivas. O trabalho experimental foi realizado por ensaio à tração em provetes de junta de sobreposição simples, em três tipos de adesivos (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888) e substratos de uma liga de alumínio (AW6082 T651). Através da comparação dos resultados obtidos pelo método sem malha e o MEF, foi possível concluir que este primeiro método em conjunto com o critério CLS é apropriado para prever a resistência de juntas adesivas. Salienta-se também que a MF obteve resultados precisos, provando que os dois métodos em conjunto proporcionaram bons resultados.

---

## 2.4 Ligações adesivas na indústria naval

Apesar de algumas exceções, a indústria naval tem sido relativamente conservadora quando se trata de implementar o uso de adesivos. O sector marítimo tem aplicado adesivos com grande sucesso nos últimos anos em muitas aplicações não estruturais, mas recentemente o interesse tem vindo a mudar em direção a aplicações estruturais.

Parte deste conservadorismo é uma consequência da relutância das forças navais militares do mundo para usar adesivos devido à inflamabilidade em situações de guerra e potencial desgaseificação em espaços fechados (submarinos). Contudo, outro fator para o crescimento lento dos adesivos na indústria naval é o ambiente de fabrico que existe em muitos estaleiros e fábricas de navios que não permite manter condições de temperatura e humidade controladas. Os tratamentos químicos de substratos são geralmente utilizados na indústria aeroespacial e automóvel para melhorar a resistência da junta obtida. No entanto, a indústria da construção naval não pode, muitas vezes, suportar esta preparação de superfície de alta qualidade devido aos elevados custos, e o processamento tem de continuar a ser básico. Outro problema associado ao fabrico destas grandes embarcações é a natureza hostil de um estaleiro naval, que pode não ajudar a garantir as temperaturas de cura necessárias [117].

As ligações adesivas têm sido mais bem aceites no fabrico de pequenas embarcações, por outro lado, devido ao uso de materiais leves como compósitos e alumínio, em vez de aço. Neste âmbito, os adesivos mostram ser um método de união mais eficiente perante estes materiais [117].

### 2.4.1 Aplicações adesivas na indústria naval

Para além das ligações adesivas associadas aos barcos de canoagem, as ligações adesivas podem ser encontradas nas demais embarcações ou estruturas navais. Nesta secção, vários exemplos de estruturas são apresentados, a fim de ilustrar o tipo de juntas utilizadas na indústria naval [118].

#### Barcos de recreio (ou pequenas embarcações)

O fabrico de pequenas embarcações é em grande parte manual, e mais de 90% das embarcações com mais de 6 m de comprimento são fabricadas a partir de polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV). Os adesivos podem ser usados no casco para colar as anteparas, para unir o casco ao *deck* e para unir as mais diversas partes interiores (Figura 24). Outra aplicação é a colagem de janelas de vidro ou painéis de polímero transparente, utilizando adesivos flexíveis de poliuretano.



Figura 24 – Tipos de ligações adesivas em pequenas embarcações [118]

### Barcos de competição

Para o fabrico de embarcações de competição existem principalmente dois tipos de ligação adesiva. O primeiro está associado ao fabrico do material em que são fabricadas estas embarcações, um material de estrutura sandwich. A sandwich é fabricada através da colagem de peles a um núcleo, que pode ser por exemplo em ninho de abelha. Na Figura 25 pode ser visto em pormenor de este tipo de estrutura.

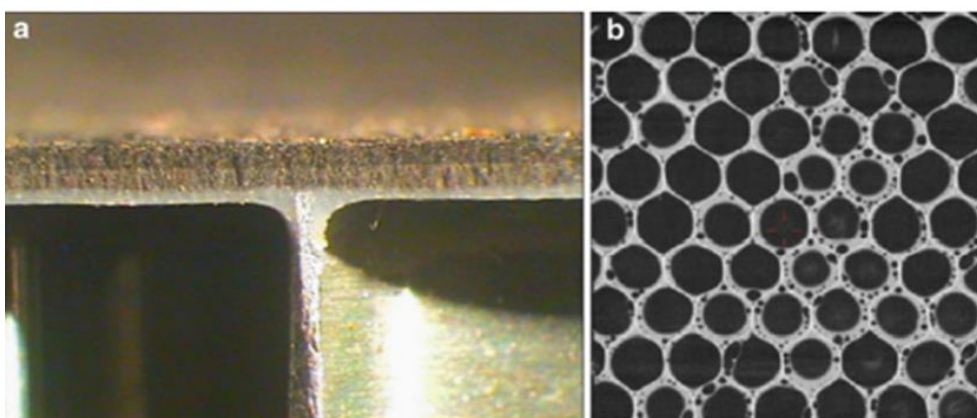


Figura 25 - Estrutura em sandwich aplicada ao fabrico de barcos de competição: (a) pele sob núcleo, (b) visão por tomografia de raio-X dos defeitos do adesivo na interface colada [118]

O segundo tipo de ligação adesiva está associado a nível estrutural. Devido aos custos elevados os cascos são produzidos em secções através de uma combinação de adesivo e sobrelaminação, e toda a estrutura é aquecida com um vácuo aplicado (Figura 26).



Figura 26 - Fabrico do casco de um barco de competição [118]

### Estruturas offshore

Apesar de existirem poucas aplicações de ligações adesivas na indústria offshore a situação está a evoluir no sentido de existirem cada vez mais ligações adesivas. Algumas das áreas em que podem surgir este tipo de ligação são a fixação de aviso de segurança e equipamentos, pequenos suportes de tubos metálicos, tubagem de baixa pressão (para resistência à corrosão), modificação da chaparia de convés, entre outros. No entanto, estão a ser aplicadas ligações adesivas para unir secções de tubos em sistemas de tubagens de refrigeração e incêndios (Figura 27).



Figura 27 - Montagem de tubagens para estruturas offshore [118]

### 2.4.2 Ligações mais comuns

As ligações adesivas na construção de embarcações podem não se dar exclusivamente por colagem. Na Figura 28 são apresentadas algumas ligações típicas em embarcações e respectivos sentidos dos esforços a que podem estar mais sujeitos, nomeadamente [119]:

- Colocação de partes interiores – As colocações de partes interiores podem ser utilizadas para fim estruturais ou não. A junta normalmente formada, é em parte laminada e outra parte colada;
- Colocação das anteparas ao casco – A ligação formada pode ser unicamente colada ou uma combinação de colagem mais aparafusada;
- Junção entre o casco e o *deck* – A ligação formada pode ser obtida por diferentes opções, dependente das condições de resistência que tem de oferecer. Esta união pode ser obtida por ser puramente colada, rebitada e colada, aparafusada e colada, ou sobrelaminada.

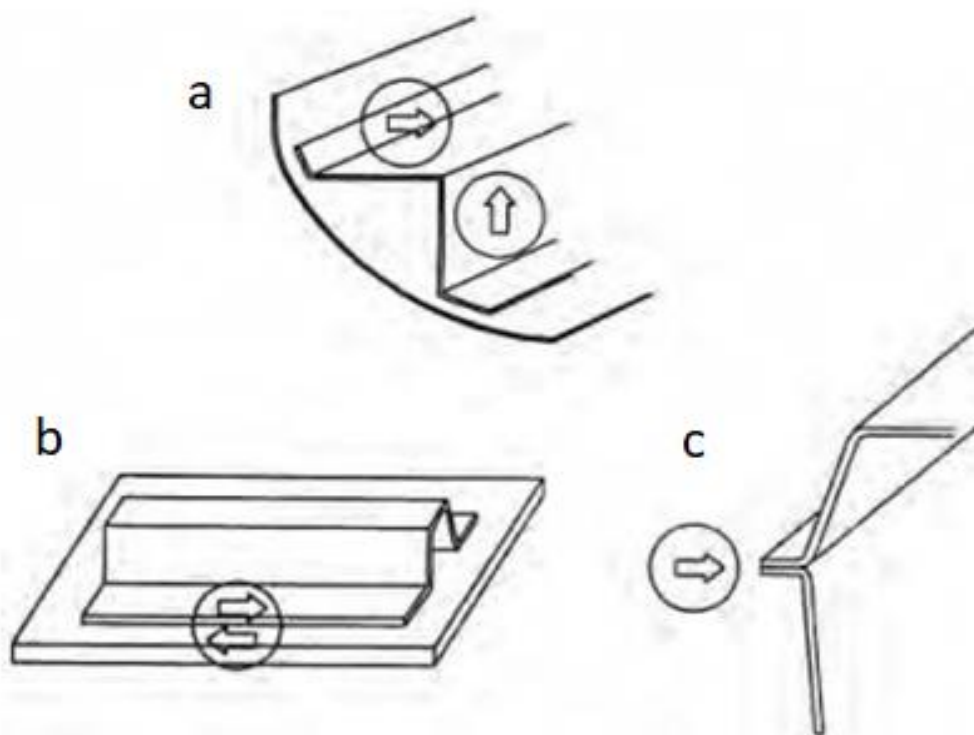


Figura 28 - Tipos de ligações adesivas e esforços [119]

### 2.4.3 Particularidades das ligações adesivas

Algumas particularidades são necessárias para garantir a qualidade das ligações adesivas em barcos e aplicações navais, nomeadamente [119]:

- Resistência à humidade – É um dos fatores determinantes na escolha de um adesivo para aplicações aquáticas. A imersão direta é apenas esperada em partes aquáticas, mas a humidade é normalmente elevada em qualquer caso. Existem vários adesivos capazes de resistir à humidade e adequados para o uso em água doce ou salgada. É aconselhado um bom tratamento superficial e, sempre que seja possível, a blindagem da junta com um vedante;
- Resistência ao calor – As embarcações ou estruturas podem estar sujeitas a temperaturas entre -30°C a 30°C, ou até mesmo a 60°C quando submetidas sob luz solar direta. Este aspeto deve ser tido em conta, especialmente se a diferença nos coeficientes de expansão térmica é grande. A temperatura traz impactos negativos na resistência e rigidez dos adesivos;
- Resistência aos UV – Tipicamente, as ligações adesivas de poliuretano e epóxi têm de ser protegidas contra a luz solar direta. Na prática muitas juntas são protegidas por uma questão de aparência, utilizando-se borracha ou perfis de alumínio. As janelas e outros substratos transparentes são, naturalmente, problemáticos contra a luz solar. As estruturas aquáticas são mais suscetíveis devido ao reflexo UV da água;
- Resistência a esforços – A resistência do adesivo enquanto tal não é necessariamente um valor muito crucial em embarcações e aplicações náuticas porque a geometria e a área de ligação podem normalmente ser alterados para aumentar a resistência da junta de ligação.

Apesar de ser necessário cumprir algumas condições para garantir a qualidade da ligação adesiva, também é igualmente importante garantir que o adesivo utilizado cumpre os requisitos estipulados para poder ser utilizado em ambiente marinho.

Na Tabela 13 é possível observar os tipos de teste a que os adesivos estão sujeitos para terem aprovação para fins marinhos [118].

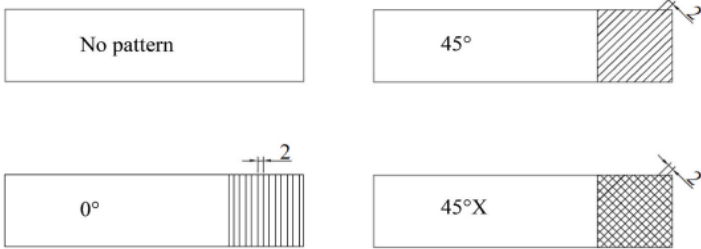
Tabela 13 - Requisitos típicos para aprovação de adesivos marinhos [118]

Tipo de teste	Condição	Requisitos
Ensaio de corte	Temperatura controlada (temperatura ambiente)	Valores propostos pelo fabricante alcançados
	Temperatura elevada	
	Temperatura baixa	
Ensaio de clivagem ou arrancamento	Temperatura controlada (temperatura ambiente)	Valores propostos pelo fabricante alcançados
	Temperatura elevada	
	Temperatura baixa	
Ensaio de fadiga	ASTM D3166	Valor alvo alcançado (por exemplo $10^7$ ciclos)
Ensaio de imersão	Água	Mínimo % de retenção alcançado
	Combustível	
Temperatura de transição vítrea	ASTM D3166 (calorimetria)	Acima do valor mínimo (por exemplo 70°C para barcos militares)

#### 2.4.4 Estado-da-arte

Na Tabela 14 estão apresentados alguns dos estudos atuais mais relevantes para a análise da resistência de juntas adesivas para aplicações náuticas, considerados de extrema importância na contextualização do referido tema.

Tabela 14 – Estado-da-arte no âmbito da revisão de juntas adesivas para aplicações náuticas

Artigo	Descrição
<b>Alderucci et al. [120]</b>	<p>O objetivo deste trabalho teve por base testar experimentalmente os efeitos de diferentes padrões de superfície produzidos por gravura mecânica em juntas adesivas de compósitos ou alumínio. Os provetes foram fabricados em liga de alumínio AA5083H111 com 6 mm de espessura e em compósito de fibra de vidro com 5 mm de espessura, o adesivo utilizado foi um adesivo epóxi 3 M 7260. Foram considerados quatro tipo de padrões para as juntas de sobreposição (sem gravura, padrão 0°, padrão 45° e padrão 45°X) (Figura 29) ao qual foram sujeitos a ensaios de tração.</p>  <p>Figura 29 - Padrões produzidos por gravura mecânica [120]</p> <p>Perante os resultados encontrados as juntas Al/Al apresentaram maior resistência nos padrões 45° e 45°X (9055,2 N e 10303,2 N, respetivamente) em contrapartida provete com o padrão 0° apresenta menos resistência que o provete “sem padrão”, ou seja, quando se compara estes dois a produção de um padrão não traz vantagens nenhuma. As juntas Al/compósito apresentam melhor resistência quando são fabricados com algum tipo de padrão (8820,0 N, 9580,5 N e 9872,3 N, respetivamente para 0°, 45° e 45°). Concluindo, em aplicações marítimas onde materiais leves precisam de ser unidos (por exemplo, alumínio e/ou compósitos) a existência de ranhuras pode contribuir para melhorar a resistência mecânica da junta adesiva.</p>
<b>Diez de Ulzurrun et al. [121]</b>	<p>Para a realização deste trabalho foi realizado um ensaio experimental para o teste de várias juntas adesivas provenientes de exemplos “casco + <i>deck</i>”, a fim de avaliar a resistência e desempenho em condições de serviço, e o comportamento dinâmico sob cargas cíclicas. Os testes também foram utilizados para a comparação de vários adesivos, nomeadamente metilmetacrilato (MMA) e</p>

---

poliuretano (PU) monocomponente ou bicomponente, que poderão ser usados nestes tipos de juntas adesivas. O material e o processo de fabrico utilizado para fabricar a amostra de teste é a mesma que as utilizadas para o fabrico de iates. O MEF juntamente com a mecânica de fratura (MF) foi usado para analisar os níveis de resistência e tensão, na linha de adesão, no momento da rotura. Este mostra uma distribuição diferente quando os provetes se encontram sujeitos a arrancamento ou em solicitação combinada de arrancamento e flexão. A tensão máxima, onde ocorre a falha inicial, é deslocada da linha de centro do adesivo para a interface com o aderente. Os autores concluíram que não é possível apontar apenas um sistema adesivo como candidato ideal, pois todos tem pontos fortes e fracos.

---

**Di Bella et al. [122]**

Na construção naval existe a necessidade de unir diferentes materiais, como por exemplo a ligação adesiva obtida entre o “casco + *deck*”. Neste artigo experimental foi estudado o comportamento de juntas adesivas de sobreposição simples. Foram fabricadas juntas híbridas a partir de dois tipos de adesivos de base SMP (*Silyl Modified Polymer*) aplicados entre três combinações de diferentes tipos de substratos (alumínio AISI 316-PMMA; vidro-PRFV; PRFV-PMMA). Os provetes foram sujeitos a esforços de tração e os resultados obtidos foram de encontro aos indicados pelo fabricante do adesivo. Foi aplicada uma técnica estatística (ANOVA) para comparar diferentes interações entre os diferentes parâmetros aplicados. Os resultados da ANOVA permitiram confirmar que cada adesivo é significativamente diferente em termos de resistência para JSS, e que os adesivos e selantes podem ser aplicados independentemente do tipo de substratos, no entanto, com exceção do vidro-PRFV. Este último mostrou uma tendência deslocada para valores de deslocamento superiores aos dos outros tipos de substratos para todos os adesivos testados. A maior parte das amostras sofreu rotura coesiva, o que indica uma boa preparação superficial dos substratos.

---

**Broughton et al. [123]**

Este trabalho numérico avaliou o efeito da humidade, geometria do provete e das propriedades do aderente sobre uma junta de sobreposição simples para ambientes náuticos. Para a análise dos provetes utilizou-se o MEF implementado no *software* ABAQUS® para estabelecer os efeitos provocados na rigidez das juntas e distribuição de tensões no interior da camada de adesivo. O provete foi construído num

---

---

modelo de elementos finitos bidimensional e a ligação adesiva entre os aderentes foi considerada perfeita. Para encurtar o período de difusão da humidade no adesivo, foi avaliado o comportamento de uma junta perfurada num só aderente. O estudo concluiu que o efeito da humidade, quando comparado com uma junta seca, provoca a perda significativa de resistência, mas apenas 5% da rigidez foi perdida após 12 dias de imersão. Os estudos revelaram que as distribuições de tensão são sensíveis as propriedades do material aderente, espessura do material aderente, espessura do adesivo e carga aplicada.

---



# 3. DESENVOLVIMENTO

3.1 OBJETIVOS E REQUISITOS DO TRABALHO

3.2 PROCESSOS UTILIZADOS ATUALMENTE NA EMPRESA

3.3 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE FABRICO

3.4 TRABALHO EXPERIMENTAL

3.5 TRABALHO NUMÉRICO



## 3 DESENVOLVIMENTO

### 3.1 Objetivos e requisitos do trabalho

A presente dissertação tem como objetivo principal o estudo da resistência de ligações adesivas usadas no fabrico de embarcações de canoagem, mais concretamente a ligação adesiva produzida entre o casco e o *deck*, representada na Figura 12.

Para este efeito, realizou-se um estudo numérico sobre os carregamentos que o adesivo e o tipo de junta adesiva, utilizados pela empresa no fabrico das suas embarcações, possam estar sujeitos. Por outro lado, devem ser propostas outras soluções viáveis que possam melhorar a qualidade e resistência das embarcações produzidas.

No decurso dos objetivos propostos, alguns passos devem ser respeitados de forma a satisfazer os requisitos:

- Caracterização das propriedades mecânicas e de fratura do adesivo a utilizar;
- Especificação dos materiais utilizados no fabrico da estrutura *sandwich*;
- Respeitar a geometria da junta adesiva, nomeadamente considerar o formato de um *kayak* monolugar (K1);
- Estabelecer as possíveis cargas a que a junta adesiva possa estar sujeita;
- Modelação da estrutura em ABAQUS®;
- Avaliação numérica para determinar as tensões instaladas e resistência das juntas com recurso ao ABAQUS®.

Para atingir estes objetivos vai ser usado o *software* ABAQUS® para a modelação das estruturas e avaliação numérica.

### 3.2 Processos utilizados atualmente na empresa “A”

A produção de embarcações e outros objetos necessários à prática desportiva, como bancos, finca-pés e apoios de pé, têm em comum a utilização de materiais compósitos. A maioria dos processos de materiais compósitos está associado ao fabrico dentro de um molde, através da moldação manual.

Previamente ao fabrico de qualquer embarcação, é realizado um protótipo do barco, a partir do qual é fabricado um molde para ser fácil produzir embarcações em massa. O molde por si só é construído em fibra de vidro, resina e vinil e, deve possuir determinadas características, como ser de dimensões superiores às da peça a fabricar

para que seja possível, quando em molde aberto, fixar o saco de vácuo e permitir que existam pontos de fixação para unir com outro molde (por exemplo, molde do casco e molde do *deck*). É necessário que a superfície interior do molde esteja completamente limpa para que se produza uma pela com boas características. Os moldes fabricados têm uma vida útil associada a cerca de 200 embarcações.

Os principais processos utilizados na empresa, para o fabrico das suas embarcações, são:

- Moldação manual

A moldação manual é um dos processos de processamento de compósitos mais antigos e largamente utilizados, embora este não represente o de maior produção, visto que a cadência de produção é a sua maior limitação. Neste método, as fibras são aplicadas no interior do molde e a resina é colocada e impregnada à mão com o auxílio de um pincel e/ou rolo. O pincel é utilizado para distribuir a resina uniformemente ao longo das fibras e o rolo é usado para extrair bolhas de ar do interior das fibras, o que permite garantir a total impregnação das fibras na resina. Normalmente o laminado é deixado a curar em condições atmosféricas normais ou é colocado num ambiente de alta temperatura. A Figura 30 ilustra os fundamentos desta técnica. A secção de molde aberto da peça será o lado de superfície de maior qualidade. Para aumentar a qualidade deste lado e o proteger, é recomendado aplicar um revestimento de *gelcoat* e deixar endurecer um pouco antes de dispor as fibras no interior do molde [124, 125].

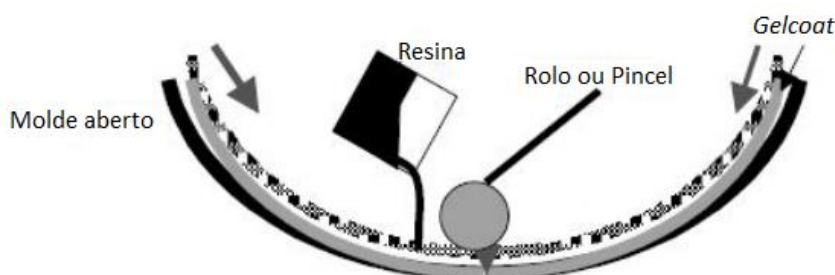


Figura 30 - Moldação manual [124]

As maiores vantagens deste método estão relacionadas com o baixo custo de equipamento, possibilidade de utilizar materiais relativamente acessíveis (vasta escolha de fornecedores e tipos de materiais), versatilidade no tamanho, forma e configuração dos laminados, e obtenção de peças com boas propriedades mecânicas e físicas. Porém, as desvantagens deste processo estão associadas a custos laborais elevados, taxas de produção lentas devido dos necessários tempos de cura, e o facto de que o desempenho da peça altamente depender do nível de habilidade do trabalhador em conseguir uma peça bem impregnada [124, 125].

- Moldação em saco de vácuo

A moldação manual pode ser sucedida pela aplicação de saco de vácuo. Neste processo, o laminado obtido por empilhamento manual é envolto num saco de vácuo contra o

molde. Com auxílio de uma bomba de vácuo, o ar é retirado do interior do saco. O saco espreme o laminado impregnado expulsando o excesso de resina do interior do laminado e conseqüente o ar, o que promove assim a consolidação do laminado. A Figura 31 apresenta o esquema representativo do processo [124, 125].

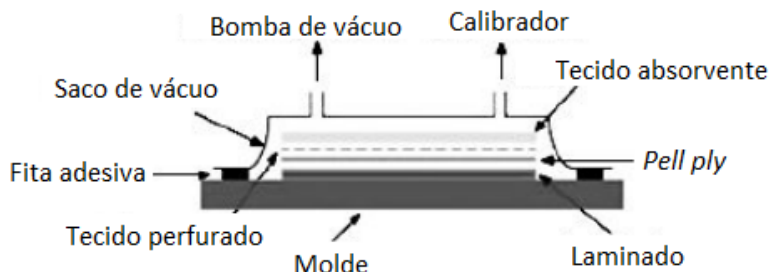


Figura 31 - Moldagem em saco de vácuo [124]

As vantagens neste processo estão associadas à elevada impregnação das fibras, baixa quantidade de espaços vazios, elevada fração de volume de fibra possível de alcançar, o que contribui para a melhoria das propriedades mecânicas. As principais desvantagens estão ligadas à reduzida taxa de produção, custos adicionais de equipamento e ferramentas, e mão-de-obra adicional. Existe também uma elevada quantidade de desperdício de material, visto que é necessário colocar um saco de vácuo novo e outros consumíveis para cada peça a ser fabricada [124, 125].

### 3.3 Descrição do processo de fabrico

Neste capítulo é detalhado o processo de fabrico de um *kayak* na empresa “A”, alvo de estudo do presente trabalho. No entanto, o mesmo princípio de construção pode ser aplicado no fabrico de outros modelos.

Considera-se o seguinte procedimento para o fabrico de uma embarcação:

#### 1. Preparação do molde

Previamente ao início do fabrico de um barco é garantido que tanto o molde do *deck* como o molde do casco se encontram limpos e sem vestígios de resina. Esta etapa garante que os moldes tenham uma superfície limpa e lisa previamente à aplicação do *gelcoat*, promovendo um melhor acabamento. Após esta verificação estar concluída pode-se iniciar a segunda etapa.

#### 2. Aplicação de *gelcoat* no molde

O operador começa por colocar umas duas camadas de cera desmoldante no molde, para facilitar a desmoldagem do produto curado. Seguidamente é colocado um *spray gelcoat* (resina pigmentada que dá ao barco a sua cor e brilho exterior) nos moldes polidos. O *gelcoat*, além do propósito cosmético, é essencial para proteger o barco da

abrasão e raios UV. Com vista a obter um melhor acabamento, o *gelcoat* deve curar até formar um revestimento duro antes de se iniciar a terceira etapa.

### 3. Moldação manual e em saco de vácuo

Após a cura do *gelcoat* inicia-se o processo de moldação manual, é preparada a resina que é aplicada diretamente no molde e entre as camadas a ser colocadas, com auxílio de um pincel. Ao molde do casco são aplicadas quatro camadas de materiais compósitos e uma camada de núcleo. Contudo, no molde do *deck* são aplicadas apenas 3 camadas (pele/núcleo/pele). A laminação manual pode reter bolhas microscópicas de ar entre as camadas de tecido. Após este processo, os moldes e as estruturas *sandwich* são selados com um saco de vácuo, e o ar entre o material plástico e o molde é evacuado através de uma bomba de vácuo.

### 4. Cura

Os moldes são colocados numa sala que é aquecida por um aquecedor industrial a gás, e são mantidos na sala no mínimo durante 12 horas a uma temperatura aproximada de 50°C. Após a cura, é obtido a estrutura que é apresentada na Figura 32 e vista com maior detalhe na Figura 33.



Figura 32 - Pós-cura das estruturas *sandwich* nos moldes, esquerda-*deck* e direita-casco (K1)



Figura 33 - Vista em detalhe da estrutura *sandwich* fabricada (K1)

#### 5. Colagem de acessórios e outros componentes

Previamente á união dos moldes, são colocados todos os elementos que não são possíveis colar quando as duas metades estiverem unidas (*casco* + *deck*). Nesta etapa, são coladas as calhas de suporte do finca-pés e pesos, e o ponto de fixação do leme (Figura 34).

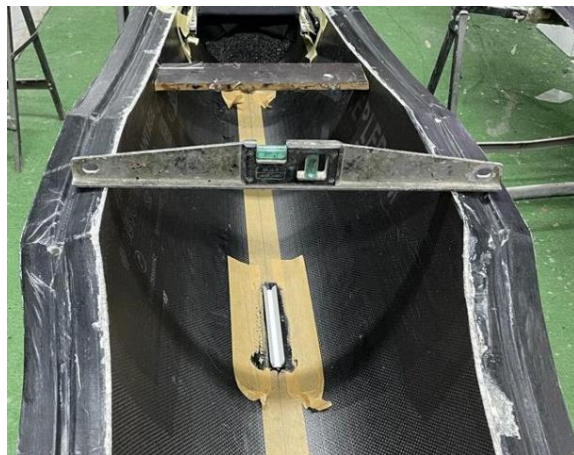


Figura 34 - Colagem de calhas para pesos e para o finca-pés num K1

#### 6. Aplicação do adesivo e colagem do casco ao *deck*

O adesivo é fornecido em cartuchos, sendo a mistura realizada por um bico e aplicado por meio de uma pistola de aplicação. Na Figura 35 pode-se ver a aplicação do adesivo ao longo de toda a junta do casco.



Figura 35 - Colocação de adesivo na junta

Após o adesivo estar colocado no casco, o molde do *deck* é colocado em cima do molde do casco, assegurando que todos os furos dos moldes estão concêntricos. De seguida, utiliza-se um conjunto parafuso-porca para garantir que é colocada pressão durante toda a junta enquanto se dá o processo de cura do adesivo. É indicado pelo fabricante que o barco permaneça dentro do molde por cerca de 24 horas caso a cura se dê à temperatura ambiente. No entanto, o processo pode ser acelerado com o auxílio de calor. Na Figura 36 é possível visualizar o aspeto final do molde fechado de um K1.



Figura 36 - Fecho dos moldes por aperto (K1)

## 7. Desmoldar o barco e acabamento final

Após o tempo de cura do adesivo estar concluído, o molde é aberto e o barco é retirado do molde. Na Figura 37 é possível visualizar a ligação adesiva fabricada, que se trata de uma junta topo a topo. Pode-se observar que foi realizada uma boa colagem através da figura, pois o excesso de adesivo foi expelido em toda a junta.

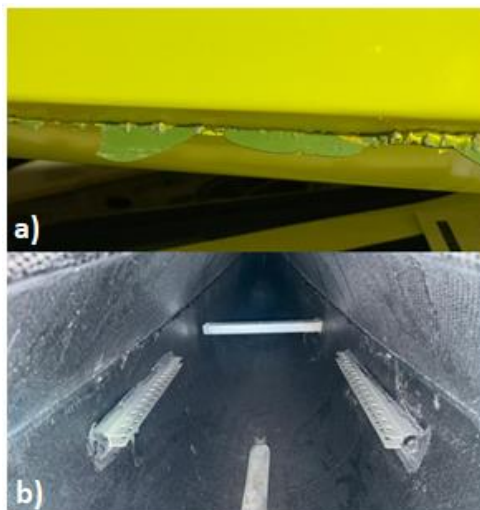


Figura 37 – Aspecto da junta adesiva fabricada após o barco ser retirado do molde: (a) vista exterior, (b) vista interior

Após o barco ser retirado do molde, este segue para a zona de acabamentos finais. O excesso de adesivo exterior é aparado e lixado, obtendo-se uma superfície uniforme (Figura 38).



Figura 38 – Aspecto da junta adesiva fabricada após excesso de resina ser aparado e lixado

Outros acessórios necessários são finalmente colocados (banco, finca-pés, quebra-mar, leme e cabos de leme) e também podem ser realizados retoques de pintura. Por fim, o barco é polido, são colocados os autocolantes referentes à marca e o barco é embalado para ser entregue ao cliente.

### 3.4 Trabalho experimental

Neste capítulo são descritos os detalhes experimentais, designadamente o adesivo utilizado, os métodos de produção de provetes, bem como os ensaios e respetivo procedimento para a obtenção das propriedades mecânicas à tração. As propriedades do adesivo ao corte, bem como as propriedades de fratura, são obtidas de trabalhos da literatura, conforme o apresentado

#### 3.4.1 Adesivo utilizado

O adesivo utilizado para produzir a colagem entre o *deck* e o casco foi o adesivo X.

#### 3.4.2 Ensaios mecânicos de tração

Neste capítulo são descritos todos os passos efetuados para a realização de ensaios de tração em provetes maciços de adesivo a fim de determinar as propriedades à tração do adesivo selecionado. São explicadas todas as etapas para a preparação dos provetes, tais como as dimensões e geometrias utilizadas, a preparação do molde, aplicação do adesivo, cura e remoção dos provetes do molde.

##### 3.4.2.1 Fabrico dos provetes

Os provetes maciços para a determinação das propriedades mecânicas à tração foram produzidos seguindo a norma francesa NF T 76-142, sendo as dimensões dos provetes demonstradas na Figura 39.

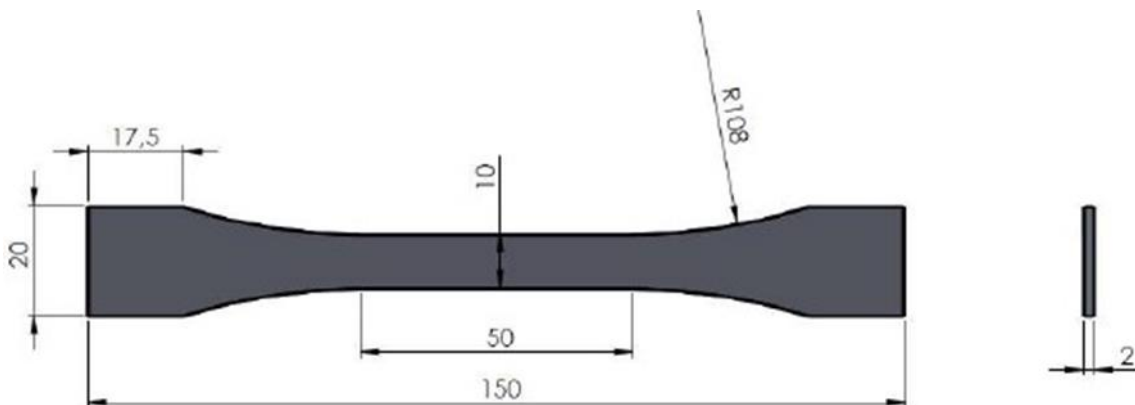


Figura 39 - Dimensões dos provetes maciços pela norma NF T 76-142 (dimensões em mm)

Para o fabrico dos provetes, recorreu-se ao molde existente no Departamento de Engenharia Mecânica da Instituto Superior de Engenharia do Porto. Trata-se de um molde desenvolvido por Pinto [126], composto por três placas: as placas superior e inferior, que garantem o fecho do molde, e uma placa intermédia (Figura 40), formada por seis cavidades que garantem a forma dos provetes.



Figura 40 - Placa intermédia do molde (seis cavidades)

#### 3.4.2.1.1 Preparação do molde

A preparação das superfícies do molde é das etapas mais importantes previamente à aplicação de adesivo no molde. Esta etapa permite a obtenção de provetes com melhores características e acabamentos, e evita também que o molde seja contaminado aquando da cura do adesivo.

Primeiramente, começou-se por limpar todas as superfícies do molde que estarão em contacto com o adesivo, com auxílio de um papel embebido com acetona. Este processo permite remover vestígios de gordura e sujidade que possam existir na superfície do molde, o que facilita a fixação do desmoldante. Seguidamente, o molde foi colocado num forno previamente aquecido a 80°C durante 15 min. Este aquecimento garante a correta adesão do desmoldante às superfícies do molde. Após o tempo estabelecido, o molde é retirado do forno e, pouco tempo depois, ainda com a placas quentes, inicia-se a aplicação de desmoldante em todas as superfícies que estarão em contacto com o adesivo. O desmoldante utilizado foi o Loctite Frekote® 770-NC [127].



Figura 41 - Aplicação de desmoldante no molde

### 3.4.2.1.2 Aplicação e cura do adesivo

Como se trata de um adesivo fornecido em cartuchos bi-componente, a aplicação deste tem de ser realizada por moldação em molde aberto. A placa intermédia é colocada sobre a placa inferior do molde e fixa através da utilização de quatro parafusos, de forma a garantir que o molde intermédio não se movia aquando da aplicação do adesivo. O adesivo X é aplicado no molde por intermédio de uma pistola adequada, sendo que a mistura dos componentes foi conseguida por um bico de mistura. Como é importante garantir que o adesivo preenche toda a cavidade do molde, procedeu-se à sua compactação manual com uma espátula (Figura 42).



Figura 42 - Aplicação do adesivo por moldação em molde aberto

Finalizando-se esta etapa, colocou-se a placa superior e procedeu-se ao aperto do molde de forma que as bolhas de ar retidas no interior do adesivo fossem expelidas pelos orifícios de respiro presentes na placa superior. O adesivo é deixado a curar no interior do molde durante uma semana à temperatura ambiente. Após concluído o processo de cura, os provetes foram retirados do molde, os gitos de injeção foram eliminados e quaisquer rebarbas lixadas. A Figura 43 ilustra os provetes maciços obtidos.



Figura 43 - Aspeto final dos provetes maciços

#### 3.4.2.2 Ensaio de tração

Os ensaios de tração de provetes maciços foram realizados na máquina de ensaios Shimadzu Autograph AG-X 100 do Laboratório de Ensaio Mecânico do ISEP, com uma célula de carga de 100 kN. Para o controlo de ensaios e registo dos dados foi utilizado um computador com o *software* TRAPEZIUM X instalado (Figura 44).



Figura 44 - Máquina de ensaios universal Shimadzu Autograph AG-X 100 e computador com *software* TRAPEZIUM X

A fim de se fixar os provetes à máquina de ensaios foram utilizadas amarras de cunha, que foram apertadas de forma a garantir a ausência de escorregamentos entre estas e as superfícies de aperto dos provetes. Para a medição das deformações longitudinais em cada provete, recorreu-se a um extensómetro mecânico. Os provetes foram testados à temperatura ambiente e com uma velocidade de ensaio de 3 mm/min.

### 3.4.2.3 Análise de resultados

As propriedades mecânicas à tração do adesivo são obtidas pela análise dos resultados obtidos no ensaio de tração como é descrito na Tabela 15.

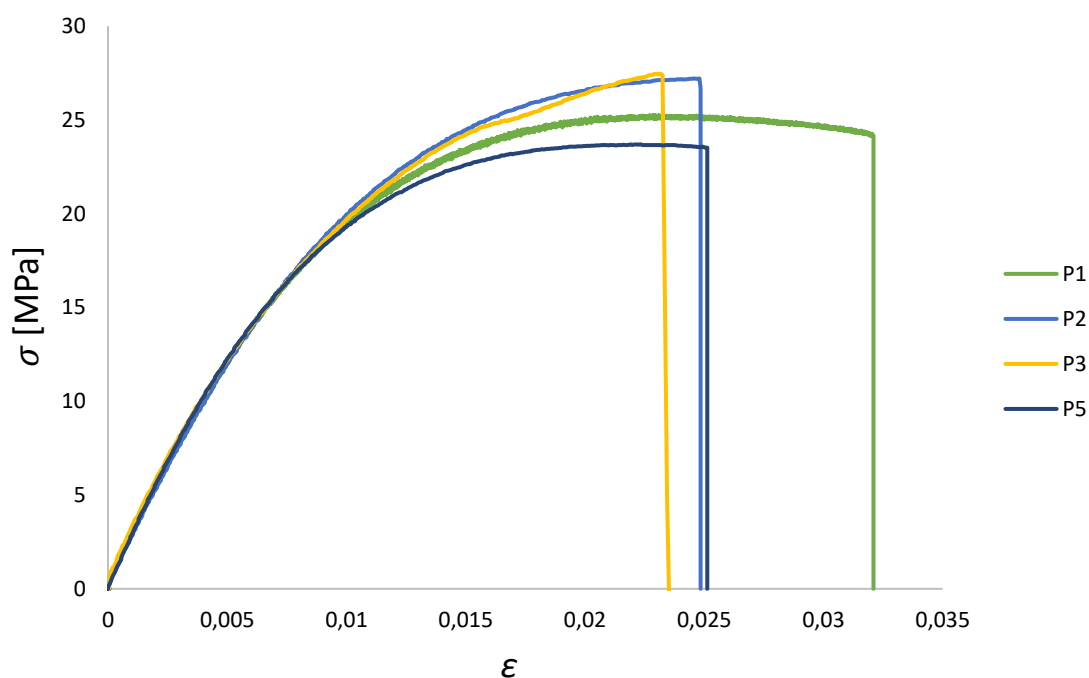
Tabela 15 - Obtenção das propriedades mecânicas à tração

Propriedades mecânicas	Descrição
Módulo de Young, $E$	O valor obtido é medido como a inclinação média da curva $\sigma$ - $\varepsilon$ entre deformações elásticas de 0,05% e 0,25%.
Tensão de limite elástico, $\sigma_y$	O valor obtido é calculado pela interseção da reta com declive paralelo à curva $\sigma$ - $\varepsilon$ , para uma deformação de 0,2%.
Tensão de rotura, $\sigma_f$	O valor obtido é calculado pela relação entre a carga máxima e a secção transversal inicial da amostra.
Deformação de rotura à tração, $\varepsilon_f$	O valor é obtido pela deformação máxima registada durante o ensaio.

#### 3.4.2.3.1 Curva $\sigma$ - $\varepsilon$

Após a realização dos ensaios de tração, procedeu-se à análise e tratamento dos respetivos dados, reproduzindo os mesmos em curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  dos provetes maciços (Figura 45).

Apenas foram considerados quatro provetes na análise de resultados, visto que os outros dois em falta tinham resultados bastante dispare dos restantes provetes, não tendo sido considerados no tratamento de dados. Da análise das curvas obtidas, o provete 1 registou o maior valor de  $\varepsilon_f$ , ou seja, uma maior ductilidade. Já o provete 2 e o provete 3 registaram os valores mais elevados de  $\sigma_f$ .

Figura 45 - Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  dos provetes maciços de adesivo

### 3.4.2.3.2 Propriedades mecânicas à tração

Os dados obtidos para o adesivo X através dos ensaios realizados e as respectivas propriedades mecânicas à tração determinadas estão representados na Tabela 16.

Tabela 16 - Propriedades mecânicas à tração do adesivo X

Provete	Força máxima [N]	Desloc. máximo [mm]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	Tensão máxima [MPa]	Deform. máxima	Tensão a 0,05%	Tensão a 0,25%	Módulo de Young [MPa]
<b>P1</b>	505,15	1,605	18,55	25,26	0,032	1,53	6,75	2613,33
<b>P2</b>	544,19	1,243	19,92	27,21	0,025	1,58	6,57	2490,56
<b>P3</b>	549,14	1,178	18,87	27,46	0,024	1,99	7,05	2532,50
<b>P5</b>	473,93	1,257	18,00	23,70	0,025	1,37	6,75	2691,15
<b>Média</b>	522,42	1,320	18,84	25,91	0,026	1,65	6,79	2571,40
<b>Desvio Padrão</b>	42,07	0,042	0,81	1,77	0,004	0,26	0,25	105,80
<b>CoV [%]</b>	8,1	3,2	4,3	6,8	14,6	15,9	3,6	4,1

Para a aferição dos resultados obtidos foi utilizado o coeficiente de variação (CoV), que consiste em a razão entre o desvio padrão e a média, ou seja, mede a dispersão relativa dos resultados. Após a realização do tratamento de dados constata-se que no geral os resultados obtidos entre os diferentes provetes apresentam boa reprodutibilidade, como é possível observar pelos valores do CoV, tipicamente inferiores a 10%. Como exceção surgem os valores de CoV obtidos para a “deformação máxima” e para a “tensão a 0,05%”. O primeiro valor, apesar de estar acima do esperado, é aceitável por se tratar de deformações obtidas, já que estão tipicamente associadas a maior variabilidade do que propriedades como a “tensão máxima” ou “módulo de Young”, devido a corresponderem à fase de rotura do material, mais influenciado por defeitos [128]. Já o segundo valor obtido, trata-se de um meio para atingir um fim, ou seja, os valores obtidos são utilizados para calcular o módulo de Young, sendo que este obteve um CoV de 4,1%, pelo que se considera aceitável.

### 3.4.3 Comparação com ficha técnica e discussão

A Tabela 17 compara as propriedades mecânicas obtidas à tração para o adesivo X com as fornecidas pela ficha técnica do mesmo.

Tabela 17 – Resumo das propriedades mecânicas experimentalmente obtidas

Propriedades	Ensaio de tração
Módulo de Young, $E$ [MPa]	$2571,40 \pm 105,8$
Tensão de rotura, $\sigma_f$ [MPa]	$25,90 \pm 1,77$
Deformação de rotura à tração, $\varepsilon_f$ [%]	$2,6 \pm 0,4$
Tensão de limite elástico, $\sigma_y$ [MPa]	$18,84 \pm 0,81$

Pela a observação da Tabela 17, verifica-se que o valor obtido para o módulo de Young foi muito próximo, tendo sido alcançado um valor médio de  $2571,40 \pm 105,8$  MPa. Para a  $\sigma_f$  foi obtido um valor médio de  $25,90 \pm 1,77$  MPa. Relativamente à deformação de rotura, o valor médio obtido foi de  $2,6 \pm 0,4\%$ . Experimentalmente também se estimou a  $\sigma_y$ , e nos ensaios de tração obteve-se um valor médio  $18,84 \pm 0,81$  MPa. No entanto, não foi possível comparar o valor obtido com o do fabricante, devido à ausência do mesmo na ficha técnica.

Na Tabela 18 são comparada as propriedades obtidas experimentalmente com resultados obtidos por outros dois artigos de pesquisa que caracterizam o mesmo adesivo [129, 130]. Verifica-se que o valor obtido para o módulo de Young é muito próximo entre o obtido pelo ensaio de tração e os resultados obtidos pelos autores, existindo uma discrepância inferior a 5% entre eles. O método de determinação de  $E$  pode estar associado à diferença de valores obtidos, embora nos artigos referidos não esteja descrito este processamento.

Tabela 18 - Comparação entre as propriedades mecânicas obtidas experimentalmente e as de dois artigos

Propriedades	Ensaio de tração	Resultados obtidos por Ezzine et al. [129]	Resultados obtidos por Bezzerrouki et al. [130]
Módulo de Young, $E$ [MPa]	2571,40 ± 105,8	2660 ± 378,01	2690
Tensão de rotura, $\sigma_f$ [MPa]	25,90 ± 1,77	22,72 ± 2,78	-
Deformação de rotura à tração, $\varepsilon_f$ [%]	2,6 ± 0,4	-	-
Tensão de limite elástico, $\sigma_y$ [MPa]	18,84 ± 0,81	7,02 ± 0,21	-

Para a tensão de rotura pode-se verificar que o valor obtido experimentalmente está mais próximo do tabelado na ficha técnica do adesivo, do que o valor obtido por Ezzine et al. [129], este último muito inferior ao que está presente na ficha técnica do adesivo. Por outro lado, nenhum autor determinou a deformação de rotura à tração.

Por último, é visível uma discrepância enorme entre os valores obtidos para a tensão de limite elástico. A diferença entre os resultados pode estar implícita principalmente com o método utilizado para a determinação do resultado.

#### 3.4.4 Propriedades mecânicas ao corte e à fratura

A determinação das propriedades mecânicas do adesivo ao corte e à fratura é muito importante para a previsão do comportamento de uma junta adesiva, tendo alta importância na caracterização da resistência da mesma. No entanto, não foram realizados quaisquer ensaios para obter este tipo de propriedades, devido a morosidade dos mesmos, e existência de resultados credíveis na literatura científica para as propriedades necessárias para as simulações numéricas.

Analisando a Tabela 19, verifica-se que o valor considerado para a  $\tau_f$  do adesivo foi retirado da ficha técnica do adesivo X, já os valores de  $\nu$  e  $G$  foram obtidos a partir de dois artigos de pesquisa [130]. O resultado obtido por Ezzine et al. [130] para o coeficiente de Poisson foi conseguido através da realização de ensaios de tração em provetes maciços de adesivo com recurso a um extensómetro, enquanto as propriedades obtidas por Bezzerouki et al. [130] foram estimadas segundo a norma ASTM D1002 para substratos metálicos.

Tabela 19 - Propriedades mecânicas ao corte do adesivo X

Propriedades	Adesivo X	Resultados obtidos por Ezzine et al. [130]	Resultados obtidos por Bezzerouki et al. [130]
Tensão de rotura ao corte, $\tau_f$ [MPa]	20	-	-
Coefficiente de Poisson, $\nu$	-	0,35	0,30
Módulo de elasticidade transversal, $G$ [MPa]	-	-	990

A discrepância entre os valores obtidos pelos autores para o coeficiente de Poisson pode estar relacionado com o tipo de método utilizado para a determinação do mesmo ou com as condições em que foram realizados os ensaios.

Para a caracterização das propriedades de fratura do adesivo não existem dados fornecidos pelo fabricante que permitam realizar uma comparação fidedigna. Assim, os valores obtidos provêm do trabalho de Ezzine et al. [130]. Na Tabela 20 estão representados os valores de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  para o adesivo X, representativos de um adesivo com ductilidade moderada, especialmente ao corte.

Tabela 20 - Propriedades mecânicas à fratura do adesivo X

Propriedades	Resultados obtidos por Ezzine et al. [130]
Tenacidade à tração, $G_{IC}$ [N/mm]	0,5
Tenacidade ao corte, $G_{IIC}$ [N/mm]	2,41

### 3.5 Trabalho numérico

Neste capítulo é descrito o trabalho numérico realizado para apurar a capacidade e estudar a ligação, bem como propor geometrias alternativas mais eficientes dos modelos de dano coesivo (MDC) para modelar o comportamento de estruturas *sandwich* de embarcações de canoagem quando solicitados a diferentes esforços. Foi selecionado o *software* ABAQUS®, versão 2017 (*Dassault Systèmes*) para o desenvolvimento da análise numérica.

#### 3.5.1 Modelo de dano coesivo triangular

Como é possível observar no capítulo 2.3.3 (página 32), o princípio fundamental dos MDC baseia-se na introdução artificial de zonas de propagação de dano no modelo, o que permite simular o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. A técnica permite avaliar o comportamento elástico do material até à rotura dos diferentes materiais envolvidos. Entre os diferentes modelos, o mais popular devido à sua simplicidade é o modelo triangular, já que permite obter resultados precisos para a maioria de condições reais e ainda pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados.

No *software* ABAQUS® encontra-se implementado o modelo triangular 2D (Figura 20). É possível observar que as leis de maior dimensão representam as leis de modo puro e a lei de menor dimensão representam a lei de modo misto. O modo puro é qualificado pela propagação do dano que ocorre num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões são anulados pela respetiva lei coesiva. Em modo misto, são utilizados critérios de tensão e energia para ser possível combinar esforços de tensão e de corte [131]. Os elementos coesivos estão sujeitos a duas componentes, uma componente normal de deformação e uma componente relativa à deformação de corte, ambas determinadas com recurso à análise cinemática do elemento. No caso de camadas finas entre substratos rígidos, as tensões de membrana são desprezadas.

Previamente à ocorrência de dano, a relação entre as tensões e deformações é definida pela matriz  $\mathbf{K}_{COH}$ , para relacionar as tensões ( $\mathbf{t}$ ) e deformações ( $\boldsymbol{\varepsilon}$ ) em tração e corte ao longo dos elementos coesivos ( $n$  e  $s$ , respetivamente). Esta matriz é definida por

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{ns} & K_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{COH} \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (8)$$

A matriz anterior contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cujo valor é função do tipo de formulação utilizada. Por exemplo, caso seja utilizada uma formulação local, normalmente usada para simulação de fraturas de espessura nula, os parâmetros da matriz possuem valores elevados, com o objetivo de não haver deformações na

estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [132]. Para camadas finas de adesivo, existe uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que

$$K_{mm} = E, K_{ss} = G, K_{sn} = 0, \quad (9)$$

em que  $E$  é o módulo de elasticidade longitudinal e  $G$  é o módulo de elasticidade transversal. Tendo estes parâmetros em consideração, é possível obter uma deformação fiel da camada de adesivo [131]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser especificada em diferentes critérios, como por exemplo o critério quadrático de tensões, expresso pela seguinte expressão:

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1. \quad (10)$$

Os parêntesis de Macaulay “ $\langle \rangle$ ” designam que uma tensão de compressão não induz dano. A mais-valia deste critério centra-se na sua precisão, comprovada em trabalhos anteriores [133]. Após ser atingida a resistência máxima em modo misto ( $t_m^0$  na Figura 20) através da equação anterior, a rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento, ou seja, é degradada. A separação completa é prevista através de um critério linear energético, como é representado na seguinte equação

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (11)$$

### 3.5.2 Validação do modelo numérico

À priori de estudar numericamente o tipo de geometria principal da presente dissertação ou quaisquer alternativas geométricas e de adesivos, é necessário validar o modelo numérico usando o *software* ABAQUS®. Neste capítulo é apresentada a validação da utilização do modelo numérico com dados experimentais realizados num trabalho anterior [134]. Primeiramente, são apresentados os materiais e respetivas propriedades, e de seguida é descrita a geometria de junta e respetivas dimensões. Por fim, são realizados os ensaios experimentais e ensaios numéricos, e comparados todos os resultados.

### 3.5.2.1 Materiais utilizados nas juntas adesivas

#### 3.5.2.1.1 Substratos

Todas as juntas usadas neste estudo partilham o mesmo material como substrato, que consiste na liga de alumínio AW6082-T651. Esta liga de alumínio é obtida através de envelhecimento artificial a uma temperatura de 180°C. A sua seleção deveu-se não só às boas propriedades mecânicas, mas também ao amplo campo de aplicações estruturais em forma extrudida e laminada. Esta liga de alumínio foi caracterizada em trabalhos anteriores [115], onde foram definidas as seguintes propriedades:  $\sigma_f$  de 324,00±0,16 MPa,  $E$  de 70,07±0,83 GPa,  $\sigma_y$  de 261,67±7,65 MPa e  $\epsilon_f$  de 21,70%±4,24%.

As curvas tensão-deformação ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) dos substratos de alumínio foram obtidas experimentalmente, de acordo com a norma ASTM E8/E8M [135], e encontram-se representadas na Figura 46. Também está representada a aproximação numérica usada no software ABAQUS®.

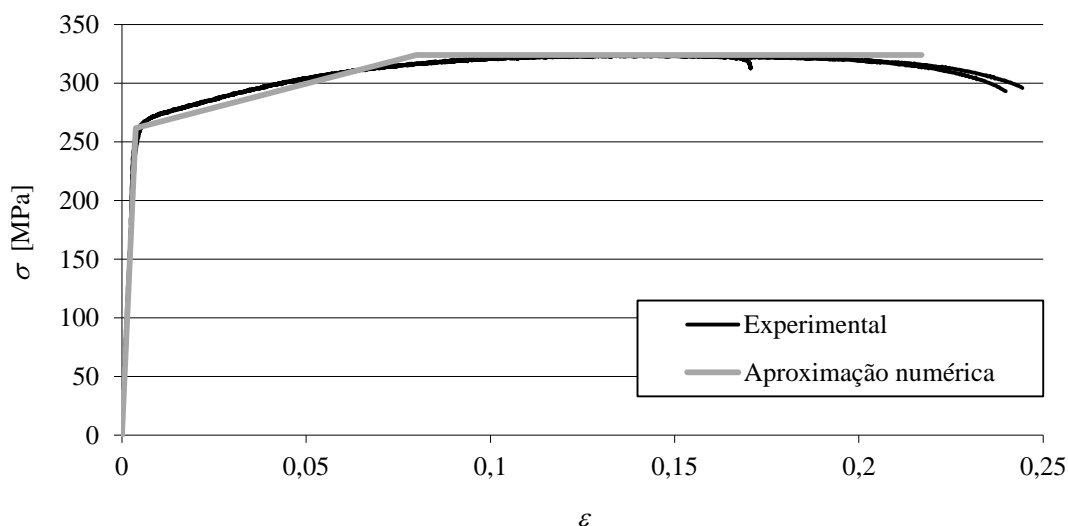


Figura 46 - Curvas tensão-deformação ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) da liga de alumínio Al 6082-T651 [115]

#### 3.5.2.1.2 Adesivos

Os adesivos selecionados para este trabalho, de forma a cobrir uma vasta gama de ductilidades, foram o adesivo epóxico frágil Araldite® AV138, o adesivo epóxico moderadamente dúctil Araldite® 2015 e o adesivo poliuretano dúctil Sikaforce® 7752.

##### Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138/HV988 é um adesivo frágil, conforme se pode observar nas curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  da Figura 47. Trata-se de um adesivo epóxico, que se apresenta sob a forma de dois componentes, a resina Araldite® AV138M-1 e o endurecedor HV988. A mistura da resina/endurecedor faz-se numa razão de 100 g/40 g, respetivamente. Na Tabela 21

apresentam-se as propriedades relevantes do adesivo, que foram retiradas da ficha técnica disponibilizada pelo fabricante.

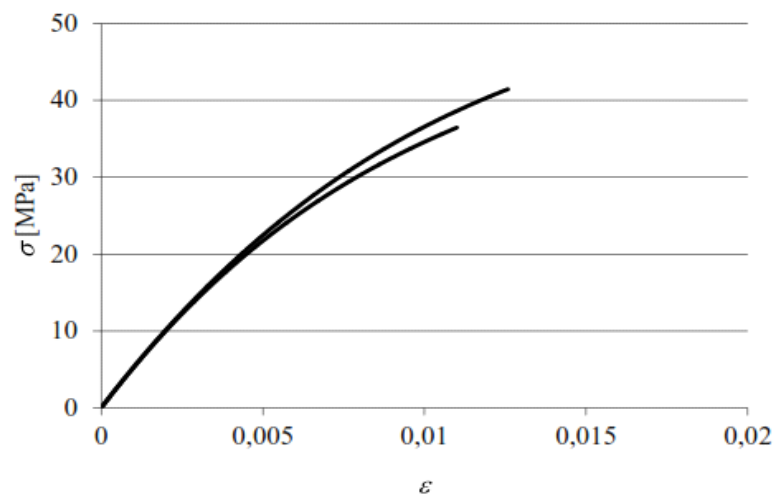


Figura 47 - Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  de provetes maciços de Araldite® AV138 [136]

Tabela 21 - Propriedades do adesivo Araldite® AV138 [136]

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de Young, $E$ [GPa]	4,89±0,81
Coefficiente de Poisson, $\nu$	0,35 <sup>a</sup>
Tensão de cedência à tração, $\sigma_y$ [MPa]	36,49±2,47
Tensão de rotura à tração, $\sigma_f$ [MPa]	39,45±3,18
Deformação de rotura à tração, $\epsilon_f$ [%]	1,21±0,10
Módulo de corte, $G$ [GPa]	1,56±0,01
Tensão de cedência ao corte, $\tau_y$ [MPa]	25,1±0,33
Tensão de rotura ao corte, $\tau_f$ [MPa]	30,2±0,40
Deformação de rotura ao corte, $\gamma_f$ [%]	7,8±0,7
Tenacidade à tração, $G_{Ic}$ [N/mm]	0,2 <sup>b</sup>
Tenacidade ao corte, $G_{IIc}$ [N/mm]	0,38 <sup>b</sup>

<sup>a</sup> valor do fabricante  
<sup>b</sup> valores referenciados na referência [137]

### Araldite® 2015

O adesivo Araldite® 2015 é caracterizado como um adesivo epóxico estrutural de dois componentes, com ductilidade moderada, e com bom comportamento quando sujeito à tração ou ao corte. Como se trata de um adesivo dúctil, em junta adesiva permite alguma redistribuição das concentrações de tensões nas extremidades da camada de adesivo, o que se traduz numa resistência da junta muito aceitável. A mistura da resina/endurecedor faz-se numa razão de 1:1 em peso. Na Figura 48 apresenta-se um exemplo das curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  de provetes maciços para este adesivo, que foram obtidas na referência [68]. Também é possível observar as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo na Tabela 22.

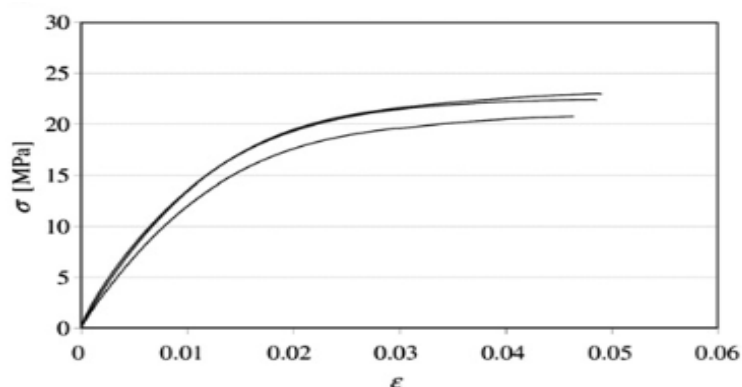


Figura 48 - Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  de provetes maciços de Araldite® 2015 [68]

Tabela 22 - Propriedades do adesivo Araldite® 2015 [68, 138]

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de Young, $E$ [GPa]	1,85±0,81
Coefficiente de Poisson, $\nu$	0,33 <sup>a</sup>
Tensão de cedência à tração, $\sigma_y$ [MPa]	12,3±0,61
Tensão de rotura à tração, $\sigma_f$ [MPa]	21,63±1,61
Deformação de rotura à tração, $\epsilon_f$ [%]	4,77±0,15
Módulo de corte, $G$ [GPa]	0,56±0,21
Tensão de cedência ao corte, $\tau_y$ [MPa]	14,6±1,3
Tensão de rotura ao corte, $\tau_f$ [MPa]	17,9±1,8
Deformação de rotura ao corte, $\gamma_f$ [%]	43,9±3,4
Tenacidade à tração, $G_{Ic}$ [N/mm]	0,43±0,02
Tenacidade ao corte, $G_{IIc}$ [N/mm]	4,7±0,34

<sup>a</sup> valor do fabricante

Comparando os valores deste adesivo com o Araldite® AV138, verifica-se que a deformação de rotura ao corte é quase seis vezes superior. No entanto, a tensão de rotura ao corte e à tração é superior no Araldite® AV138, quase o dobro do Araldite® 2015.

### Sikaforce® 7752

O adesivo Sikaforce® 7752 é um adesivo dúctil à base de poliuretano, constituído por dois componentes, resina e endurecedor. A mistura da resina/endurecedor faz-se numa razão de 100 g/20 g, respetivamente. Na Figura 49 é possível observar um exemplo de curva  $\sigma$ - $\epsilon$  para este adesivo. Na Tabela 23 apresentam-se as propriedades mecânicas e de fratura mais relevantes do adesivo [139].

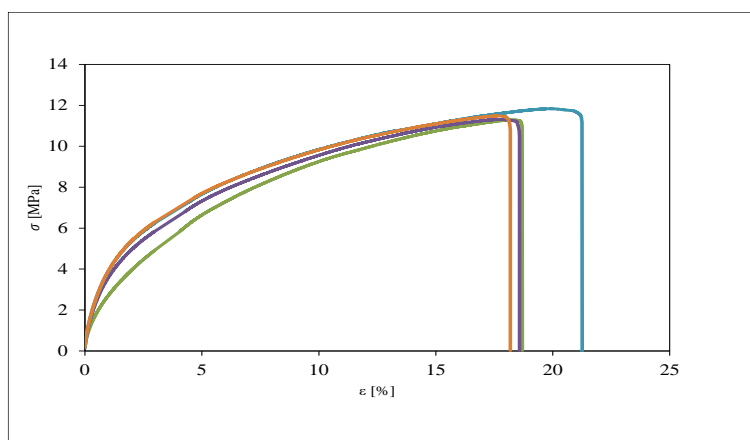


Figura 49 - Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  de provetes maciços de Sikaforce® 7752 [134]

Tabela 23 - Propriedades do adesivo Sikaforce® 7752 [139]

Propriedades	Sikaforce® 7752
Módulo de Young, $E$ [GPa]	0,493±0,0896
Coeficiente de Poisson, $\nu$	0,33 <sup>a</sup>
Tensão de cedência à tração, $\sigma_y$ [MPa]	3,24±0,5
Tensão de rotura à tração, $\sigma_f$ [MPa]	11,49±0,3
Deformação de rotura à tração, $\epsilon_f$ [%]	19,18±1,4
Módulo de corte, $G$ [GPa]	0,187±0,0164
Tensão de cedência ao corte, $\tau_y$ [MPa]	5,16±1,1
Tensão de rotura ao corte, $\tau_f$ [MPa]	10,17±0,6
Deformação de rotura ao corte, $\gamma_f$ [%]	58,42±6,4
Tenacidade à tração, $G_{Ic}$ [N/mm]	2,36±0,2
Tenacidade ao corte, $G_{IIc}$ [N/mm]	5,41±0,5

<sup>a</sup> valor do fabricante

Em função das propriedades obtidas, é expectável que a resistência de juntas adesivas coladas com este adesivo seja elevada, pois este combina uma resistência favorável com uma elevada ductilidade dos poliuretanos, o que permite tensões elevadas na camada de adesivo, bem como um efeito acentuado de plastificação sem rotura das extremidades do adesivo com o carregamento progressivo das juntas, o que conduz a uma elevada resistência.

### 3.5.2.2 Geometria da junta de sobreposição simples

Neste subcapítulo, é apresentado o tipo de geometria da juntas utilizada para verificar a credibilidade do método numérico para avaliar a resistência de uma junta adesiva. Na Figura 50 é exemplificado uma junta de sobreposição simples (JSS), bem como o carregamento de tração (condições fronteira). As respetivas dimensões consideradas para este tipo de junta são expostas na Tabela 24.

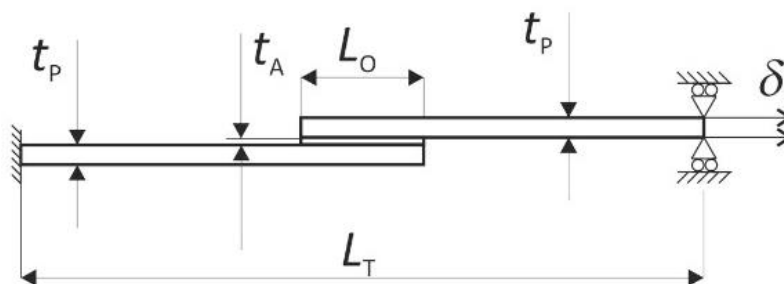


Figura 50 - Geometria da configuração de JSS e condições fronteira [134]

Tabela 24 - Dimensões para a JSS (adaptado de [134])

Designação	Dimensão
Comprimento do provete, $L_t$ [mm]	170
Comprimento de sobreposição, $L_0$ [mm]	12,5/ 25/ 37,5/ 50
Espessura do substrato, $t_p$ [mm]	3
Espessura da camada adesiva, $t_A$ [mm]	0,2

### 3.5.2.3 Ensaio experimental das JSS e resultados obtidos

Para a realização dos ensaios experimentais, foi usada uma máquina de ensaios Shimadzu® modelo AG-X 100 (Figura 44), equipada com uma célula de carga de 100 kN. A distância entre maxilas foi de 170 mm, os ensaios de tração foram realizados a uma

velocidade de 1 mm/min, à temperatura ambiente. Todos os provetes foram tracionados até à rotura.

### 3.5.2.3.1 Curvas $P-\delta$

Após a realização dos ensaios experimentais foi realizada a análise e tratamento dos respetivos dados, dos quais foram obtidas curvas  $P-\delta$  para os vários adesivos e valores de  $L_0$  utilizados. Na Figura 51, Figura 52 e Figura 53, estão representadas as curvas  $P-\delta$  para diferentes  $L_0$  e para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente.

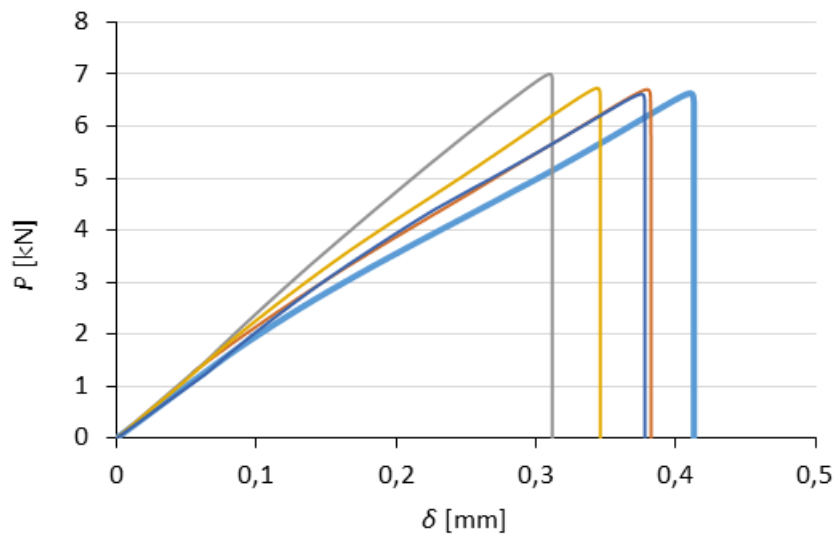


Figura 51 - Curvas  $P-\delta$ , dos provetes, obtidas experimentalmente para as JSS com Araldite® AV138 e  $L_0=25$  mm [134]

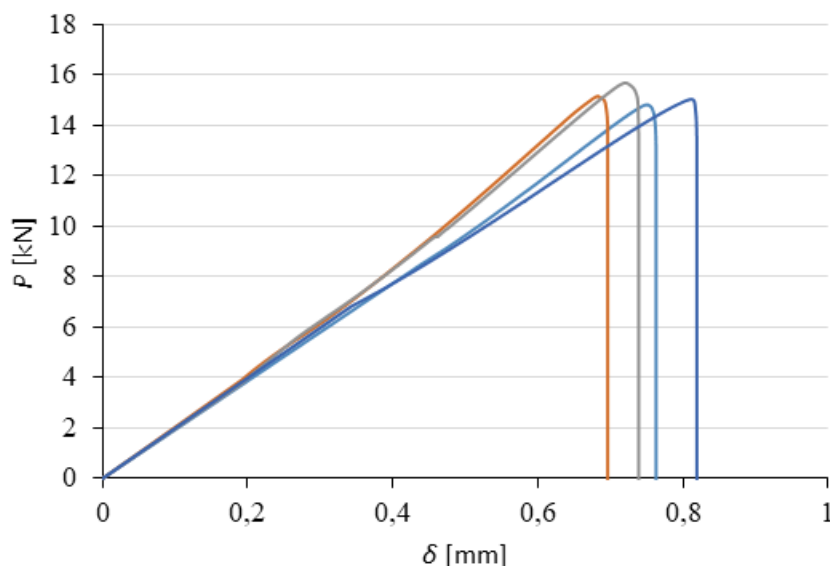


Figura 52 - Curva  $P-\delta$ , dos provetes, obtidas experimentalmente para as JSS com Araldite® 2015 e  $L_0=50$  mm [134]

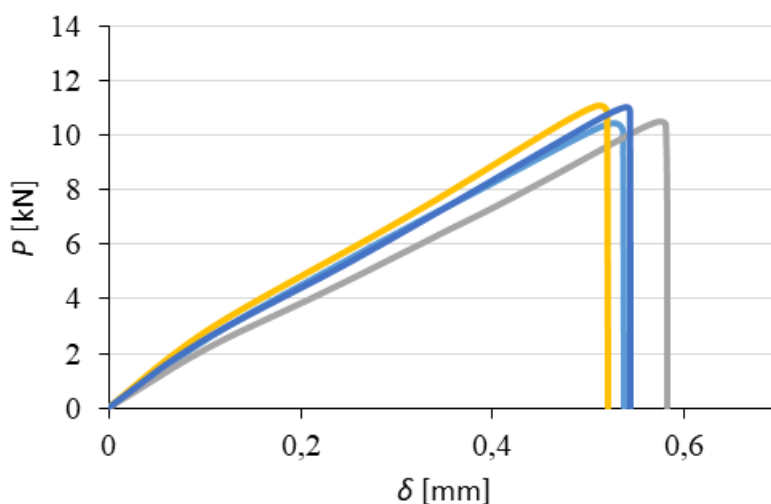


Figura 53 - Curvas  $P$ - $\delta$ , dos provetes, obtidas experimentalmente para as JSS com Sikaforce® 7752 e  $L_0=37,5$  mm [134]

É possível verificar o comportamento linear da junta até à rotura para os três adesivos selecionados. O deslocamento para a junta do Araldite® AV138 é menor, pelo facto de este adesivo ser um adesivo frágil. No caso do adesivo Araldite® 2015, dada a sua maior ductilidade é possível atingir valores mais elevados de  $P$  e de  $\delta$ .

### 3.5.2.3.2 Resistência das juntas

Na Tabela 25 apresentam-se os valores médios de  $P_{m\acute{a}x}$ , juntamente com os respetivos desvios padrão, referentes às JSS para os três adesivos testados. Na Figura 54 é apresentada uma representação gráfica dos valores da tabela anterior.

Tabela 25 - Valores médios de  $P_{m\acute{a}x}$  [N] para as JSS e para os diferentes adesivos (adaptado de [134])

Adesivo	$L_0$ [mm]	12,5	25	37,5	50
Araldite® AV138	Média	5421,66	6738,18	8016,33	9342,21
	Desvio Padrão	439,37	155,43	206,34	278,45
Araldite® 2015	Média	5287,83	9480,68	12235,22	15182,21
	Desvio Padrão	237,21	386,59	343,87	370,38
Sikaforce® 7752	Média	3625,55	7175,51	10774,10	14383,65
	Desvio Padrão	206,80	445,45	334,10	553,55

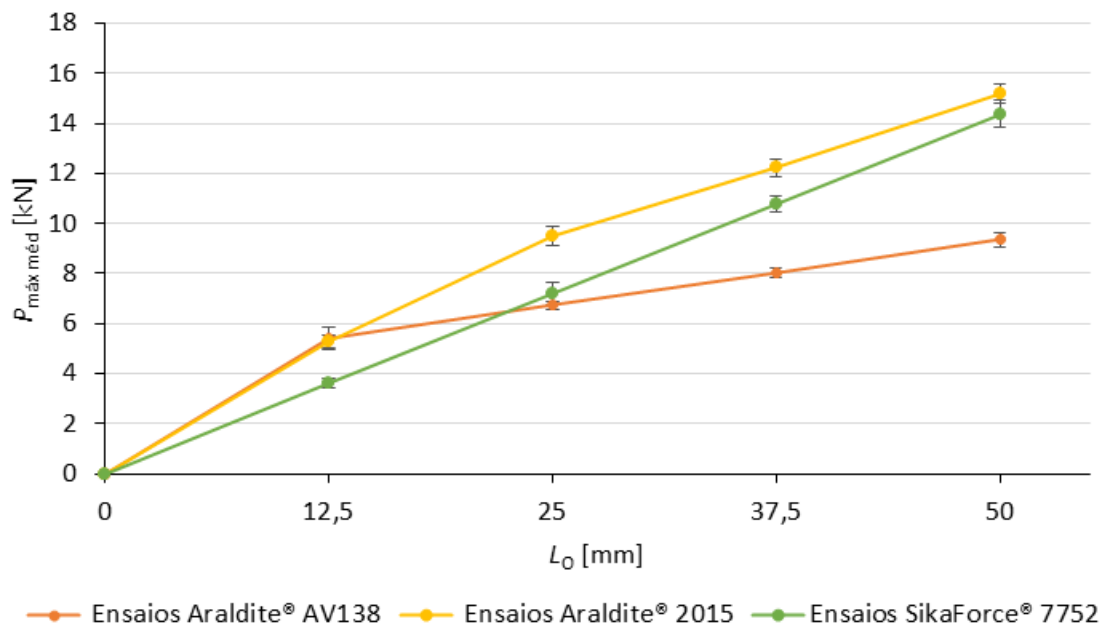


Figura 54 - Valores de  $P_{\text{máx méd}}$  e desvio padrão em função de  $L_0$  para os diferentes adesivos nas JSS [134]

Através da análise da figura anterior é possível verificar que, para todos os adesivos, existe um aumento da resistência com o aumento do  $L_0$ , ou seja, com o aumento da área de adesivo entre os dois aderentes. Verifica-se que para o Araldite® AV138, este aumento é o menos acentuado, devido à fragilidade deste adesivo. Já para o Araldite® 2015 e para o Sikaforce® 7752, o aumento é quase linear com  $L_0$ .

### 3.5.2.4 Análise numérica no ABAQUS®

#### 3.5.2.4.1 Condições da análise numérica

A análise numérica foi executada no *software* ABAQUS®. Tendo como base o MEF, na escolha deste *software*, foi também considerado o facto de este ter integrado um módulo de MDC, usado para prever a resistência das juntas adesivas seleccionadas. Neste *software*, os aderentes foram modelados como sendo sólidos elasto-plásticos e os adesivos com elementos coesivos (ver Figura 55). As juntas foram modeladas em 2D com elementos sólidos de estado plano de deformação para modelação dos aderentes. No caso dos elementos coesivos da camada adesiva, foi apenas considerado um elemento da espessura do adesivo, que segue uma lei de tração-separação triangular.

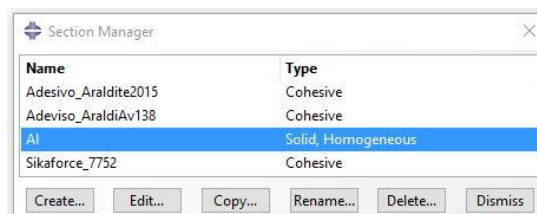


Figura 55 – Atribuição das características dos materiais no ABAQUS® [134]

A análise de rotura por MDC foi efetuada considerando não linearidades geométricas. Para os modelos de análise de tensões, as malhas são bem refinadas, de forma a se conseguir obter resultados mais precisos, principalmente na zona de sobreposição e proximidades da mesma. Assim sendo, foi aplicado o efeito *bias* duplo da zona central da junta para as extremidades, para garantir mais refinamento nas extremidades (Figura 56).



Figura 56 - Efeito *bias* na região de sobreposição da JSS [134]

No que diz respeito à região da junta que não está em contacto com o adesivo, foi utilizado um efeito *bias* simples, de forma que a malha fosse mais refinada das extremidades da junta para a zona de sobreposição (Figura 57).



Figura 57 – Efeito *bias* da malha na região não ligada dos aderentes para JSS [134]

Esta variação do número de elementos e do efeito *bias* na malha tem como principal objetivo diminuir a capacidade de processamento necessária para as simulações, e, consequentemente, o tempo destas, isto sem comprometer a precisão dos resultados obtidos.

Para se conseguir simular de forma realista as condições dos ensaios experimentais, as condições fronteira foram definidas de forma a que uma das extremidades da junta fosse encastrada e que a extremidade oposta estivesse sujeita a uma restrição vertical e a um deslocamento de tração. Na Figura 58 é possível observar as condições fronteira para ensaios aplicadas nas juntas, usando o ABAQUS®.

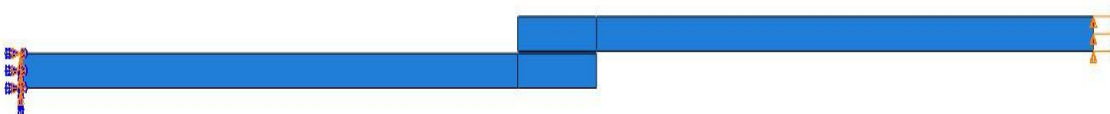


Figura 58 - Condições fronteira impostas nos modelos numéricos para JSS [134]

#### 3.5.2.4.2 Determinação das propriedades coesivas

De modo resumido as propriedades coesivas dos adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, são as que se encontram apresentadas na Tabela 21, Tabela 22 e Tabela 23, respetivamente, e cuja determinação vai ser detalhada de seguida.

A determinação das leis coesivas para o adesivo Araldite® AV138 foi realizada utilizando um método inverso, descrito em detalhe no trabalho de Campilho et al. [140]. No entanto, devido à não existência de ensaios de caracterização à fratura, o procedimento seguido foi ligeiramente diferente. Foram utilizados os valores de resistência à tração e corte através de ensaios em adesivo maciço e ensaio de corte TAST para a definição de  $t_n^0$  e  $t_s^0$ , respetivamente. Estes valores foram utilizados para a construção de leis coesivas aproximadas, utilizando inicialmente valores típicos de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$  para adesivos frágeis. As leis obtidas para tração e corte foram utilizadas no modelo numérico para uma das geometrias testadas (a junta de sobreposição simples com  $L_0$  de 20 mm), e as leis do adesivo foram estimadas de forma idêntica ao caso anterior, por ajuste das curvas  $P-\delta$  numéricas e experimentais. Os valores obtidos foram subsequentemente aplicados a todas as configurações testadas, com resultados bastante satisfatórios. Os valores de  $E$  e  $G$  foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST). Noutro trabalho [115] concluiu-se que os parâmetros obtidos permitem reproduzir de forma fiel as propriedades dos adesivos. A Tabela 26 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® AV138, numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 26 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com uma espessura de 0,2 mm (adaptado de [134])

$E$ [MPa]	$G$ [MPa]	$t_n^0$ [MPa]	$t_s^0$ [MPa]	$G_{Ic}$ [N/mm]	$G_{IIc}$ [N/mm]
4890	1560	39,45	30,2	0,2	0,38

Para o adesivo Araldite® 2015, as propriedades coesivas de camada do adesivo foram determinadas em trabalhos anteriores [141, 142], por um método inverso para a determinação de  $t_n^0$  e  $t_s^0$ . Nestes trabalhos é apresentada uma descrição mais detalhada desta metodologia, que basicamente consiste na determinação de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$  através de ensaios DCB e ENF, respetivamente, usando um método apropriado para a sua obtenção. O valor de  $G_{Ic}$  ou  $G_{IIc}$  é então utilizado para construção de uma lei coesiva no modo puro correspondente, que inicialmente tem um valor aproximado de  $t_n^0$  ou  $t_s^0$ , estimado em função das características do adesivo. A lei coesiva obtida é utilizada no modelo numérico correspondente (DCB para tração ou ENF para corte), com as mesmas dimensões do modelo a ser simulado. O valor de  $t_n^0$  ou  $t_s^0$  é então definido utilizando um procedimento de ajuste entre as curvas  $P-\delta$  numéricas e experimentais do teste respetivo de caracterização à fratura, para que a lei coesiva estimada permita reproduzir o comportamento observado da camada de adesivo. A Tabela 27 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® 2015 numa lei coesiva em modo misto. Os valores de  $E$  e  $G$  foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST), respetivamente [143].

Tabela 27 - Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® 2015 com uma espessura de 0,2 mm (adaptado de [134])

$E$ [MPa]	$G$ [MPa]	$t_n^0$ [MPa]	$t_s^0$ [MPa]	$G_{Ic}$ [N/mm]	$G_{IIc}$ [N/mm]
1850	650	23	22,8	0,43	4,7

O processo de obtenção de propriedades coesivas para o adesivo Sikaforce® 7752 seguiu um processo algo idêntico ao utilizado para o Araldite® 2015. De facto, para a determinação da lei coesiva ao corte, foi seguido um método inverso idêntico, correspondente à determinação do valor de  $G_{IIc}$  por ensaio de fratura ENF, seguido de ajuste iterativo manual para a estimativa de  $t_s^0$  [144]. Os valores utilizados neste trabalho são os valores médios de  $t_s^0$  e  $G_{IIc}$  obtidos na referência [144], cujo desvio entre provetes foi bastante reduzido, traduzindo a repetibilidade dos ensaios efetuados. Por outro lado, para a lei coesiva em tração, devido à inexistência, até à data, de procedimento inverso, foi seguido um processo distinto. O valor de  $G_{Ic}$  foi obtido por ensaios de fratura DCB [145], nomeadamente o valor médio de uma série de ensaios. O valor de  $t_n^0$  foi aproximado ao valor médio de resistência à tração de provetes maciços, ensaiados no mesmo trabalho [141]. Como foi definido em trabalhos anteriores que, no caso particular de solitação à tração, o valor de  $t_n^0$  não tem influência digna de registo para variações de  $t_n^0$  até 25% do valor obtido por método inverso (variação nos dois sentidos) [141], não foi considerado relevante neste trabalho a realização do dito procedimento. Os valores de  $E$  e  $G$  foram obtidos experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST) [145]. A Tabela 28 mostra os valores utilizados nos modelos numéricos para simular a camada de adesivo Sikaforce® 7752, numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 28 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Sikaforce® 7752 com uma espessura de 0,2 mm (adaptado de [134])

$E$ [MPa]	$G$ [MPa]	$t_n^0$ [MPa]	$t_s^0$ [MPa]	$G_{Ic}$ [N/mm]	$G_{IIc}$ [N/mm]
493,81	37,49	12,25	10,50	2,36	5,56

### 3.5.2.4.3 Validação do modelo numérico - Previsão da resistência

A validação do modelo numérico é realizada pela comparação entre os dados obtidos experimentalmente e os resultados numéricos obtidos através do ABAQUS®. Na Figura 59 é apresentada uma comparação entre os valores de  $P_{máx}$  numéricos, e os valores experimentais das JSS.

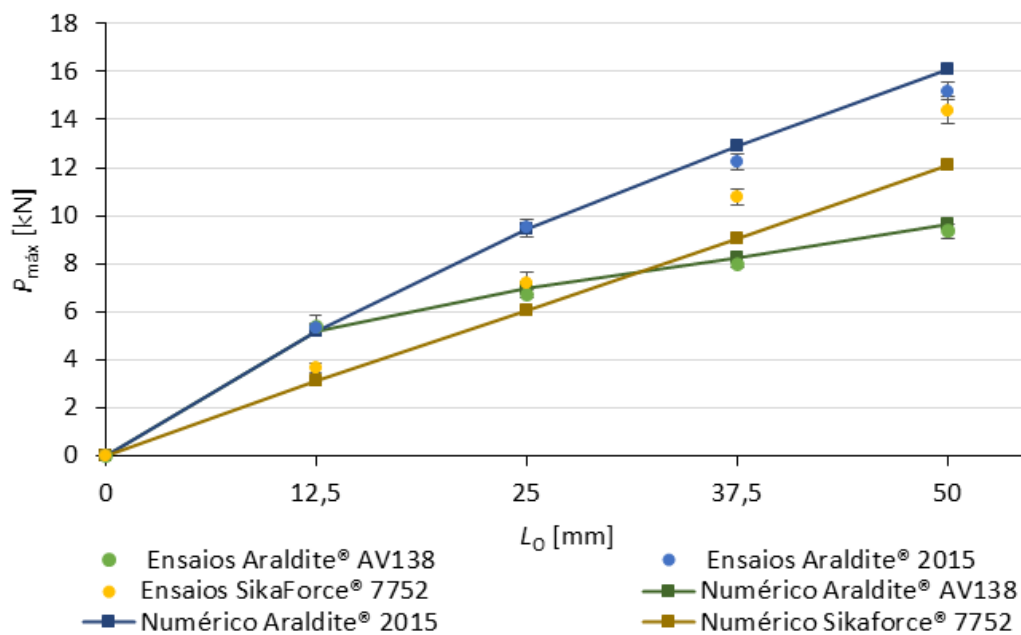


Figura 59 - Comparação de valores  $P_{máx}$  numéricos com valores experimentais da JSS (adaptado de [134])

Analisando a figura é possível constatar os seguintes factos:

- Para o adesivo Araldite® AV138, os valores de  $P_{máx}$  numéricos coincidem com os valores  $P_{máx}$  experimentais, estando contidos no desvio padrão calculado;
- Para o adesivo Araldite® 2015 os valores de  $P_{máx}$  numéricos encontram-se muito próximos dos experimentais em  $L_0=12,5$  mm e  $L_0=25$  mm. Para  $L_0=37,5$  mm, existe um pequeno desfasamento, estando o valor de  $P_{máx}$  numérico no limiar do desvio padrão superior do resultado experimental. No entanto, para  $L_0=50$  mm, o valor de  $P_{máx}$  numérico está fora do valor superior do desvio padrão do resultado experimental;
- Para o adesivo Sikaforce® 7752, a divergência entre os valores de  $P_{máx}$  numéricos e experimentais começa em  $L_0=12,5$  mm, sendo os valores de  $P_{máx}$  experimentais superiores aos numéricos.

Esta discrepância entre valores de  $P_{máx}$  numéricos e experimentais para os adesivos Araldite® 2015 e, particularmente, Sikaforce® 7752 (adesivo mais dúctil), reside no facto de nas simulações se usar uma lei triangular, enquanto, devido à ductilidade dos adesivos, seria mais adequado usar uma lei trapezoidal [68]. Já no caso do Araldite® AV138, a lei triangular é bastante adequada, tendo em conta o facto de praticamente não existir desfasamento entre os valores numéricos e experimentais.

A nível quantitativo, tal como aconteceu nos ensaios experimentais, o Araldite® 2015 é o adesivo que obtém melhor desempenho em todos os  $L_0$ . Tendo em consideração os valores numéricos, existe uma maior discrepância entre os valores de  $P_{máx}$  do Araldite® 2015 e do Sikaforce® 7752, do que aquela existente nos resultados experimentais.

Pode-se concluir que, no geral, os métodos numéricos utilizados no *software* ABAQUS® apresentam-se como uma solução viável para o estudo que se pretende realizar nesta dissertação. De facto, existem algumas vantagens notórias em relação à metodologia experimental, como o baixo custo em relação ao método experimental, um menor tempo na obtenção de resultados e a facilidade de alterar o modelo geométrico durante a realização dos ensaios.

### 3.5.3 Estudo numérico de ligação adesiva entre o casco e o *deck*

Previamente à utilização do *software* ABAQUS® é necessário determinar as condições sobre as quais vai incidir o estudo do mesmo. Primeiramente é apresentada a geometria de construção de uma embarcação e respetivas propriedades dos materiais constituintes e, de seguida, é exibida a secção do barco que vai ser utilizada para estudar a junta adesiva formada entre o casco e o *deck* numa embarcação de canoagem.

#### 3.5.3.1 Geometria da estrutura *sandwich* de uma embarcação

A geometria do casco e do *deck* têm diferentes configurações. Como o casco está mais propício a embates e outros esforços, são aplicadas mais camadas de reforços a fim de tornar o casco mais resistente. Na zona de maior esforço (parte central do barco, onde vai estar o utilizador), o casco é composto por cinco camadas, já o *deck* é apenas composto por três camadas por todo. Na Tabela 29 podem-se observar as características das geometrias consideradas e na Figura 60 a respetiva ordem de empilhamento.

Tabela 29 - Configuração das estruturas *sandwich* numa embarcação

Casco	Deck
1. Tecido de fibra de carbono <i>plain</i> 160 g/m <sup>2</sup>	1. Tecido de fibra de carbono <i>plain</i> 160 g/m <sup>2</sup>
2. Tecido de fibra de vidro <i>plain</i> 220 g/m <sup>2</sup>	2. Núcleo em espuma de PVC 3 mm
3. Núcleo em espuma de PVC 3 mm	3. Tecido de fibra de carbono <i>plain</i> 160 g/m <sup>2</sup>
4. Tecido de fibra de carbono <i>plain</i> 160 g/m <sup>2</sup>	
5. Tecido de fibra de carbono <i>plain</i> 160 g/m <sup>2</sup>	

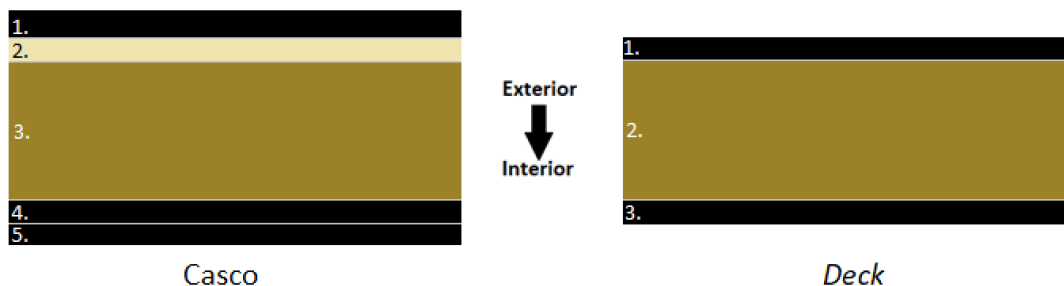


Figura 60 - Configuração das estruturas *sandwich* numa embarcação

### 3.5.3.1.1 Tecido de fibra de carbono

A fibra de carbono é um material versátil e de ampla aplicação, sendo muito utilizado na indústria aeroespacial, indústria automível, bem como aplicações de uso médico ou de lazer. Este material destaca-se pela baixa densidade, elevada resistência à tração e alta rigidez (módulo). Para a produção de embarcações este material surge no formato de tecido, como é apresentado na Figura 61.

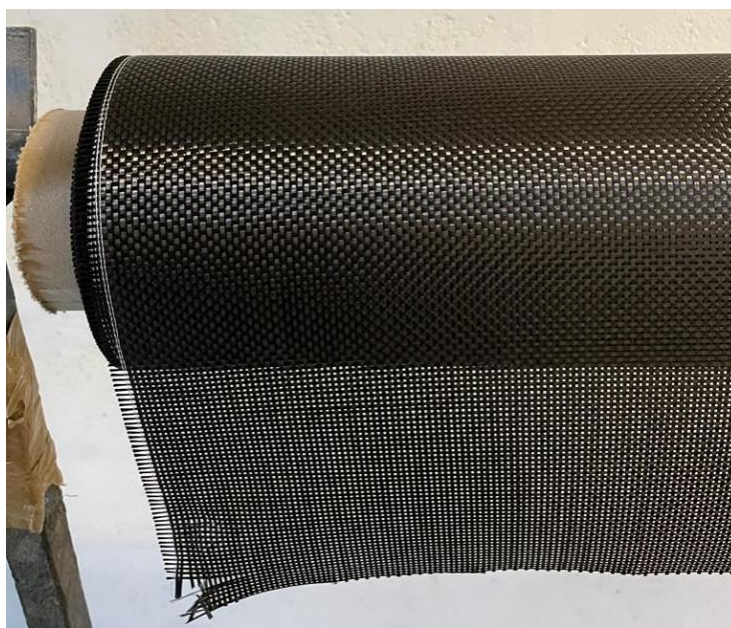


Figura 61 - Tecido de fibra de carbono (*plain*)

Na Tabela 30 é possível observar algumas das propriedades mais importantes deste material [146].

Tabela 30 - Propriedades do tecido de fibra de carbono [146]

Propriedades	Valor
Módulo de Young, $E$ [MPa]	240000
Tensão de cedência, $\sigma_f$ [MPa]	4200
Densidade da fibra, $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,78
Gramagem, $G_r$ [g/m <sup>2</sup> ]	160
Espessura do tecido, $t$ [mm]	0,30

### 3.5.3.1.2 Tecido de fibra de vidro

A fibra de vidro é um material mais flexível que a fibra de carbono e é o material preferido para aplicações em que é necessária flexibilidade ou a rigidez não é imperativa. A maior diferença deste material relativamente à fibra de carbono diz respeito ao custo. No fabrico de barcos em estrutura *sandwich* este material surge em tecido no formato de tecido (Figura 62).



Figura 62 - Tecido de fibra de vidro

Na Tabela 31 podem ser consultados algumas propriedades de tecido de fibra de vidro com 220 g/m<sup>2</sup> de gramagem [147].

Tabela 31 - Propriedades do tecido de fibra de vidro [147]

Propriedades	Valor
Módulo de Young, $E$ [MPa]	33000
Tensão de cedência, $\sigma_f$ [MPa]	626
Densidade da fibra, $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,6
Gramagem, $G_r$ [g/m <sup>2</sup> ]	220
Espessura do tecido, $t$ [mm]	0,25

### 3.5.3.1.3 Espuma de PVC (núcleo)

Uma vez que a embarcação é fabricada em estrutura *sandwich*, é necessário caracterizar o material utilizado para o núcleo do *kayak*. Entre os diferentes tipos de núcleos que se pode utilizar (espuma PET, espuma de PVC, *honeycomb*, cortiça, espumas PPSU, entre outros), o material escolhido pelo fabricante trata-se de uma espuma de PVC com 3 mm de espessura (Figura 63).



Figura 63 - Espuma de PVC (núcleo)

Na Tabela 32 é possível consultar algumas das propriedades mais importantes deste material [148].

Tabela 32 - Propriedades da espuma de PVC [148]

Propriedades	Valor
Tensão de cedência à tração, $\sigma_f$ [MPa]	2,5
Módulo de Young, $E$ [MPa]	95
Tensão de cedência ao corte, $\tau_f$ [MPa]	1,15
Módulo de elasticidade transversal, $G$ [MPa]	27
Coefficiente de Poisson, $\nu$	0,4
Densidade, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	80

### 3.5.3.1.4 Resina epóxida (matriz)

Nos compósitos, as resinas mais comuns empregues são as resinas poliéster, viniléster e epóxida, sendo a resina epóxida a que garante as melhores propriedades mecânicas aos compósitos. Neste sentido, o fabricante pretende conferir as melhores características possíveis às embarcações fabricada, pelo que, o uso de resina epóxida é imprescindível a estas estruturas. Na Tabela 33 são referenciadas algumas das propriedades mais importantes deste material [149].

Tabela 33 - Propriedades da resina epóxida RESOLCOAT 1400-1407 (matriz) [149]

Propriedades	Valor
Módulo de Young, $E$ [MPa]	3100 – 3300
Coefficiente de Poisson, $\nu$	0,35
Densidade, $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,15

### 3.5.3.1.5 Determinação das propriedades das camadas

O teor de fibras e o seu arranjo no interior de uma matriz polimérica, influencia de forma determinante o comportamento mecânico de um material compósito. Segundo a Figura 60, a geometria de construção de um *kayak* é constituída por dois tipos de reforço de fibras, um em fibra de carbono e outro em fibra de vidro.

Para descrever as propriedades mecânicas dos reforços no seu plano, é necessário determinar quatro propriedades, sendo estas [150]:

- O Módulo de Young na direção das fibras ( $E_1$ ), dado pela expressão:

$$E_1 = \eta E_f V_f + E_m (1 - V_f), \quad (2)$$

onde,

- $\eta$  é o fator de arranjo das fibras ( $\eta=1 \rightarrow$  fibras contínuas;  $\eta=0,5 \rightarrow$  tecidos equilibrados;  $\eta=0,375 \rightarrow$  manta de filamentos aleatórios);
- $E_f$  é o módulo de elasticidade das fibras [MPa];
- $E_m$  é o módulo de elasticidade da matriz [MPa];
- $V_f$  é a fração volúmica de fibras ( $V_f=35\% \rightarrow$  por se tratar de moldação manual).

- Módulo de Young transversal às fibras ( $E_2$ ), dado pela expressão:

$$E_2 = \frac{E_f \times E_m}{E_f(1-V_f) + E_m V_f}, \quad (3)$$

- Módulo de elasticidade transversal ( $G_{12}$ )

$$G_{12} = \frac{G_f \times G_m}{G_f(1-V_f) + G_m V_f}, \quad (4)$$

onde  $G_f$  é o módulo de elasticidade transversal das fibras [MPa];

$$G_f = \frac{E_f}{2 \times (1 + \nu_f)} \text{ e} \quad (5)$$

$G_m$  é o módulo de elasticidade transversal da matriz [MPa].

$$G_m = \frac{E_m}{2 \times (1 + \nu_m)}. \quad (6)$$

- Coeficiente de Poisson no plano ( $\nu_{12}$ )

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m (1 - V_f), \quad (7)$$

onde

- $\nu_f$  é o coeficiente de Poisson das fibras;
- $\nu_m$  é o coeficiente de Poisson da matriz.

De acordo com o fabricante, para o fabrico das embarcações é utilizada resina epoxídica [149]. Posto isto, procedeu-se ao cálculo das propriedades das camadas usadas na geometria.

Os resultados para cada propriedade do compósito de fibra de carbono/resina epoxídica, calculados através das equações anteriores, encontram-se na Tabela 34.

Tabela 34 - Propriedades mecânicas do compósito de fibra de carbono/resina epoxídica

Propriedades	Resina epoxídica [149]	Tecido de fibra de carbono
Módulo de Young, $E$ [MPa]	3200	240000
Coefficiente de Poisson, $\nu$	0,35	0,27
Densidade, $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,15	1,78

Propriedades	CFRP
$E_1$ [MPa]	44028,7
$E_2$ [MPa]	4884,8
$G_{12}$ [MPa]	1809,9
$\nu_{12}$	0,322

Através de um procedimento idêntico, os resultados para cada propriedade do compósito de fibra de vidro/resina epoxídica são obtidos pelas equações (2) a (7). Os valores obtidos das propriedades podem ser observados na Tabela 35.

Tabela 35 - Propriedades mecânicas do compósito de fibra de vidro/resina epoxídica

Propriedades	Resina epoxídica [149]	Tecido de fibra de vidro
Módulo de Young, $E$ [MPa]	3200	33000
Coefficiente de Poisson, $\nu$	0,35	0,33
Densidade, $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,15	2,60

Propriedades	GFRP
$E_1$ [MPa]	7854,8
$E_2$ [MPa]	4678,7
$G_{12}$ [MPa]	1734,1
$\nu_{12}$	0,343

### 3.5.3.2 Secção da embarcação para estudo

Dada a complexidade da estrutura, foi decidido reduzir o estudo da junta adesiva apenas a uma secção da embarcação. Para tal, foi considerada uma zona frontal de *kayak* monolugar (K1), que exteriormente está sujeita a pequenos impactos provocados pela remada ou outros impactos provocados pela colisão entre barcos e, interiormente, é um ponto de fixação do finca-pés (ou apoio dos pés). Desta forma, esta secção é um ponto essencial para o suporte dos pés do utilizador e, conseqüentemente, grande parte da força aplicada na água para o movimento da embarcação durante a remada será descarregada nesta zona (Figura 64).



Figura 64 - Secção da embarcação usada para o estudo da junta adesiva

Na Figura 65 é representada a vista em corte da secção escolhida anteriormente. A linha a vermelho faz referência ao casco enquanto a linha azul faz referência ao *deck* da embarcação, estando as duas unidas por uma junta topo a topo (Figura 66).

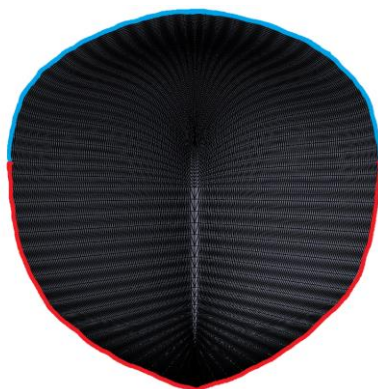


Figura 65 - Vista em corte de uma secção na direção da proa de um K1 (linha azul – *deck*; linha vermelha – casco)

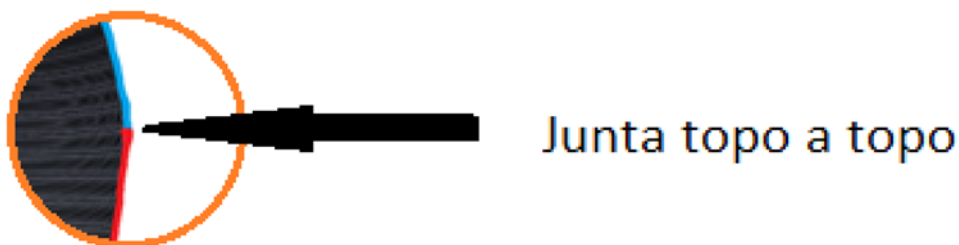


Figura 66 - Tipo de junta presente num K1

### 3.5.4 Condições da análise numérica

Após ser definida a secção de estudo, pode-se iniciar a análise numérica. Para tal será utilizada uma aproximação da geometria em 2D que além de fornecer resultados precisos, simplifica a sua resolução. A junta a ser modelada trata-se de uma junta topo a topo com os substratos curvos, com vista a replicar a geometria da Figura 65. Foi considerado um modelo de dano coesivo com forma triangular para simular a rotura da camada de adesivo que une o casco ao *deck*, enquanto estes foram considerados materiais lineares elásticos isotrópicos.

A elaboração dos modelos numéricos é realizada de forma sequencial, através do *software* ABAQUS®. Deste modo, serão descritos todos os passos e cuidados a ter na realização das juntas:

#### I. Módulo *Part*

Uma vez que vai ser utilizada uma aproximação de geometria em 2D, a primeira etapa consiste em desenhar os limites exteriores da junta adesiva de uma secção da embarcação. Para tal, a Figura 66 serviu de base ao desenho da junta, tendo o cuidado de tentar replicar a curvatura do barco no desenho dos substratos de forma a tornar o modelo o mais próximo possível do modelo real, como é sugerido na Figura 67. Foi considerada uma espessura de 0,2 mm para o adesivo. Os substratos foram dimensionados para o comprimento de 50 mm. Já em termos de espessura, o substrato alusivo ao *deck* tem 3,6 mm, enquanto o do casco conta com 4,2 mm, centrados um com o outro, ou seja, 0,3 mm de fora em cada lado (Figura 68).

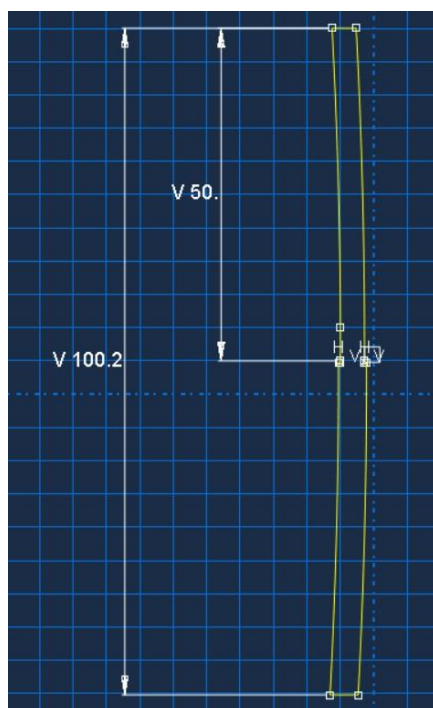


Figura 67 - Desenho 2D da geometria do provete no software ABAQUS®

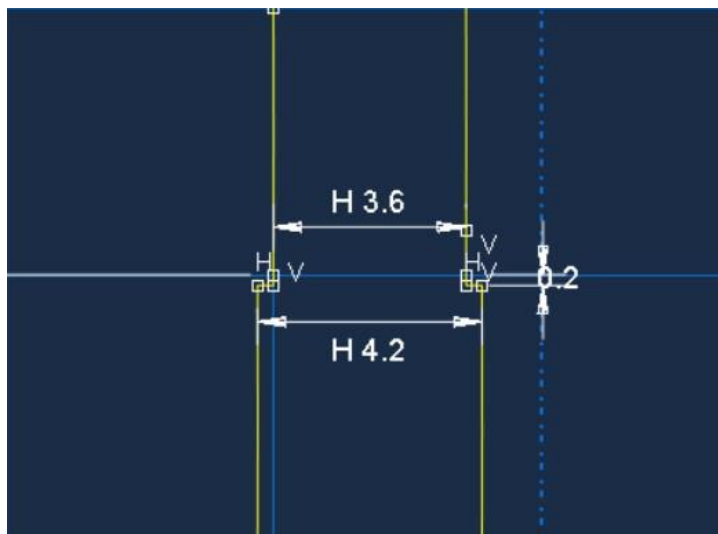


Figura 68 - Desenho 2D da geometria em detalhe no *software* ABAQUS®

De seguida, este contorno foi dividido em partições de forma a ser possível fazer a distinção de cada material e posteriormente atribuir as diferentes propriedades dos materiais. Na Figura 69 estão representadas as partições realizadas. Para o núcleo de PVC foi considerada a espessura de 3 mm, enquanto para o GFRP e o CFRP foi considerado a espessura de 0,3 mm para cada camada.

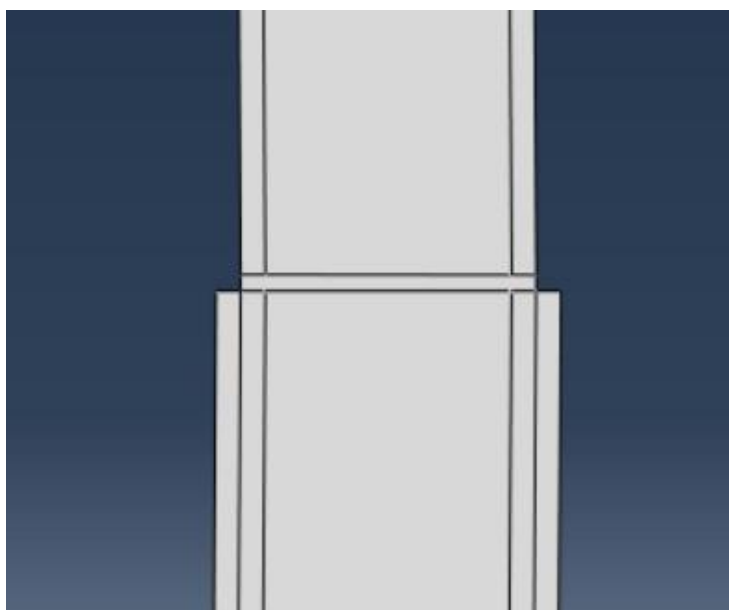


Figura 69 - Representação das partições no desenho 2D

## II. Módulo *Property*

Após concluído o passo anterior, é necessário criar os materiais no *software* ABAQUS®, isto é, definir as propriedades mecânicas de cada material que se está a considerar para atribuir a cada partição. Dentro deste módulo é selecionado o separador “*Create Part*”.

A Tabela 36 resume os passos que se deve seguir dentro deste separador para a criação dos materiais.

Tabela 36 - Definição dos tipos de material e comportamento no separador "Create Part"

Material	Separador "Create Part"
PVC	Mecânico → Elasticidade → Elástico → Isotrópico → $E=95$ MPa; $\nu=0,4$
CFRP	Mecânico → Elasticidade → Elástico → Isotrópico → $E=44028,7$ MPa; $\nu=0,322$
GFRP	Mecânico → Elasticidade → Elástico → Isotrópico → $E=7854,8$ MPa; $\nu=0,343$
Adesivo	Mecânico → Elasticidade → Elástico → Tração → $E=2571,4$ MPa; $G=990$ MPa
	Mecânico → Danos por leis de separação de tração → Dano QUADS → $\sigma_f=25,90$ MPa; $\tau_f=20$ MPa
	Subopções → Evolução de dano → Tipo: Energia → <i>Power Law</i> → $Power=1$ → $G_{IC}=0,5$ N/mm; $G_{IIC}=2,41$ N/mm Subopções → Estabilização de dano coesivo → Coeficiente de viscosidade= $5 \times 10^{-5}$ Pa.s

A segunda etapa dentro deste módulo passa por criar o tipo de secção que vai ser considerada. A Tabela 37 resume os passos a seguir dentro deste separador.

Tabela 37 - Definição dos tipos de secção no separador "Create Section"

Material	Separador "Create Section"
PVC	Sólido → Homogéneo → $B=25$ mm
CFRP	Sólido → Homogéneo → $B=25$ mm
GFRP	Sólido → Homogéneo → $B=25$ mm
Adesivo	Outro → Coesivo → tração-separação → $B=25$ mm

Após a definição de todas as propriedades dos materiais é necessária atribuir as mesmas às diferentes partições. Dado que os substratos não são simétricos, as propriedades são atribuídas de acordo com a disposição de materiais apresentados na Figura 60. Assim sendo, representa-se nas seguintes figuras o adesivo (Figura 70), o núcleo de PVC (Figura 71), as camadas de CFRP (Figura 72) e a camada de GFRP (Figura 73).

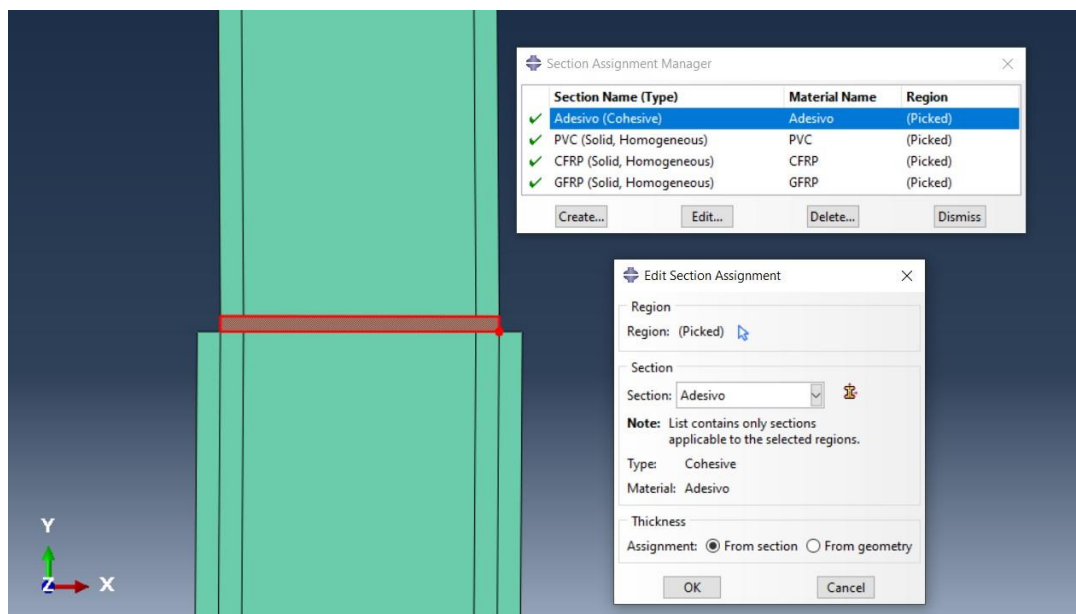


Figura 70 - Atribuição do adesivo à respectiva partição

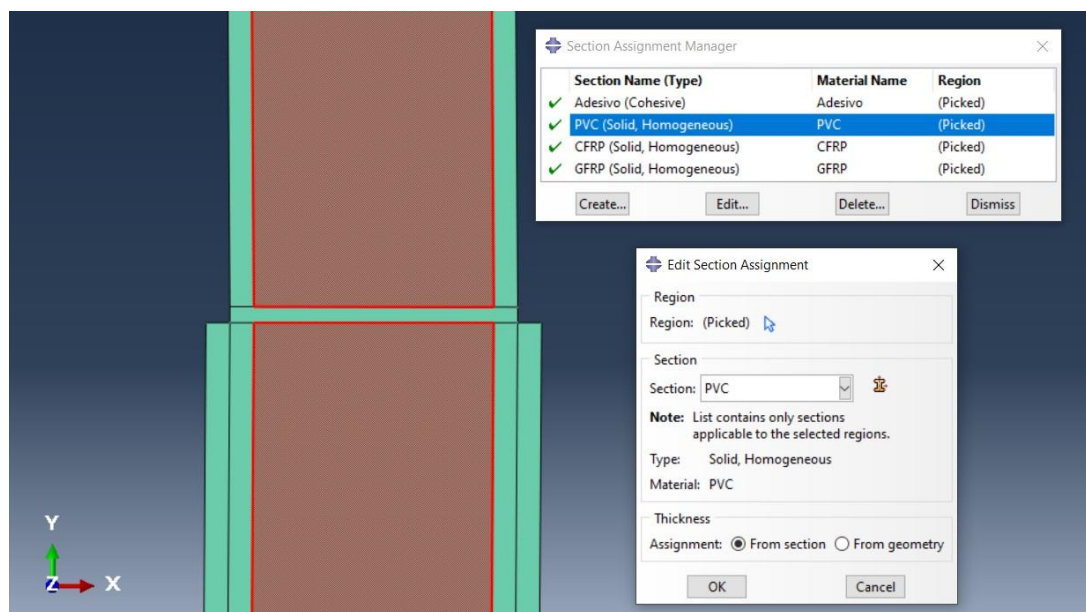


Figura 71 - Atribuição do núcleo de PVC às respectivas partições

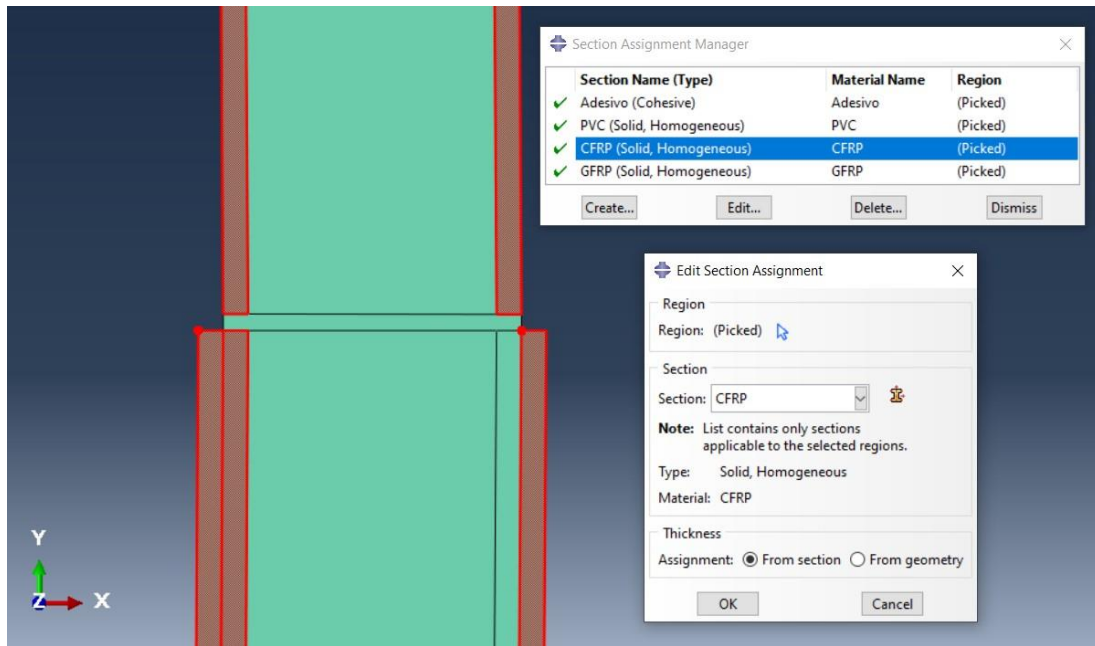


Figura 72 - Atribuição do CFRP às respectivas partições

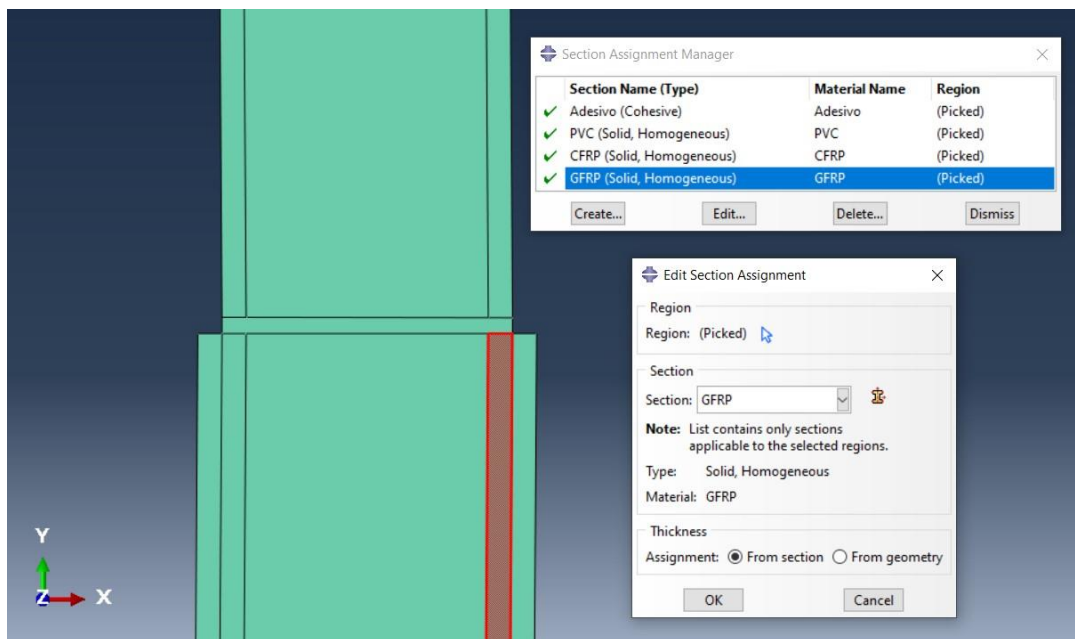


Figura 73 - Atribuição do GFRP à respectiva partição

### III. Módulo *Assembly*

O módulo “*Assembly*” é utilizado para criar referenciais entre as várias partes num sistema de coordenadas global e assim poder juntar todas numa mesma área de trabalho. Para adicionar a estrutura criada ao “*Assembly*” é necessário selecionar o separador “*Create Instance*” e definir quais as partes criadas, neste caso é apenas considerada uma única parte com o nome “Part-1” (Figura 74).

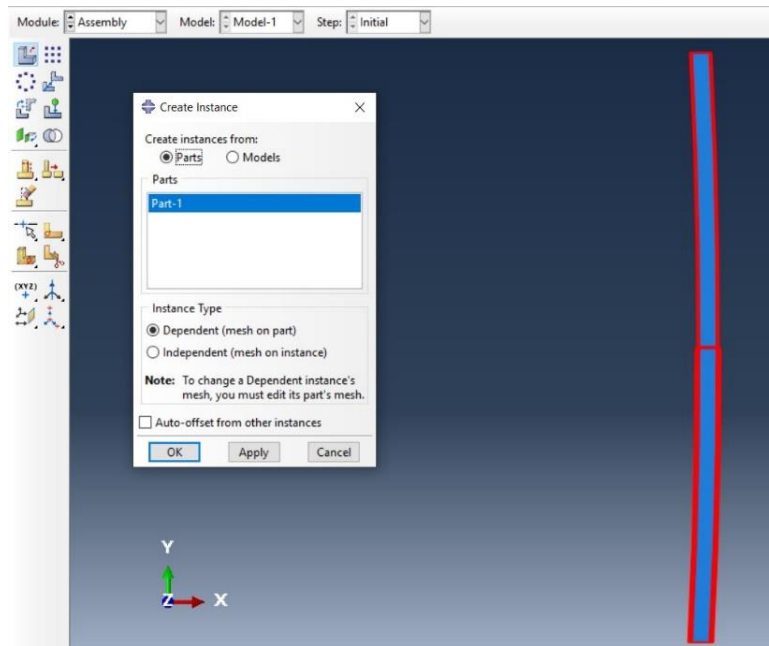
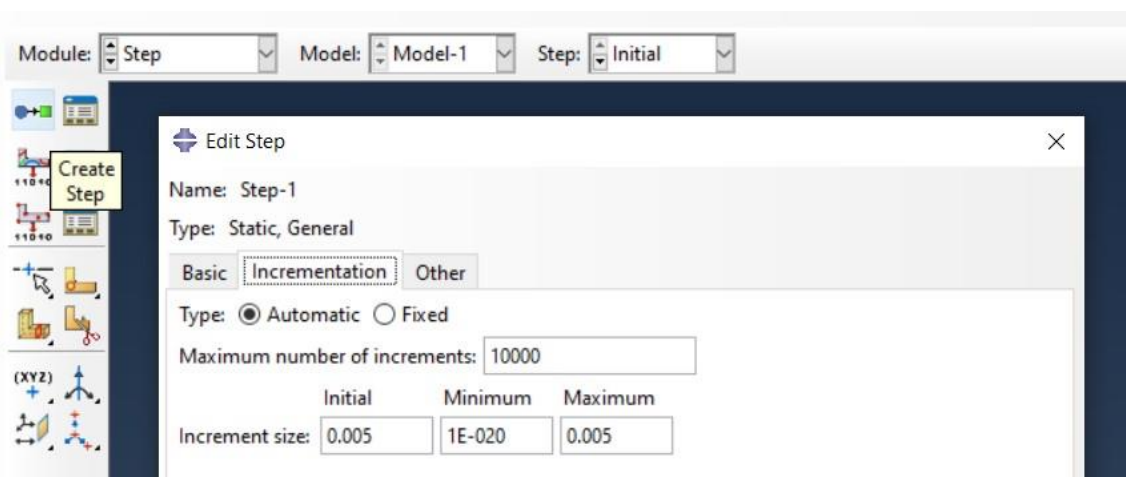


Figura 74 - Utilização da ferramenta "Create Instance"

#### IV. Módulo Step

O *software* ABAQUS® procede à realização da simulação por base de incrementos. Neste módulo, primeiramente, é feita a escolha do tipo de teste que será realizado, que é do tipo estático. Posto isto, é necessário introduzir o número máximo de incrementos que o ensaio pode conter, tal como os respetivos limites, limite máximo e limite mínimo. Como forma de facilitar a convergência durante a fase de propagação de dano, o valor mínimo admitido de tamanho de incremento (em % da solicitação aplicada) é  $1 \times 10^{-20}$ . Na Figura 75 são definidos os parâmetros de incrementos usados no presente estudo, onde é possível verificar que o tamanho máximo do incremento é igual ao valor inicial (0,5 %).

Figura 75 - Valores de incrementação utilizados no *software* ABAQUS® para o caso de estudo

## V. Módulo *Load*

O módulo “*Load*” é usado para definir o contexto em que o estudo será realizado. Neste caso, a junta adesiva será sujeita a um deslocamento num dos aderentes e encastrada no outro para determinar a resistência da mesma. Para tal, é necessário selecionar o separador “*Create Boundary Condition*”, para definir as condições de fronteira. À aresta inferior da junta é aplicado um encastramento, ou seja, são impedidos deslocamentos nos três eixos (Figura 76). Já à aresta superior do segundo aderente é aplicada a condição de deslocamento. Importa referir que foi definido um deslocamento máximo de 2 mm na direção YY (Figura 77).

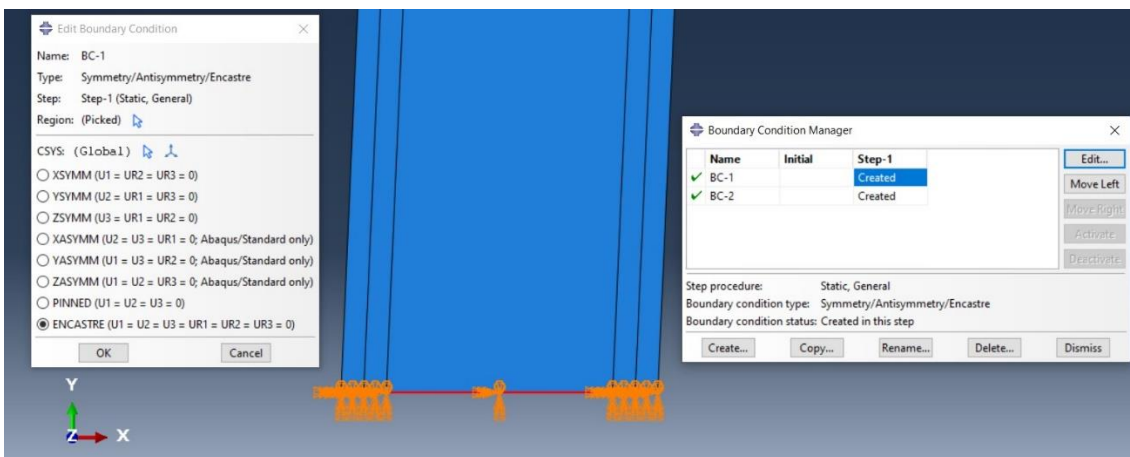


Figura 76 - Condições de encastramento da junta no software ABAQUS®

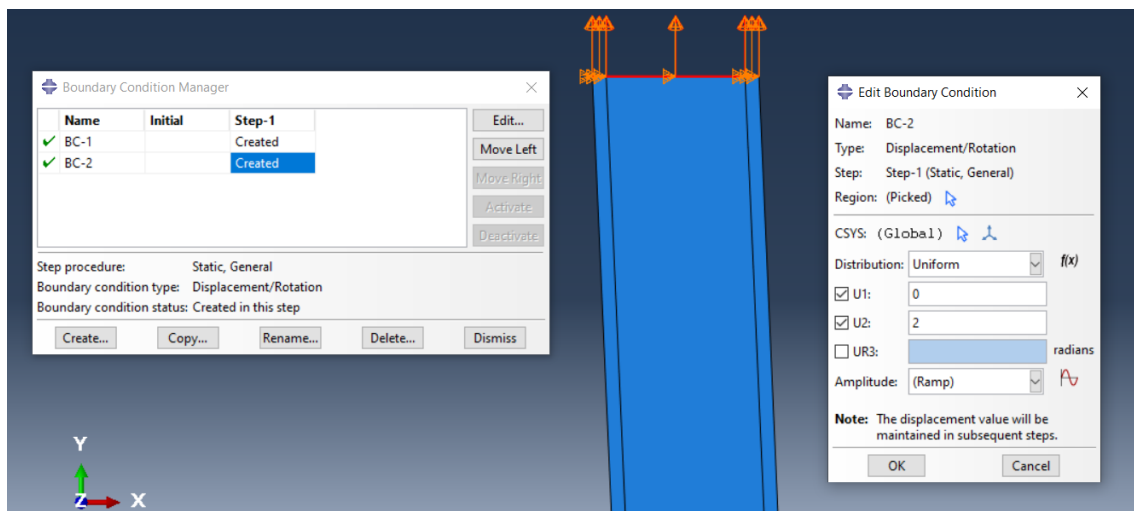


Figura 77 - Condições de deslocamento da junta no software ABAQUS®

## VI. Módulo *Mesh*

No módulo “*Mesh*” é realizada a divisão do corpo em estudo num número finito de elementos, que irão facilitar a simulação e a obtenção de resultados. Para começar, é definido o tipo de geometria de malha para cada componente, podendo os elementos ser quadriculares ou triangulares. Nas camadas referentes aos aderentes é selecionado

uma geometria do tipo quadricular e a técnica considerada é do tipo estruturada, o que irá dar a cor verde às camadas selecionadas (Figura 78). Já para o adesivo é selecionada uma geometria do tipo quadriculada, mas com uma técnica do tipo *sweep*, o que torna o adesivo visualmente amarelo (Figura 79). Para analisar as tensões de arrancamento e de corte, o tipo de malha utilizada para simular a propagação de dano no material adesivo deixa de ser do tipo *sweep*, passando a ser do tipo estrutural, o que possibilita extrair as distribuições de tensão com a precisão máxima a meio da espessura do adesivo

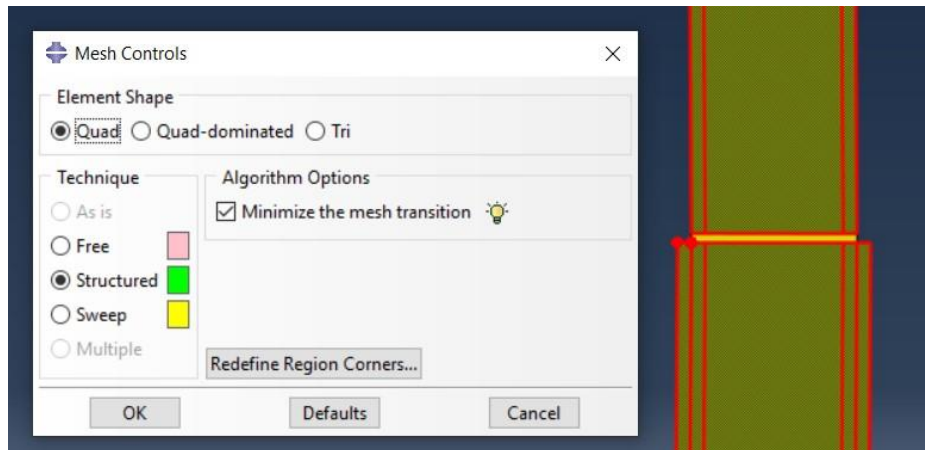


Figura 78 - Atribuição dos controlos de malha aos aderentes

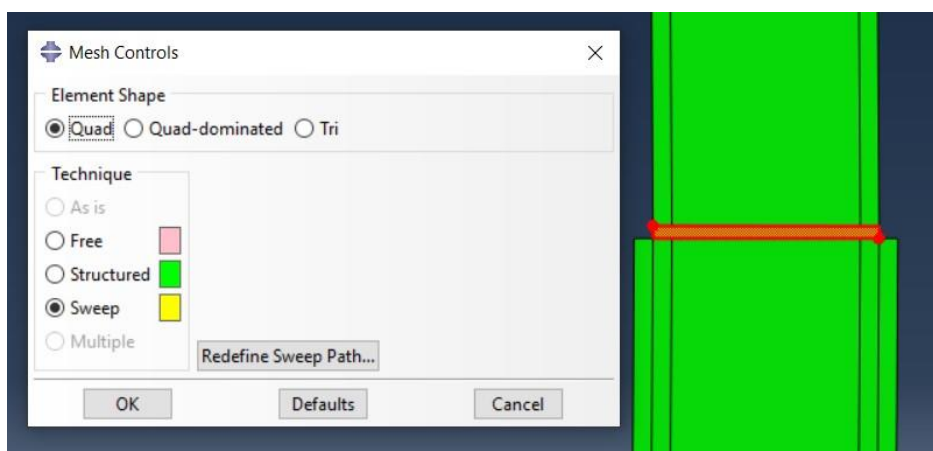


Figura 79 - Atribuição dos controlos de malha ao adesivo

De seguida, procede-se à definição do tipo de elemento de malha para cada componente. No caso das camadas referentes aos substratos foi usado o elemento CPE4 (Figura 80), enquanto para o adesivo foi utilizado o elemento COH2D4 (Figura 81). Para a obtenção das distribuições de tensão no adesivo, usaram-se também elementos CPE4 na partição correspondente. Em todos os casos, considerou-se uma viscosidade de  $1 \times 10^{-5}$  Pa.s. e linearidade para os elementos.

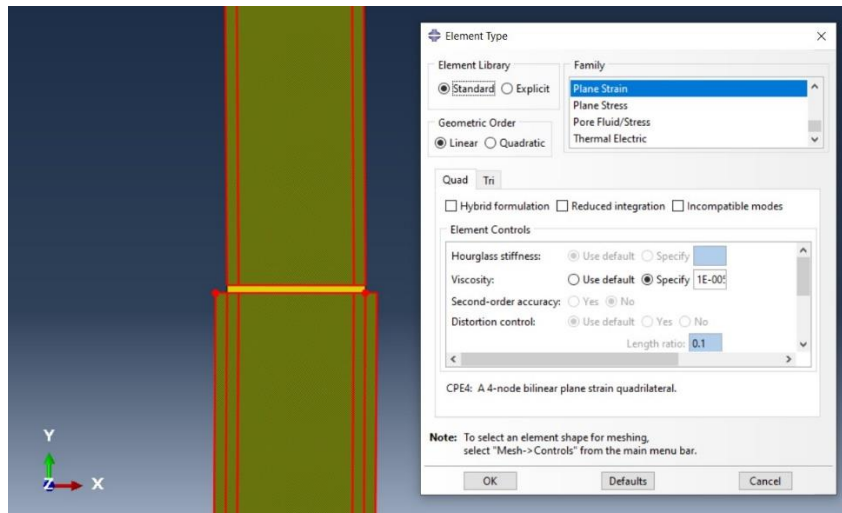


Figura 80 - Definição do tipo de elemento de malha dos aderentes

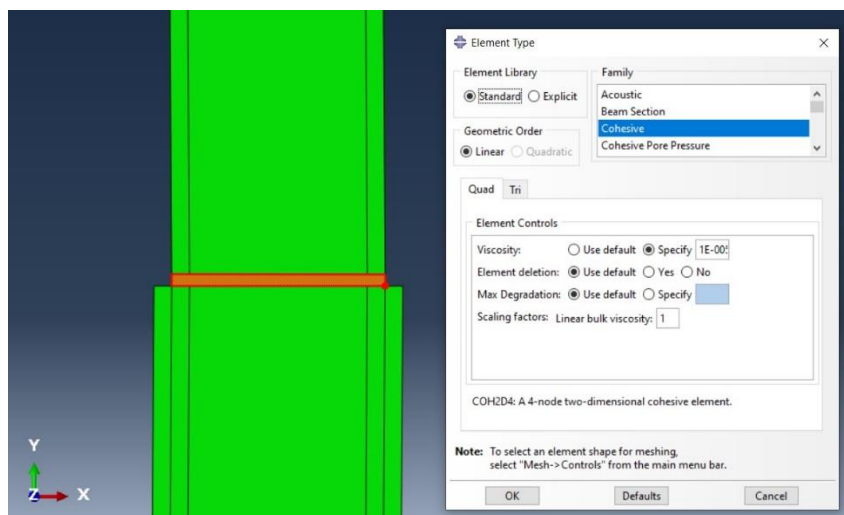


Figura 81 - Definição do tipo de elemento de malha do adesivo

Após estarem definidos os parâmetros anteriores, pode-se prosseguir à definição do tipo de semente a utilizar, ou seja, qual será o refinamento da malha. Quanto mais refinada for a malha mais aproximada da realidade será a análise. Dentro da escolha do tamanho da semente, pode-se definir que método se quer utilizar, nomeadamente selecionar o tamanho da semente ou o número de sementes na aresta selecionada. É ainda possível selecionar o tipo de efeito *bias* simples (decrece em tamanho conforme o sentido da seta de uma extremidade para outra) ou duplo (decrece em tamanho conforme o sentido da seta, do centro para extremidade ou vice-versa) ou sem *bias* (tamanho da semente constante ao longo da aresta). Na Figura 82 é possível observar quais os tipos de malha atribuídos para cada zona do modelo. Às arestas verticais da Figura 82 foi selecionada a opção sem *bias* e selecionado o tamanho de elemento para 0,15 mm. Para as arestas horizontais foi selecionado o efeito *bias* simples (decrece em tamanho das extremidades da junta para a região de sobreposição) onde o tamanho mínimo de elemento é 0,3 mm e o máximo é 1 mm. É necessário que a malha possua

um bom refinamento nos locais mais críticos, a fim de extrair com precisão as tensões nesses locais.



Figura 82 – Efeito *bias* da malha ao longo da junta adesiva

#### VII. Módulo *Job*

É neste módulo que se procede à simulação da junta em estudo. Nos modelos de propagação de dano por MDC, em que se estuda a resistência da junta, os testes decorrem até ao fim do deslocamento inicialmente imposto, de forma que ocorra a rotura total da mesma.

#### VIII. Módulo *Visualization*

Este último módulo permite visualizar os resultados obtidos da simulação realizada. Enquanto decorre o cálculo, é possível visualizar a evolução das tensões da junta, incremento a incremento. Por fim, após terminada a simulação, é possível converter os dados numéricos em formato *Excel* e realizar o processamento destes mesmos dados, nomeadamente a curva  $P-\delta$ , condicionante à previsão da resistência da junta.

#### 3.5.5 Determinação das propriedades coesivas

Previamente à caracterização das leis coesivas de tração e de corte é necessário conhecer os valores dos parâmetros representados na Figura 20 ( $t_n^0$ ,  $t_s^0$ ,  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$ ). Alguns estudos [151, 152] assumiram que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos por exclusivamente por ensaios de tração. No entanto, devido à restrição das deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos neste tipo de geometrias, bem como a propagação da fenda que normalmente ocorre em modo misto, provoca uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina [153, 154]. Portanto, é indicado a utilização de métodos que determinem estes parâmetros com o objetivo de reproduzir o comportamento do adesivo nas condições em que este é utilizado.

Para simular a camada de adesivo X numa lei coesiva em modo misto foram considerados os parâmetros presentes na Tabela 38.

Tabela 38 - Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo X

$E$ [MPa]	$G$ [MPa]	$t_n^0$ [MPa]	$t_s^0$ [MPa]	$G_{Ic}$ [N/mm]	$G_{IIc}$ [N/mm]
2571,40	990	25,90	20	0,5	2,41

### 3.5.6 Estudo de geometrias e adesivos alternativos

Atualmente, como é possível observar pelo capítulo 3.5.3.2, a construção de embarcações é realizada por uma junta topo a topo recorrendo-se ao adesivo X. Neste capítulo, para além da geometria principal, são considerados mais dois tipos de geometria de junta diferentes, e mais três tipos de adesivos diferentes, perfazendo um total de doze configurações possíveis. Estas configurações serão sujeitas a quatro tipos de ensaio diferentes, a fim de apurar a melhor configuração entre todas e proceda à melhoria da ligação atual.

#### 3.5.6.1 Geometrias a analisar

Neste estudo numérico são caracterizadas três geometrias diferentes para a junta adesiva formada entre o casco e o *deck* de uma embarcação de canoagem, onde se pretende avaliar a geometria com maior resistência. Perante estas, pode-se encontrar a configuração atual, uma geometria de junta adesiva topo a topo (Figura 83).

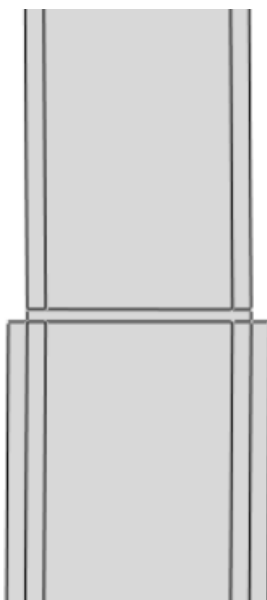


Figura 83 - Geometria de junta adesiva do tipo topo a topo (atual)

Como alternativa à geometria atual, surgem dois tipos de geometria do tipo chanfro, ambos com uma inclinação de  $45^\circ$  mas com disposição simétrica e uma espessura de adesivo de 0,2 mm. Apesar de estas geometrias terem características semelhantes, a curvatura da embarcação e diferente espessura das partes a ligar vão produzir

comportamentos diferentes ao adesivo. Na Figura 84 surge o primeiro tipo desta geometria em chanfro. Neste caso, visto exteriormente, o *deck* irá sobrepor o casco. O segundo tipo desta geometria surge na Figura 85, no qual o casco se sobrepõe o *deck*.

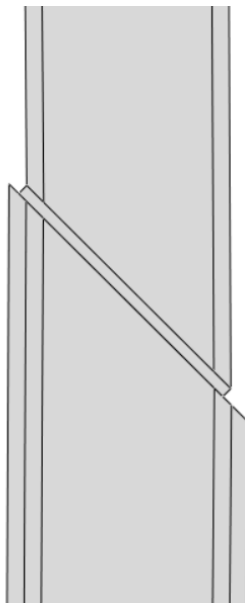


Figura 84 - Geometria de junta adesiva do tipo chanfro, a 45° (tipo 1)

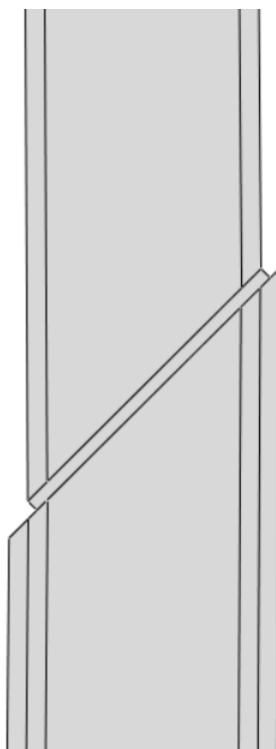


Figura 85 - Geometria de junta adesiva do tipo chanfro, a 45° (tipo 2)

### 3.5.6.1.1 Tipo de malha utilizada nas geometrias a analisar

Devido ao facto de se querer analisar três tipos de geometria diferentes, surge a necessidade de definir o tipo de semente a utilizar em cada modelo, de forma a garantir um bom refinamento da malha nos locais mais críticos. A configuração de malha para a geometria topo a topo, já definida no módulo “*Mesh*” do capítulo 3.5.4, pode ser visualizada na Figura 86 e em maior detalhe na Figura 87.



Figura 86 - Tipo de malha ao longo da junta adesiva topo a topo

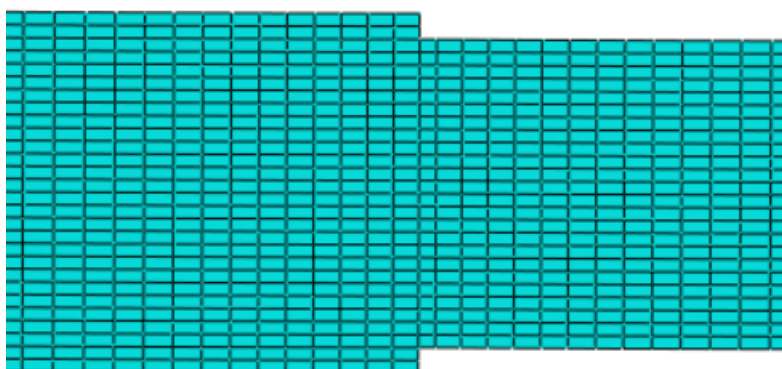


Figura 87 - Tipo de malha ao longo da junta adesiva topo a topo em detalhe

Nas outras duas geometrias a analisar, previamente à escolha do tipo de semente a utilizar, foi definido o tipo de geometria de malha para cada componente. Nas partições relativas ao adesivo é selecionado um controlo de malha com elementos quadrangulares, e a técnica considerada é do tipo *sweep*. Já nas partições referentes aos aderentes, consideram-se elementos do tipo quadrangular e triangular. À geometria de tipo quadrangular é atribuída uma técnica do tipo estruturada. Para as partições de geometria triangular, a técnica considerada é do tipo *free*. Foi definido o mesmo tipo de elemento de malha para estas geometria que tinha sido usado na geometria atual. No caso das camadas referentes aos substratos foi usado o elemento CPE4 para elementos quadrangulares e CPE3 para elementos triangulares, enquanto para o adesivo foi utilizado o elemento COH2D4. Em todos os casos, considerou-se uma viscosidade de  $1 \times 10^{-5}$  Pa.s. e comportamento linear para a função de forma dos elementos.

Nas Figura 88 e Figura 89 é possível observar quais os tipos de malha atribuídos para cada zona dos modelos que, apesar de pequenas diferenças, foram realizados de forma idêntica. Às arestas verticais da foi selecionada a opção sem *bias* e selecionado o mesmo número de sementes de forma a igualar as partições já criadas. Para as arestas horizontais foi selecionado o efeito *bias* simples (decrece em tamanho das

extremidades da junta para a região de sobreposição) com tamanho mínimo de elemento de 0,3 mm e máximo de 2 mm. Na Figura 90 e Figura 91 pode-se observar em maior detalhe todas as características do tipo de malha mencionadas.



Figura 88 - Tipo de malha ao longo da junta adesiva do tipo chanfro (tipo 1)



Figura 89 - Tipo de malha ao longo da junta adesiva do tipo chanfro (tipo 2)

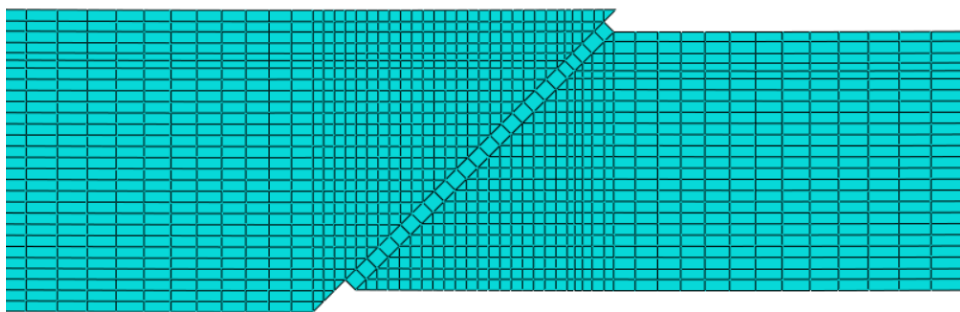


Figura 90 - Tipo de malha ao longo da junta adesiva do tipo chanfro em detalhe (tipo 1)

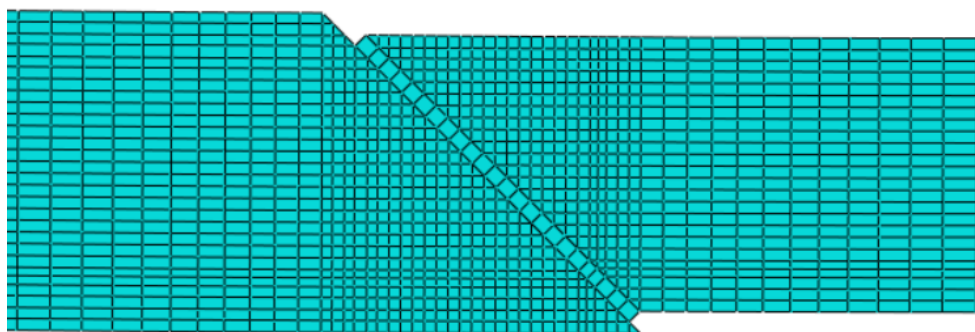


Figura 91 - Tipo de malha ao longo da junta adesiva do tipo chanfro em detalhe (tipo 2)

### 3.5.6.2 Adesivos a analisar

Apesar de um dos focos principais do trabalho consistir em avaliar o desempenho que o adesivo X tem para o fabrico das embarcações, são ainda considerados outros três adesivos viáveis para o mesmo fim, que possam melhorar a qualidade e resistência das embarcações produzidas. Na Tabela 39 são apresentados os parâmetros coesivos em tração e corte para os quatro adesivos considerados neste estudo numérico, o adesivo

X descrito no capítulo 3.5.5, e os restantes adesivos encontram-se descritos no capítulo 3.5.2.4.2.

Tabela 39 - Parâmetros coesivos em tração e corte dos adesivos considerados para o estudo numérico (adaptado de [134])

Adesivo	$E$ [MPa]	$G$ [MPa]	$t_n^0$ [MPa]	$t_s^0$ [MPa]	$G_{Ic}$ [N/mm]	$G_{IIc}$ [N/mm]
X	2571,40	990	25,90	20	0,5	2,41
Araldite® AV138	4890	1560	39,45	30,2	0,2	0,38
Araldite® 2015	1850	650	23	22,8	0,43	4,7
Sikaforce® 7752	493,81	37,49	12,25	10,5	2,36	5,56

### 3.5.6.3 Ensaios a realizar

Para além dos mecanismos de dano apresentados no capítulo 2.1.4, uma embarcação pode estar sujeita a outros esforços que, apesar de não promoverem diretamente a degradação da ligação adesiva, estão a sujeitar a embarcação a alguns esforços. Dentro destes, pode-se considerar o próprio peso do utilizador ou utilizadores, e a força que estes aplicam na embarcação resultante da força que colocam na água para o movimento da embarcação.

Uma vez que a junta adesiva pode estar sujeita a diferentes esforços, foram considerados quatro tipos de ensaio a realizar para verificar a capacidade de cada configuração de junta em suportar os esforços impostos durante a operação da embarcação. Entre estes são considerados o esforço de tração, esforço de compressão, esforço de flexão e esforço de corte. Na Figura 92 é possível observar as condições fronteira impostas ao esforço de tração<sup>(a)</sup>, compressão<sup>(b)</sup> e flexão<sup>(c)</sup>. No primeiro e segundo caso, à aresta inferior da junta é aplicado um encastramento e à aresta superior é aplicada a condição de deslocamento segundo o eixo YY, positivo no caso de ser à tração e negativo caso seja compressão, e a restrição de deslocamento segundo o eixo XX. No terceiro caso, o esforço de flexão procura replicar o efeito provocado por um choque exterior. Tanto à aresta inferior como superior é aplicado um encastramento. O deslocamento é imposto numa aresta próxima da zona do adesivo, segundo o eixo XX no sentido negativo, e a restrição de deslocamento segundo o eixo YY. Em todos os casos prevalecem as dimensões apresentadas na Figura 67.

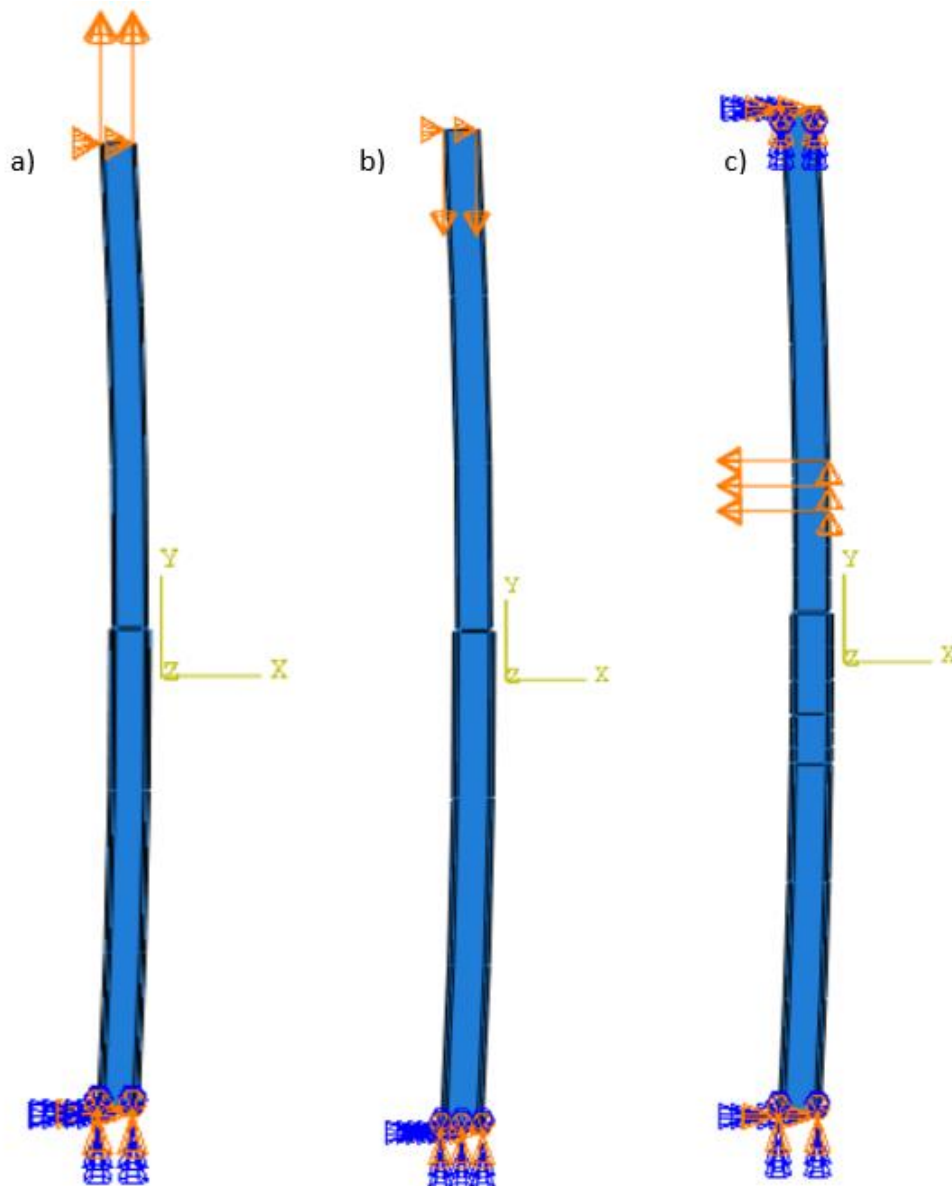


Figura 92 - Condições fronteira da junta no *software* ABAQUS® para esforço de: a) tração, b) compressão, c) flexão

Para replicar o esforço de corte na junta adesiva, as dimensões da geometria 2D sofreram uma alteração a nível do comprimento, que foi reduzido de 100,2 mm para 20,2 mm. Na Figura 93 é possível visualizar as condições fronteira impostas a esta geometria. À aresta inferior foi aplicado um encastramento, enquanto à aresta superior foi aplicada uma condição de deslocamento negativo no eixo XX e fixado o deslocamento no eixo YY.

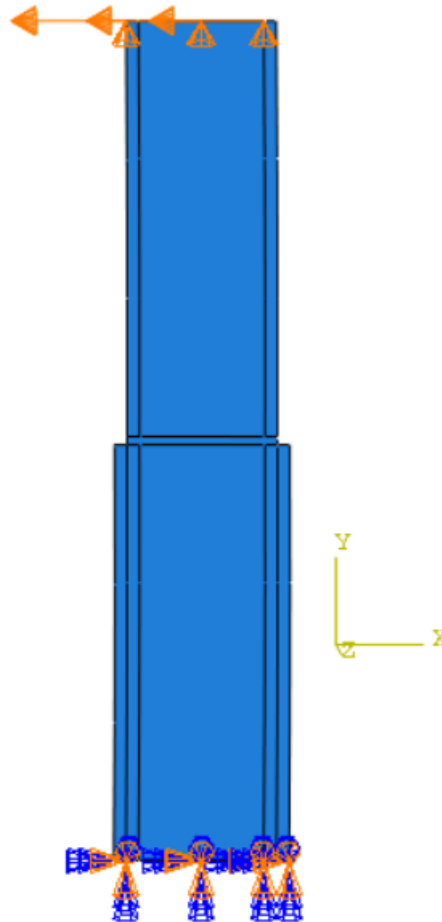


Figura 93 - Condições fronteira da junta no software ABAQUS® para esforço de corte

Apesar de as condições fronteira estarem apresentadas na geometria de junta adesiva topo a topo, as mesmas condições são também aplicadas às outras duas geometrias.

### 3.5.7 Análise de tensões na junta

Neste capítulo, é realizada a comparação da distribuição das tensões de corte ( $\tau_{xy}$ ) e tensões de arrancamento ( $\sigma_y$ ) em regime elástico para as diferentes geometrias e tipos de adesivo, em função dos quatro ensaios realizados. Estas tensões foram retiradas no plano médio de ligação, isto é, a meio da espessura do adesivo. Para a obtenção dos gráficos foi utilizado um processo de normalização, que consistiu em dividir as tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  pela tensão média de corte ( $\tau_{méd}$ ) para cada valor de  $L$ . O comprimento também sofreu um processo de normalização, de tal forma que o intervalo do gráfico é dado por  $0 \leq x/L \leq 1$ .

### 3.5.7.1 Esforço de tração

#### 3.5.7.1.1 Tensões de corte

Na Figura 94, na Figura 95 e na Figura 96 são apresentados os gráficos referentes à distribuição das tensões de corte normalizadas dos adesivos ao longo das diferentes geometrias propostas. Pela análise das figuras é possível observar a existência de picos de tensões nas extremidades da junta adesiva e a inexistência de picos de tensão na zona interior da ligação, devido à maior resistência nos extremos da ligação. Verifica-se que os valores de picos de  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  variam conforme a rigidez de cada adesivo, sendo claramente o adesivo Araldite® AV138 mais rígido entre os quatro. O adesivo Sikaforce® 7752 demonstra uma distribuição mais uniforme das tensões geradas, justificada pela sua elevada flexibilidade. Nas três figuras o adesivo Sikaforce® 7752 é o que apresenta os picos de tensão mais baixos. Na Figura 94 o valor do pico de tensão é 28,4% inferior, na Figura 95 é 9,6% inferior e na Figura 96 é 28,8% inferior, comparativamente aos valores do adesivo X.

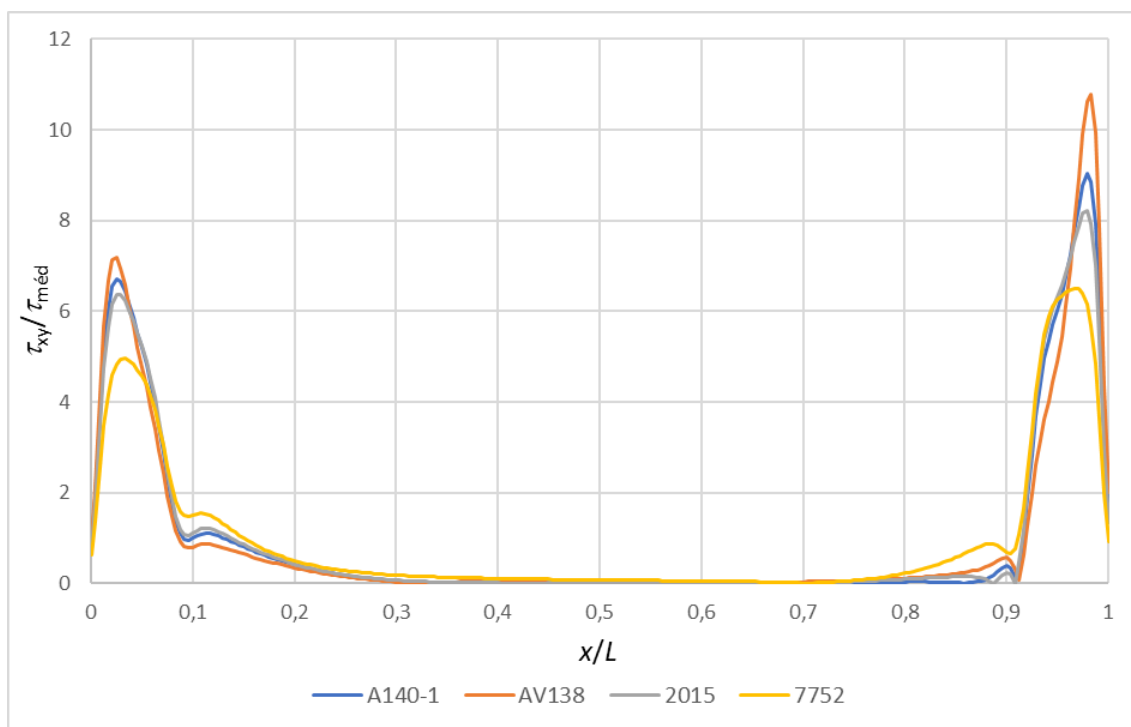


Figura 94 – Distribuição das tensões  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  para a geometria topo a topo em função do tipo de adesivo (esforço de tração)

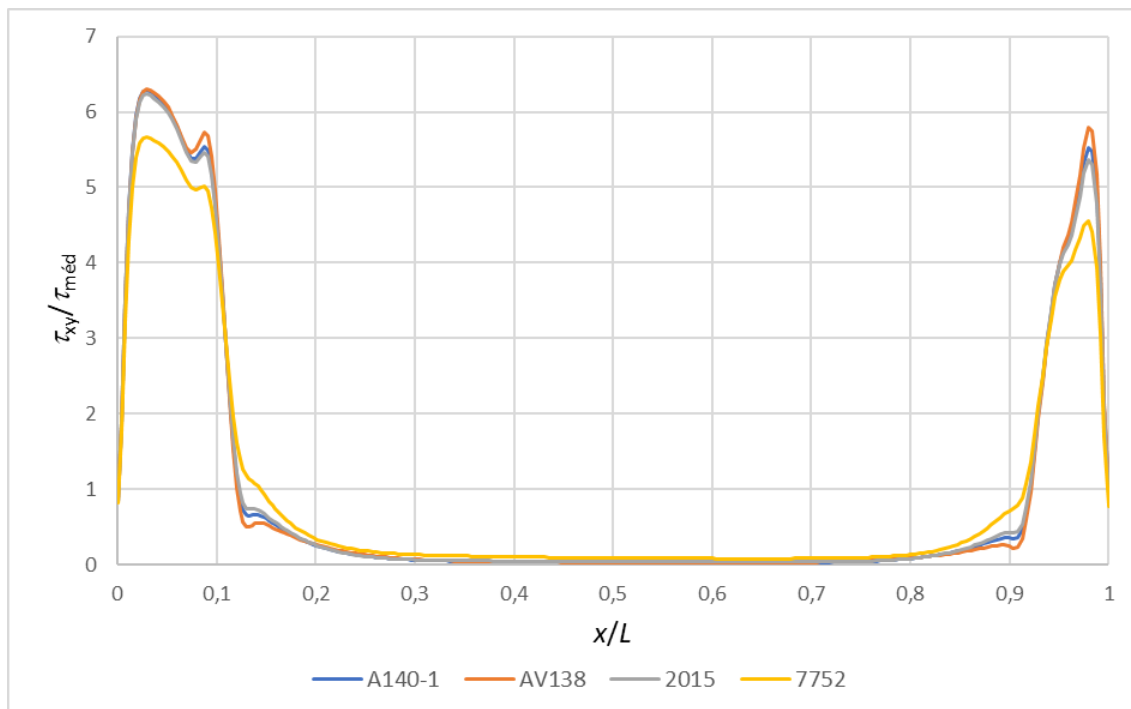


Figura 95 - Distribuição das tensões  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  para a geometria em chanfro 1 em função do tipo de adesivo (esforço de tração)

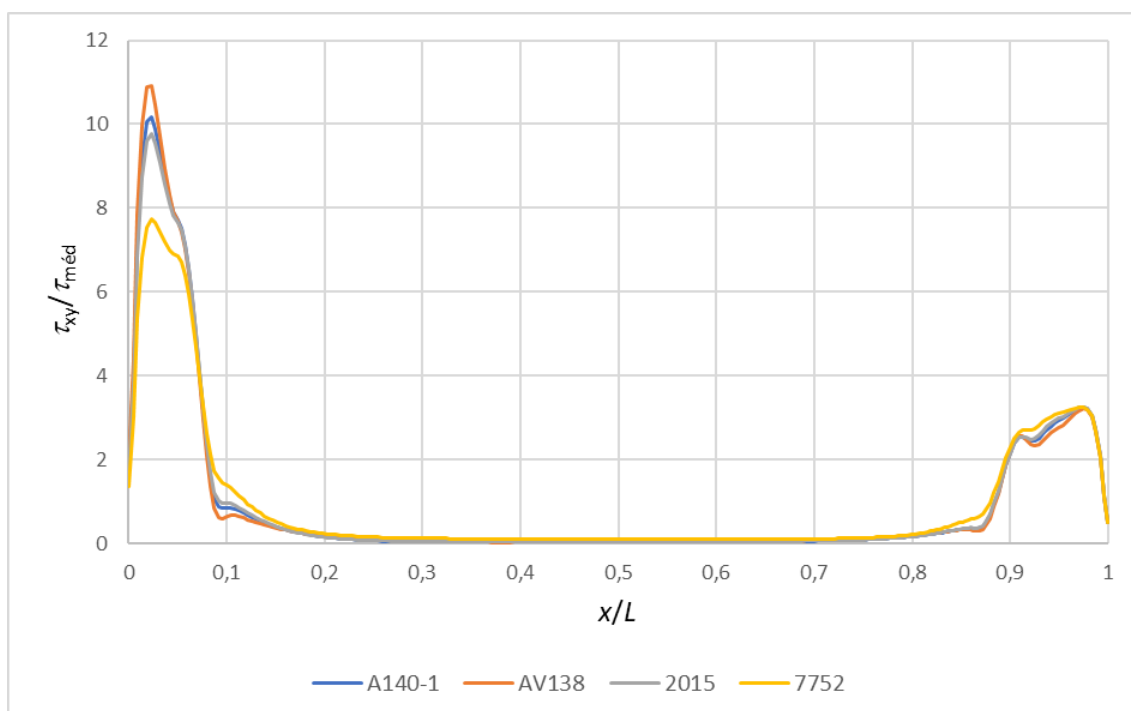


Figura 96 - Distribuição das tensões  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  para a geometria em chanfro 2 em função do tipo de adesivo (esforço de tração)

A comparação entre geometrias mostra que, numa geometria topo a topo (Figura 94), a curvatura da embarcação produz o aparecimento de picos maiores de tensão na zona exterior do adesivo ( $x/L_0 \approx 1$ ) quando esta ligação se encontra sujeita a esforços de tração.

A Figura 95 mostra a evolução de  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  para os vários adesivos em função de uma geometria em chanfro. Apesar de as diferenças entre picos de tensão não serem tão acentuadas como na geometria topo a topo, verifica-se que os picos de tensão de corte encontram-se organizados pela rigidez de cada adesivo, mas quase sem diferença nenhuma entre eles, à exceção do adesivo Sikaforce® 7752. Pode-se visualizar que, nesta geometria, os picos de tensão tendem a diminuir, principalmente para os adesivos mais rígidos. Para o segundo tipo de geometria em chanfro, as curvas de distribuição de  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  encontram-se representadas na Figura 96. Apesar de os picos máximos de tensão sofrerem um decréscimo favorável na parte externa da embarcação ( $x/L_0 \approx 1$ ), também se observa um pequeno crescimento de valor para os picos máximos de tensão de cada adesivo em comparação com a geometria topo a topo, não sendo benéfico para os adesivos, especialmente os mais rígidos. Comparando apenas o adesivo que atinge os maiores picos de tensão em cada geometria, os picos de tensão  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  para o adesivo Araldite® AV138 diminui 42,3% para a geometria em chanfro 1 e aumenta 1,1% para a geometria em chanfro 2, relativamente à geometria topo a topo.

### 3.5.7.1.2 Tensões de arrancamento

Na Figura 97, na Figura 98 e na Figura 99 são apresentados os gráficos referentes à distribuição das tensões de  $\sigma_y/\tau_{méd}$ , em regime elástico, nos adesivos para as diferentes geometrias propostas.

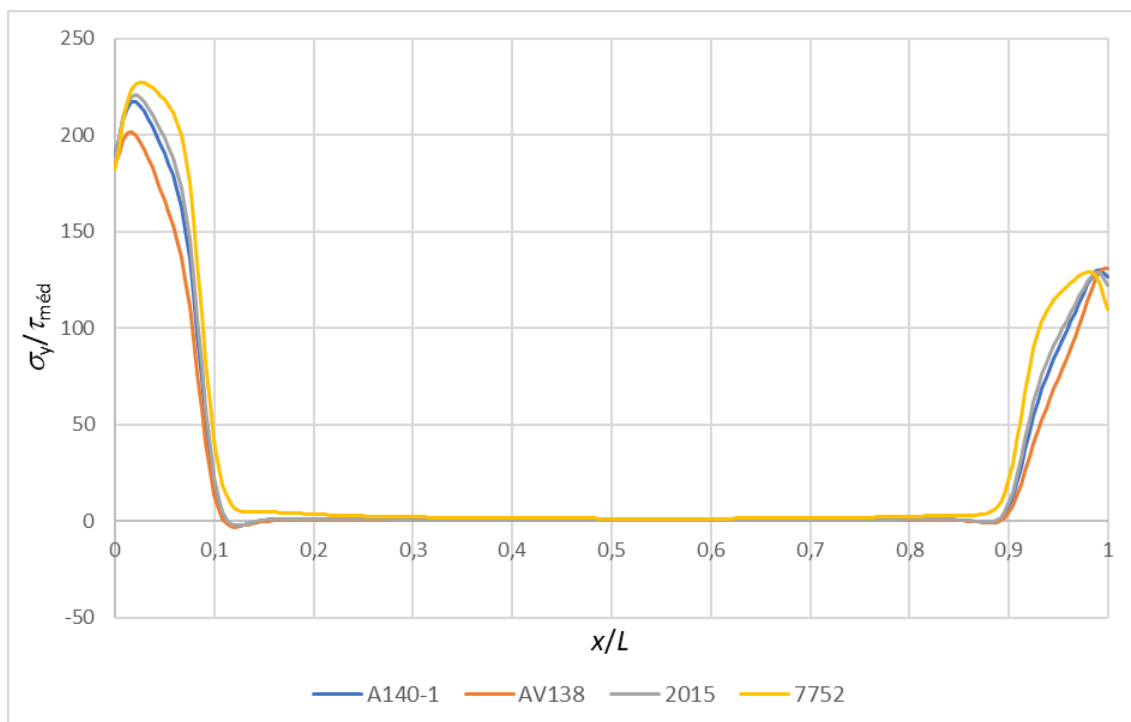


Figura 97 - Distribuição das tensões  $\sigma_y/\tau_{méd}$  para a geometria topo a topo em função do tipo de adesivo (esforço de tração)

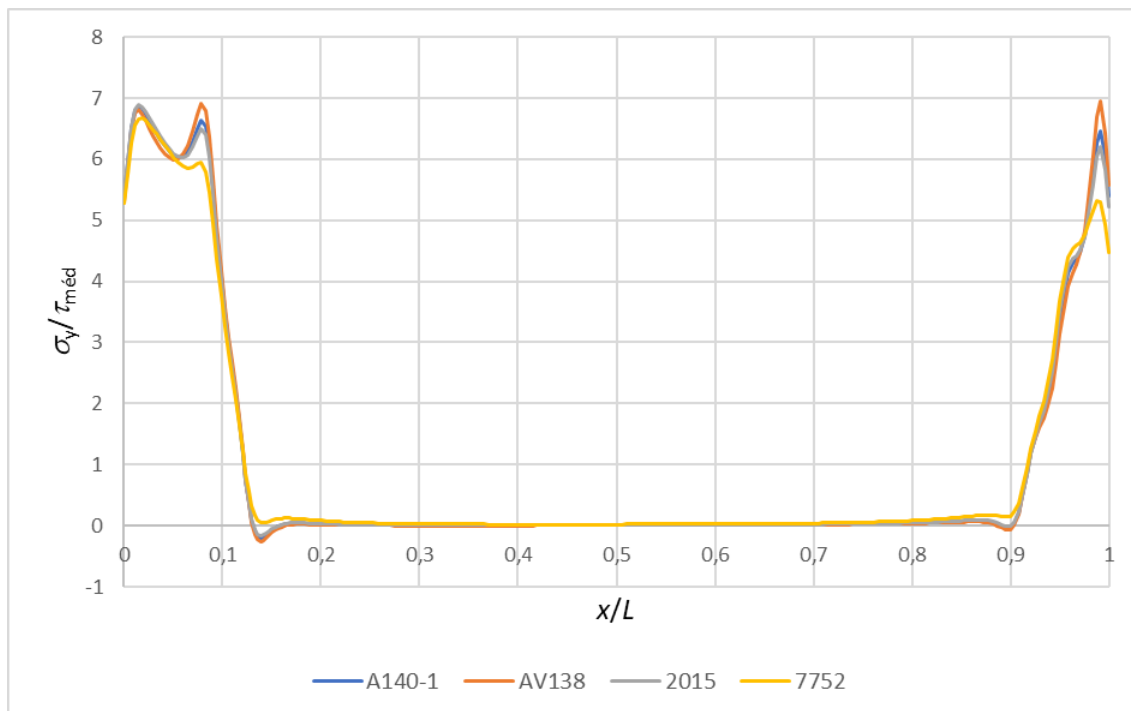


Figura 98 - Distribuição das tensões  $\sigma_y/\tau_{méd}$  para a geometria em chanfro 1 em função do tipo de adesivo (esforço de tração)

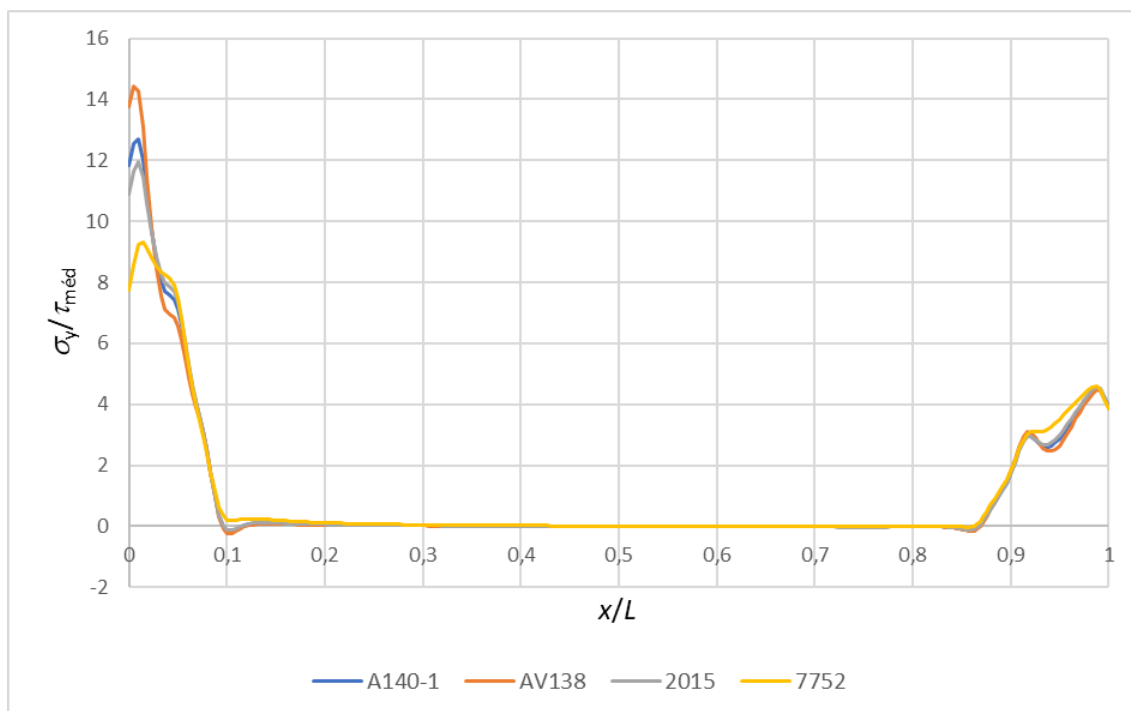


Figura 99 - Distribuição das tensões  $\sigma_y/\tau_{méd}$  para a geometria em chanfro 2 em função do tipo de adesivo (esforço de tração)

Observando as figuras, pode-se dizer que as  $\sigma_y/\tau_{méd}$  para o efeito do esforço de tração caracterizam-se pelo aparecimento de picos de tensão nas extremidades do adesivo nas três geometrias. Relativamente à geometria topo a topo (Figura 97), verifica-se uma

tendência oposta às seguintes figuras (Figura 98 e Figura 99), já que existe uma diferença menor dos picos de tensão obtidos nas extremidades da junta adesiva com o aumento da rigidez do adesivo. Na Figura 97, quando se comparam os valores dos picos de tensão máximos dos adesivos, constata-se que pico máximo obtido para o adesivo Araldite® AV138 é 9,6% inferior ao do adesivo X. Na Figura 98, o valor de pico de tensão do adesivo Sikaforce® 7752 é 14,8% inferior ao do adesivo X e na Figura 99 é 30,3% inferior ao do adesivo X.

Na Figura 98 as tensões  $\sigma_y/\tau_{méd}$  dos adesivos diminuiriam drasticamente em comparação à da geometria topo a topo (Figura 97). Neste caso, o crescimento dos picos de tensão surge organizado pela crescente rigidez de cada adesivo. Ao analisar a Figura 99, pode-se verificar que os picos máximos de tensão  $\sigma_y$  normalizada decrescem consideravelmente relativamente aos da Figura 97. Ainda que esta geometria imponha menos acumulação de tensões nas extremidades da ligação do que a geometria topo a topo, os picos máximos obtidos são superiores ao primeiro tipo de geometria em chanfro (Figura 98), o que indica que, para esforços de tração, esta geometria não seja a mais adequada entre as três.

### 3.5.7.2 Esforço de compressão

#### 3.5.7.2.1 Tensões de corte

Na Figura 100, na Figura 101 e na Figura 102 são apresentados os gráficos referentes à distribuição das tensões de corte normalizadas dos adesivos para as diferentes geometrias propostas. A partir da análise das curvas  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  para um esforço de compressão, constata-se um comportamento repetitivo, nomeadamente o aparecimento de picos de tensões nas extremidades da junta adesiva cuja intensidade depende da rigidez de cada adesivo.

A geometria topo a topo é representada pela Figura 100, neste caso verifica-se a existência de picos de tensão quase simétricos nas extremidades da junta adesiva. Os picos de tensão tendem a apresentar uma distribuição mais uniforme na zona interior da embarcação ( $x/L_0 \approx 0$ ) do que acontece na zona exterior. A Figura 101 apresenta as curvas obtidas para o comportamento de cada adesivo quando o primeiro tipo de geometria em chanfro é colocado sob esforços de compressão. Verifica-se que os adesivos Araldite® AV138, X e Araldite® 2015, apesar das diferenças entre a rigidez de cada adesivo, apresentam picos de tensão de corte muito próximos entre os outros. Pode ser visto também que os picos de tensão obtidos para estes adesivos são inferiores aos apresentados na geometria topo a topo (Figura 100) em cerca de 26,1%, pelo que esta geometria se apresenta como uma alternativa benéfica. Já o adesivo Sikaforce® 7752 apresenta aproximadamente o mesmo comportamento que acontece na Figura 100. Por último, apesar de a geometria em chanfro tipo 2 (Figura 102) apresentar o melhor comportamento para  $x/L_0 \approx 1$ , este tipo de geometria também apresenta os

valores mais altos registados para os picos de  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ , com um aumento em cerca de 29,9% relativamente à geometria topo a topo, o que poderá comprometer a integridade dos adesivos mais rígidos.

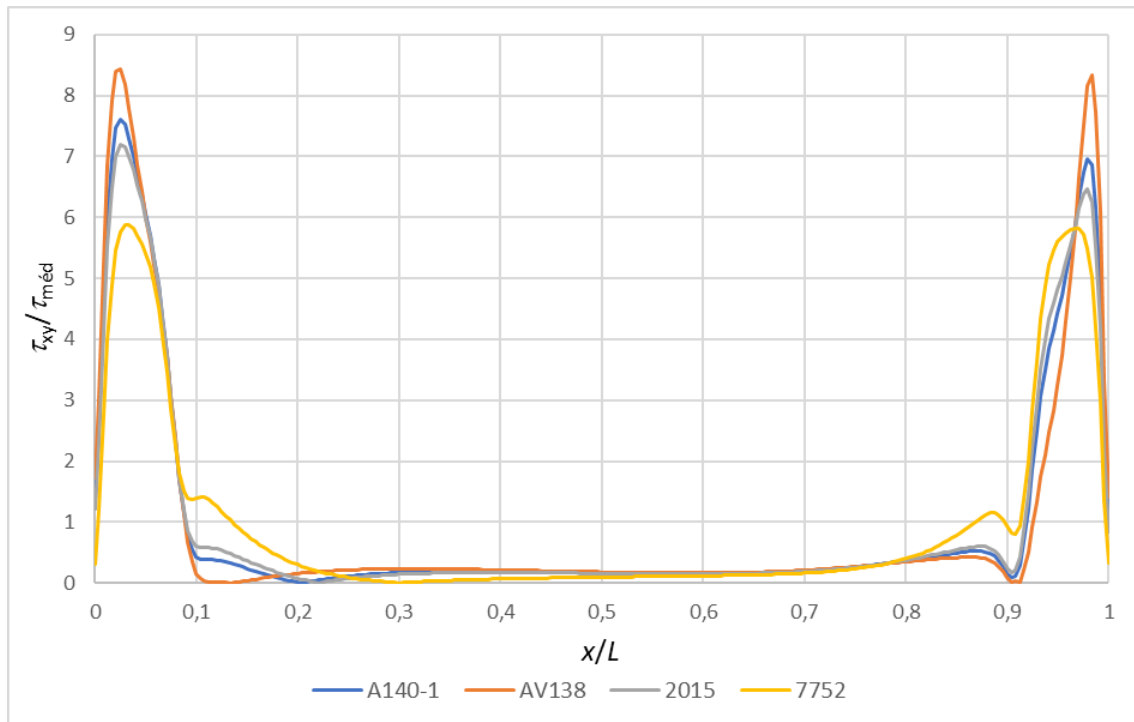


Figura 100 - Distribuição das tensões  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  para a geometria topo a topo em função do tipo de adesivo (esforço de compressão)

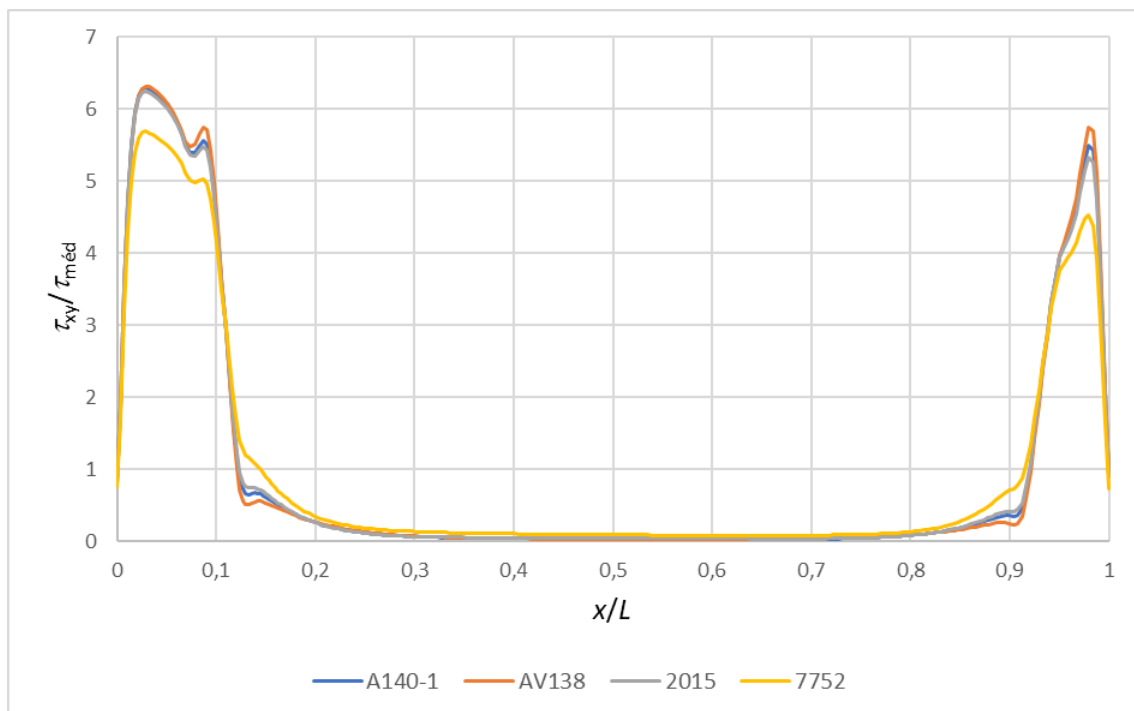


Figura 101 - Distribuição das tensões  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  para a geometria em chanfro 1 em função do tipo de adesivo (esforço de compressão)

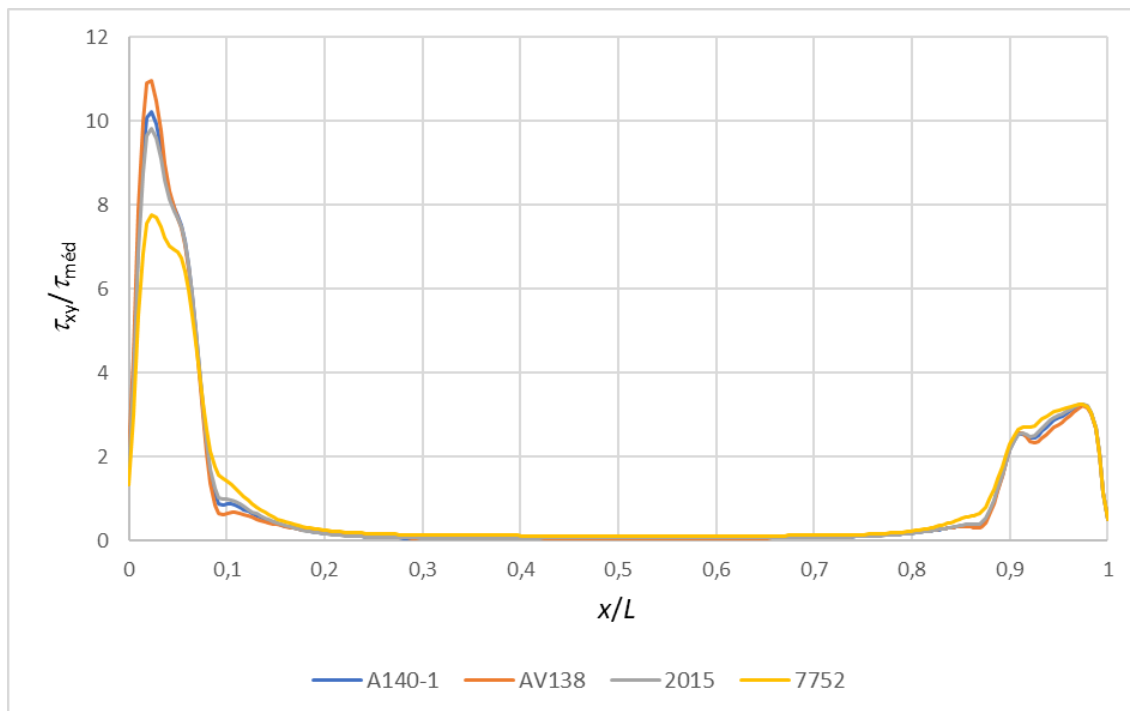


Figura 102 - Distribuição das tensões  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  para a geometria em chanfro 2 em função do tipo de adesivo (esforço de compressão)

### 3.5.7.2.2 Tensões de arrancamento

Na Figura 103, na Figura 104 e na Figura 105 estão representadas as diferentes distribuições das tensões  $\sigma_y/\tau_{méd}$  dos adesivos para as diferentes geometrias propostas. Da análise das figuras pode-se afirmar que a maior incidência de picos de tensão  $\sigma_y/\tau_{méd}$  ocorre nas extremidades do adesivo. Na geometria topo a topo a forma das curvas obtidas é mais uniforme comparativamente à das geometrias em chanfro, caso em que os picos de tensão ocorrem de forma mais acentuada, o que pode ser explicado pela inclinação da geometria. Na geometria topo a topo (Figura 103), à semelhança do que se sucedeu na Figura 97, para a geometria topo a topo pode-se retirar que a tendência de crescimento dos picos de tensão ocorre de forma decrescente de rigidez dos adesivos. Nesta geometria o adesivo Sikaforce® AV138 obteve um pico inferior em 6,4% ao adesivo X. Para a geometria em chanfro 1 (Figura 104) e geometria em chanfro 2 (Figura 105), o crescimento dos picos de tensão organiza-se pela rigidez do material. Nestas circunstâncias, o adesivo mais flexível obteve os menores valores de tensão de pico, inferior ao X em 2,5% na geometria em chanfro 1 (Figura 104) e em 18,4% na geometria em chanfro 2 (Figura 105).

Pela visualização das três geometrias retira-se que, nestas condições de esforço, as duas geometrias em chanfro apresentam valores significativamente inferiores para os picos de tensão  $\sigma_y/\tau_{méd}$  comparativamente à geometria topo a topo. No caso da geometria em chanfro 1 (Figura 104) o valor do pico máximo decresce 97,3%, já para a geometria em chanfro 2 (Figura 105) este valor decresce em 94,1%.

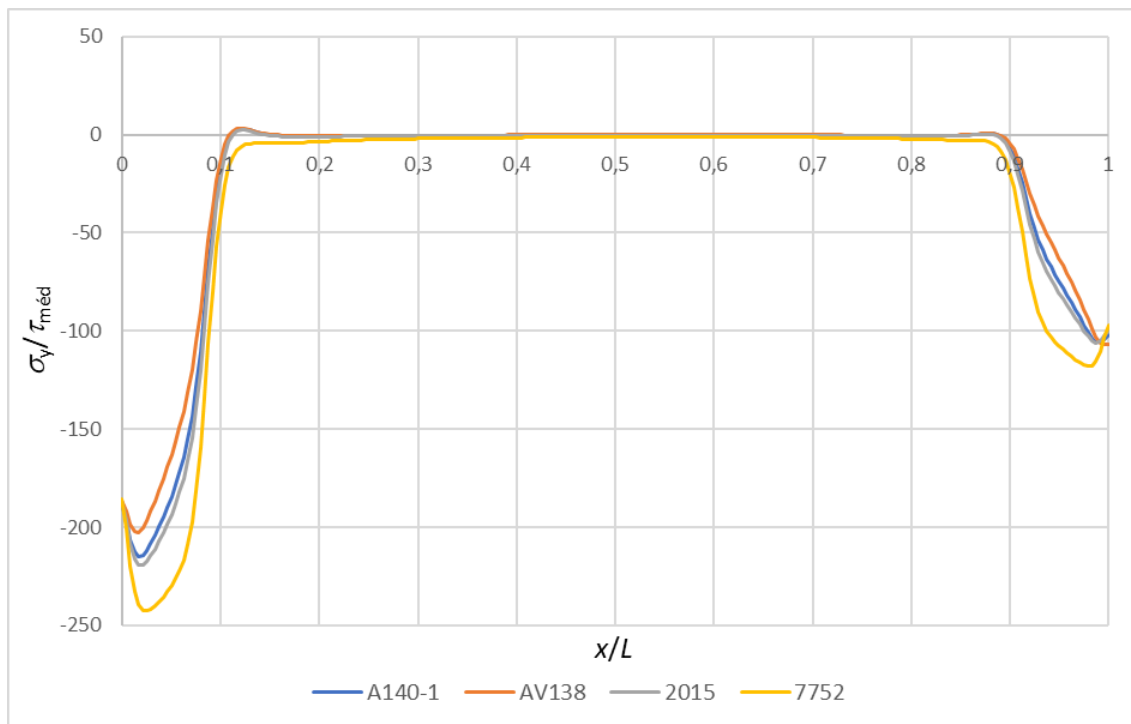


Figura 103 - Distribuição das tensões  $\sigma_y/\tau_{méd}$  para a geometria topo a topo em função do tipo de adesivo (esforço de compressão)

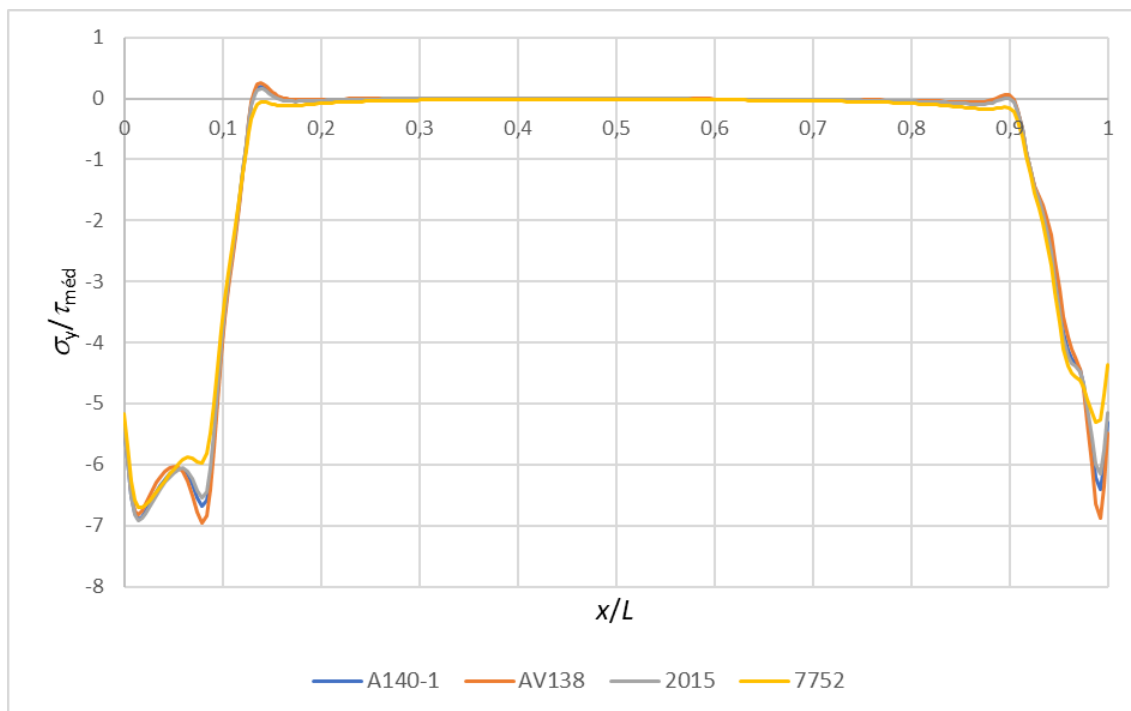


Figura 104 - Distribuição das tensões  $\sigma_y/\tau_{méd}$  para a geometria em chanfro 1 em função do tipo de adesivo (esforço de compressão)

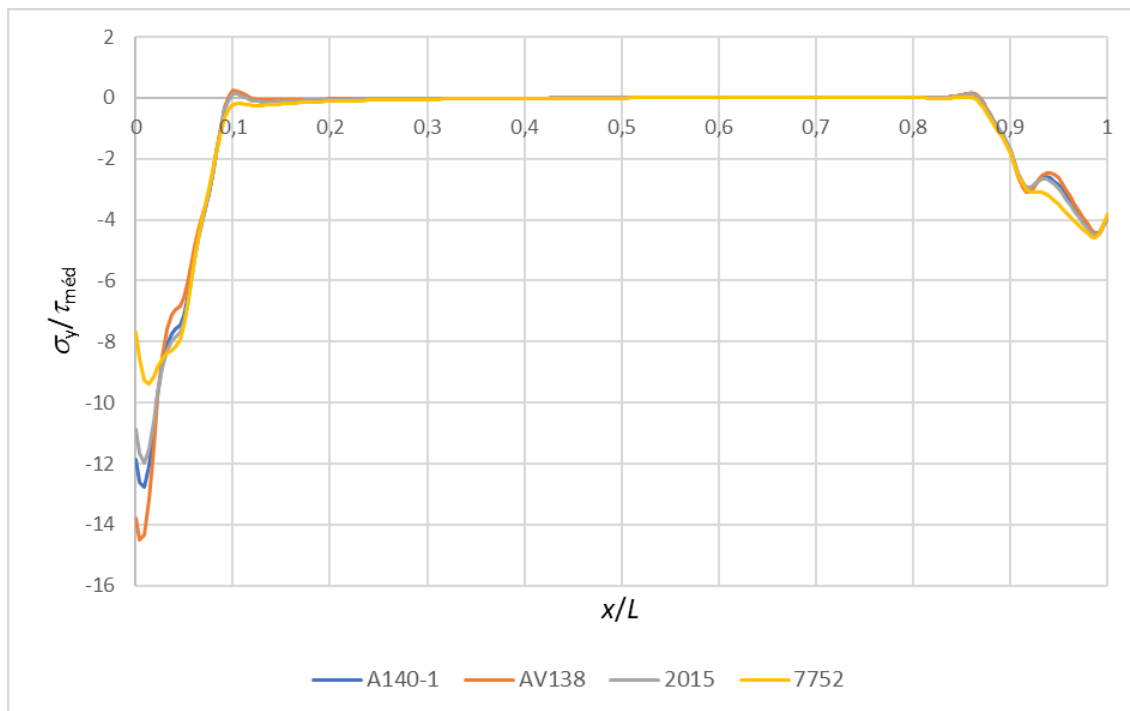


Figura 105 - Distribuição das tensões  $\sigma_y/\tau_{méd}$  para a geometria em chanfro 2 em função do tipo de adesivo (esforço de compressão)

### 3.5.7.3 Esforço de flexão

#### 3.5.7.3.1 Tensões de corte

A distribuição das tensões de  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  para esforços de flexão pode ser consultada na Figura 106 para a geometria topo a topo, na Figura 107 para a geometria em chanfro 1 e na Figura 108 para a geometria em chanfro 2. No que diz respeito à geometria topo a topo (Figura 106) verifica-se a existência de tensões de corte ao longo de toda a junta adesiva, com maior incidência nas extremidades. Para  $x/L_0 \approx (0 \text{ e } 0,1)$  e  $x/L_0 \approx (0,9 \text{ e } 1)$ , os picos de tensão obtidos crescem com base na rigidez de cada adesivo. Na zona central do adesivo verifica-se o oposto, visto que a zona central representa também um material mais flexível que é o núcleo das estruturas *sandwich*. Pela visualização da geometria em chanfro 1 (Figura 107) pode-se verificar o aparecimento de picos de tensão apenas para uma das extremidades da junta adesiva, apesar de parecer benéfico que só exista este aparecimento numa extremidade da junta adesiva. Neste caso, os valores obtidos para os picos de tensão são os mais altos, o que se torna prejudicial para a integridade dos adesivos, especialmente os mais rígidos. Já na geometria em chanfro 2 (Figura 108), para este tipo de chanfro verifica-se a existência de picos de tensão em ambas as extremidades do adesivo, que crescem com base na rigidez dos adesivos. Resumidamente, a geometria topo a topo consegue atingir os menores valores para os picos de tensão máximos, enquanto para a geometria em chanfro 1 (Figura 107) ocorre

um aumento aproximado de 428% e para a geometria em chanfro 2 (Figura 108) acontece um aumento de 94,1%.

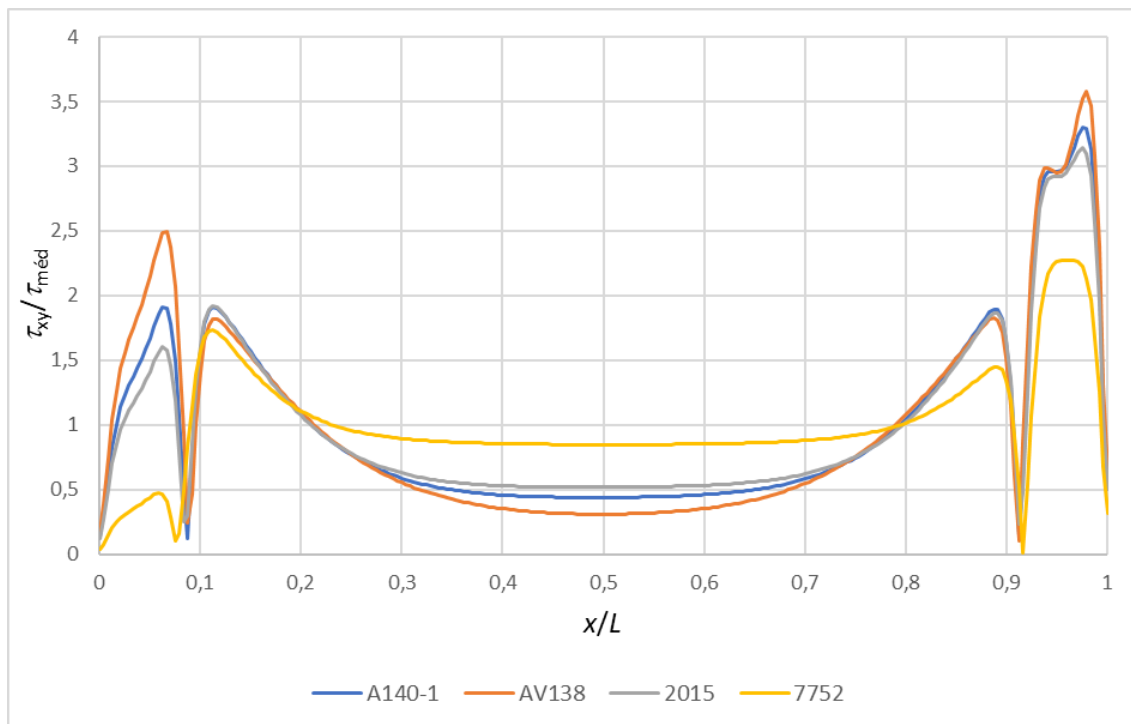


Figura 106 - Distribuição das tensões  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  para a geometria topo a topo em função do tipo de adesivo (esforço de flexão)

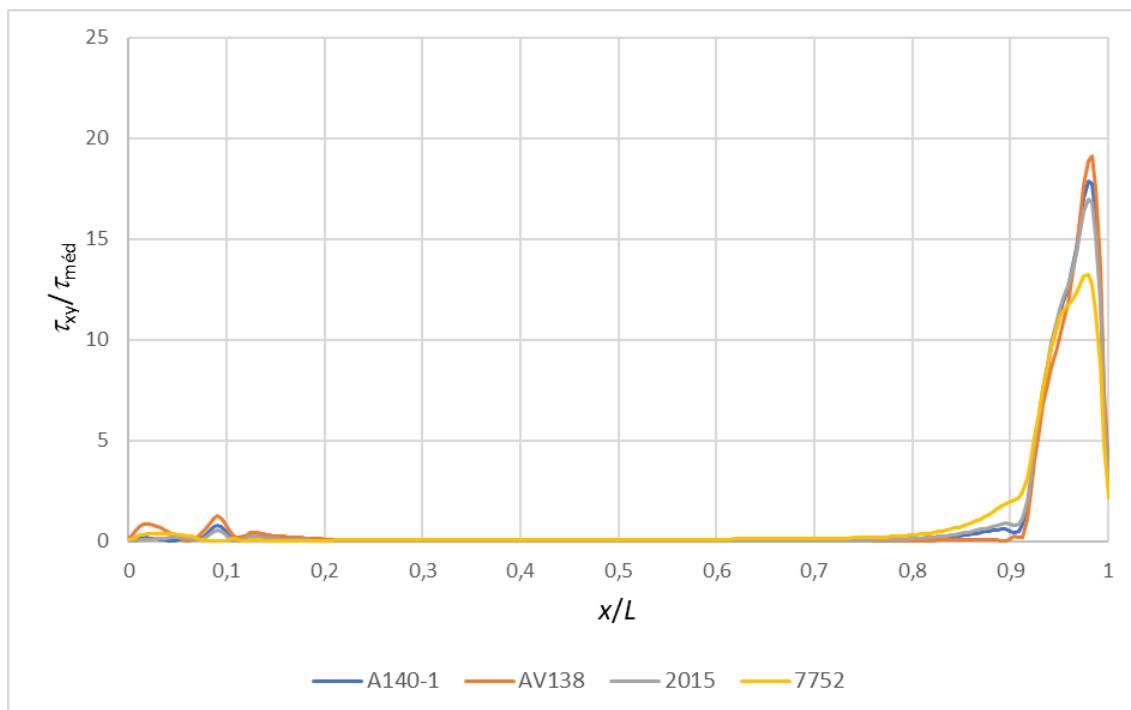


Figura 107 - Distribuição das tensões  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  para a geometria em chanfro 1 em função do tipo de adesivo (esforço de flexão)

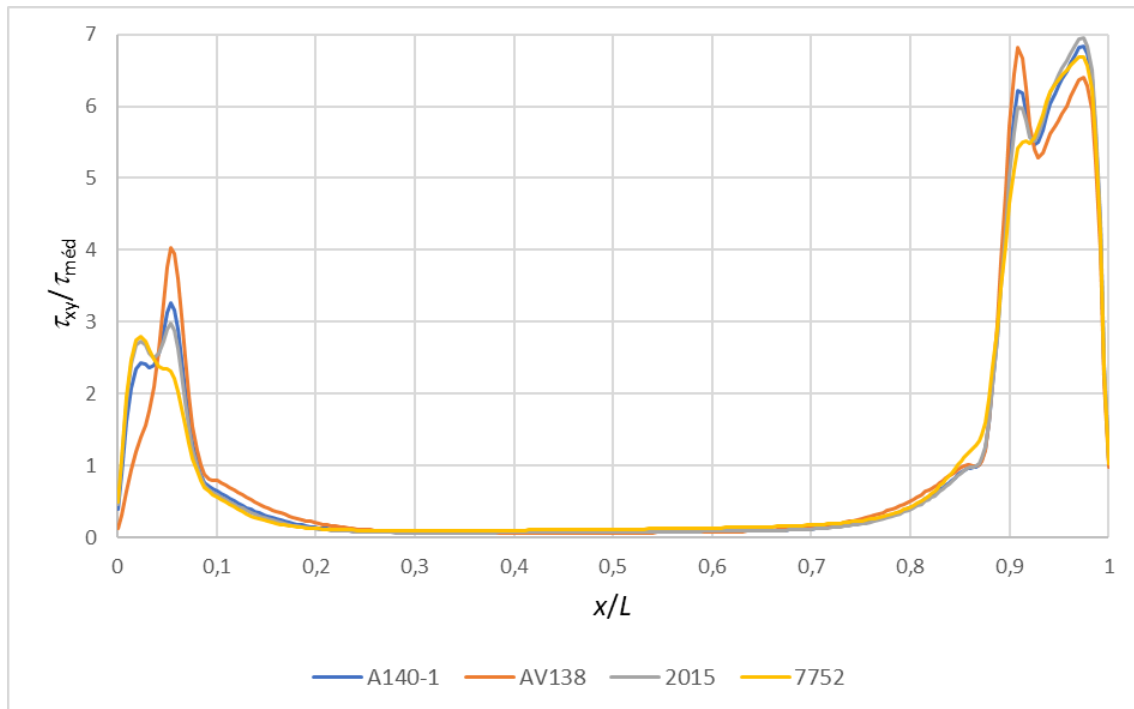


Figura 108 - Distribuição das tensões  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  para a geometria em chanfro 2 em função do tipo de adesivo (esforço de flexão)

### 3.5.7.3.2 Tensões de arrancamento

A distribuição das tensões  $\sigma_y/\tau_{méd}$  dos adesivos para esforços de flexão pode ser consultada na Figura 109 para a geometria topo a topo, na Figura 110 para a geometria em chanfro 1 e na Figura 111 para a geometria em chanfro 2. A Figura 109 mostra que a geometria topo a topo acumula maior tensão nas extremidades do adesivo, e que em  $x/L_0 \approx 1$  ocorre um aumento considerável destes valores comparativamente à outra extremidade, o que pode ser justificado pela própria curvatura da embarcação, e por esta ser a zona de concentração do esforço. Nesta geometria os materiais mais rígidos são os que atingem os menores picos de tensão máxima. O adesivo X é o segundo a atingir os menores valores de pico, apenas acima do adesivo Sikaforce® AV138, que consegue atingir um valor inferior em 16,1% ao anterior.

Na geometria em chanfro 1 (Figura 110), ainda se verifica a existência de picos de tensão, tanto à tração na extremidade esquerda como à compressão na extremidade direita. No caso do segundo tipo de geometria em chanfro (Figura 111), é possível visualizar que existem três picos de tensão de arrancamento para cada adesivo nas extremidades da junta adesiva. Na extremidade esquerda ocorrem dois, um à tração e outro à compressão, e na margem direita um à compressão. Estas geometrias conseguem aliviar melhor o esforço sentido, já que o valor máximo de tensão  $\sigma_y/\tau_{méd}$  decresce 21,5% no primeiro caso (Figura 110) e 73,4% no segundo caso (Figura 111).

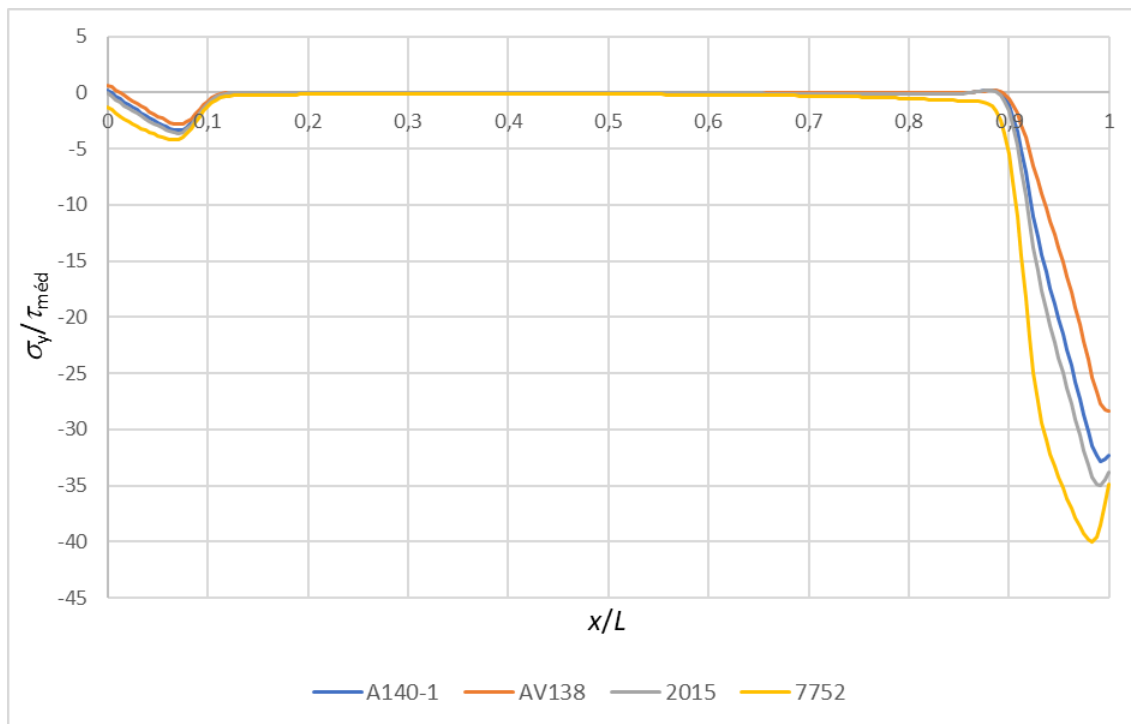


Figura 109 - Distribuição das tensões  $\sigma_y/\tau_{méd}$  para a geometria topo a topo em função do tipo de adesivo (esforço de flexão)

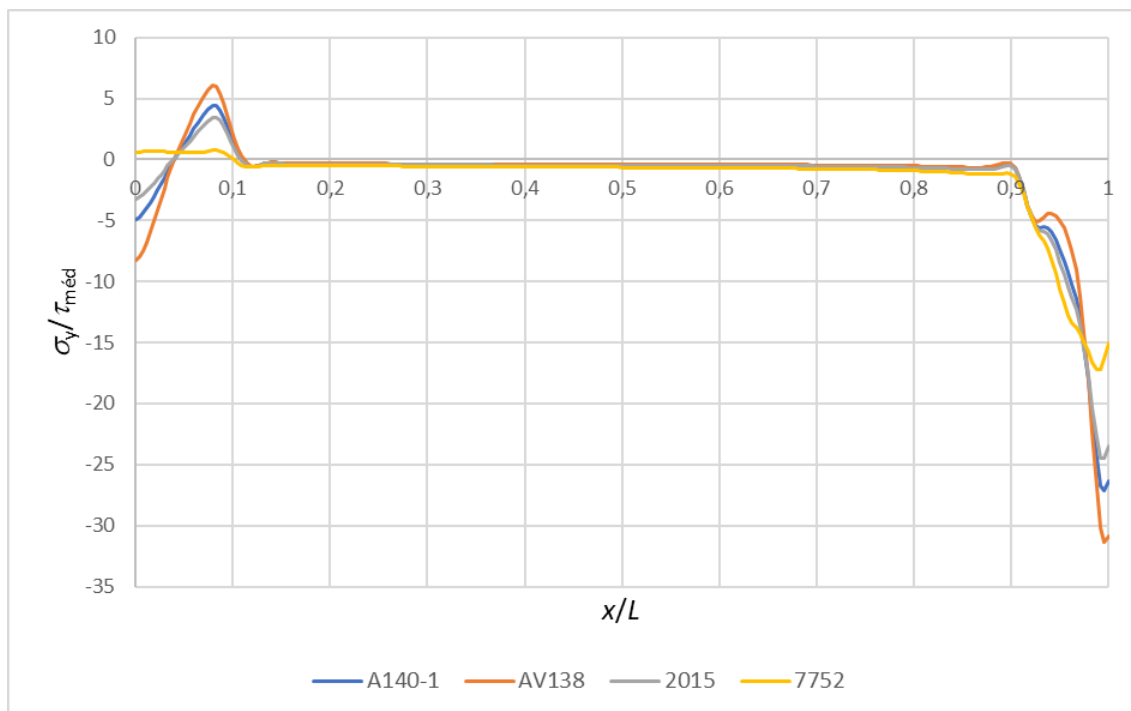


Figura 110 - Distribuição das tensões  $\sigma_y/\tau_{méd}$  para a geometria em chanfro 1 em função do tipo de adesivo (esforço de flexão)

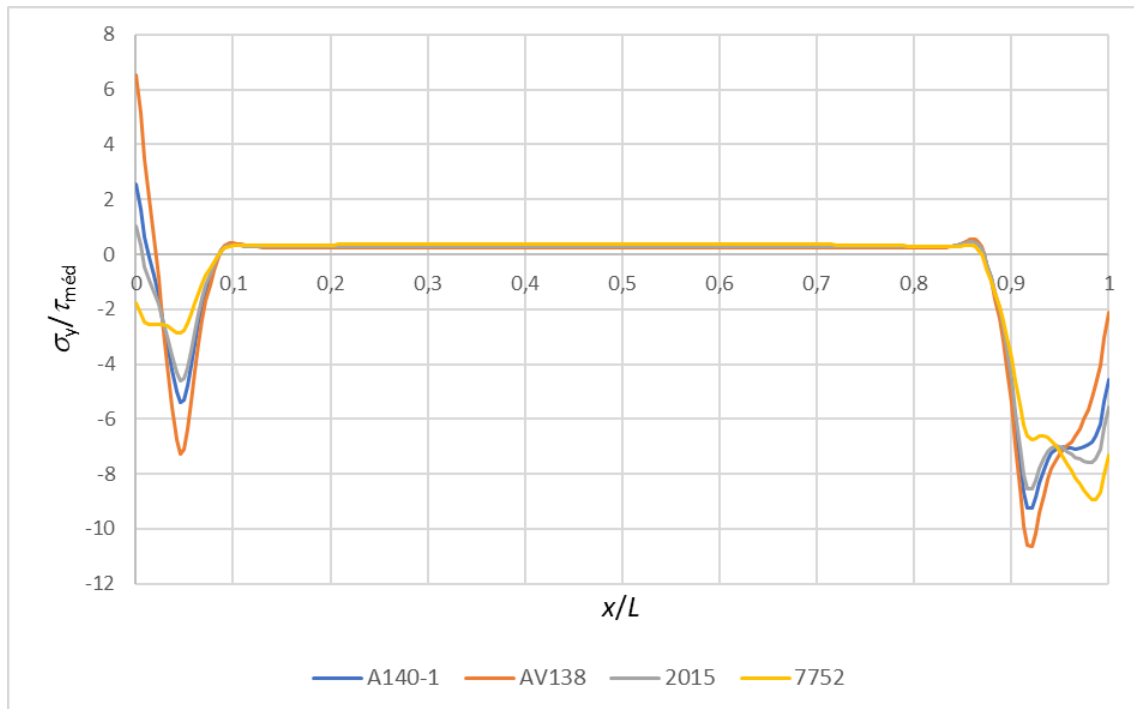


Figura 111 - Distribuição das tensões  $\sigma_y/\tau_{méd}$  para a geometria em chanfro 2 em função do tipo de adesivo (esforço de flexão)

### 3.5.7.4 Esforço de corte

#### 3.5.7.4.1 Tensões de corte

Na Figura 112, na Figura 113 e na Figura 114 são apresentados os gráficos referentes à distribuição das tensões de  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  dos adesivos para as diferentes geometrias propostas quando submetidas a esforço de corte. Visualizando a geometria topo a topo (Figura 112) averigua-se a existência de tensões nos adesivos durante todo o intervalo  $0 \leq x/L \leq 1$ . Nesta geometria, para cada adesivo são verificados quatro picos de tensão, os mais próximos das extremidades organizados pela rigidez do adesivo e os dois mais interiores organizam-se de uma forma um pouco diferente, que pode ser justificada pelo aparecimento de um material mais flexível em contacto com o adesivo, neste caso o núcleo em PVC. Para as geometrias em chanfro, a forma das curvas é semelhante entre os dois tipos, apenas se confirma a existência de picos de tensão mais próximos das extremidades e inexistência de tensão na zona central do adesivo. Nestas circunstâncias consegue-se entender que a distribuição de curvas encontradas nas duas figuras é quase um espelho da outra, no entanto para a geometria em chanfro 1 (Figura 113) o valor máximo é atingido pelo adesivo mais flexível, enquanto na geometria em chanfro 2 (Figura 114) o valor máximo para o pico de tensão é atingido pelo adesivo mais rígido. Apesar da existência de tensões  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  ao longo de toda a junta adesiva na geometria topo a topo, os valores são consideravelmente menores aos verificados nas outras geometrias. Relativamente à geometria em chanfro 1 (Figura 113) ocorre um

crescimento em 190% do valor máximo atingido e na geometria em chanfro 2 (Figura 114 )um aumento aproximado de 206%, comparativamente aos valores obtidos na geometria topo a topo (Figura 112).

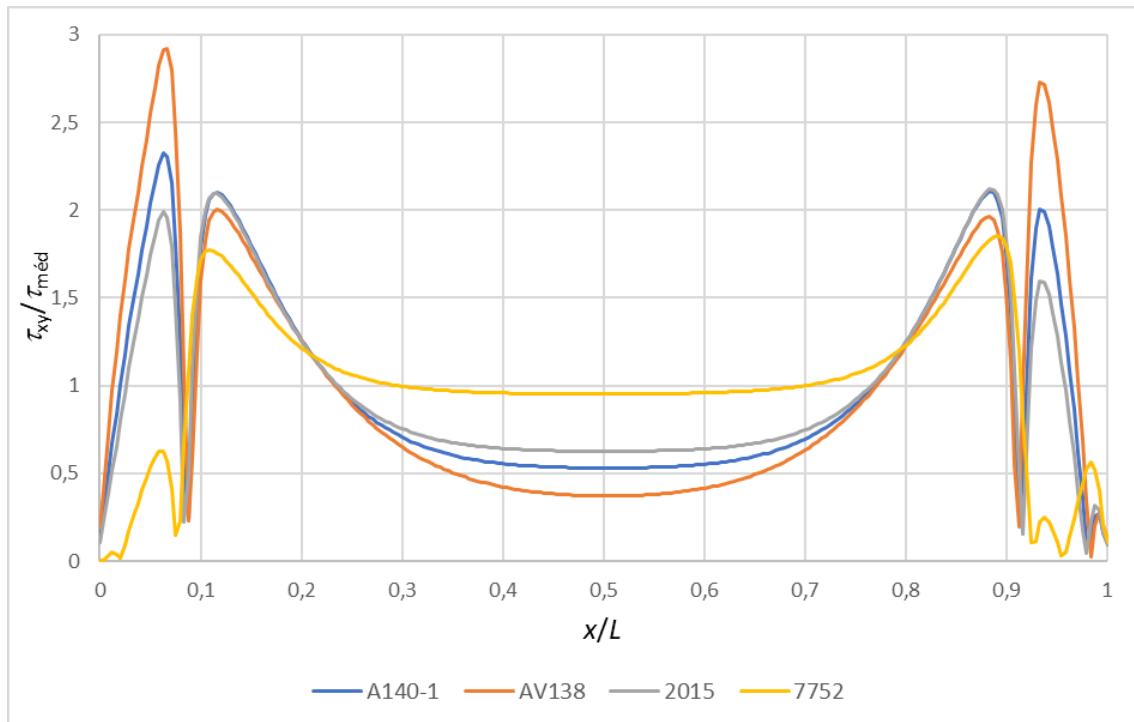


Figura 112 - Distribuição das tensões  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  para a geometria topo a topo em função do tipo de adesivo (esforço de corte)

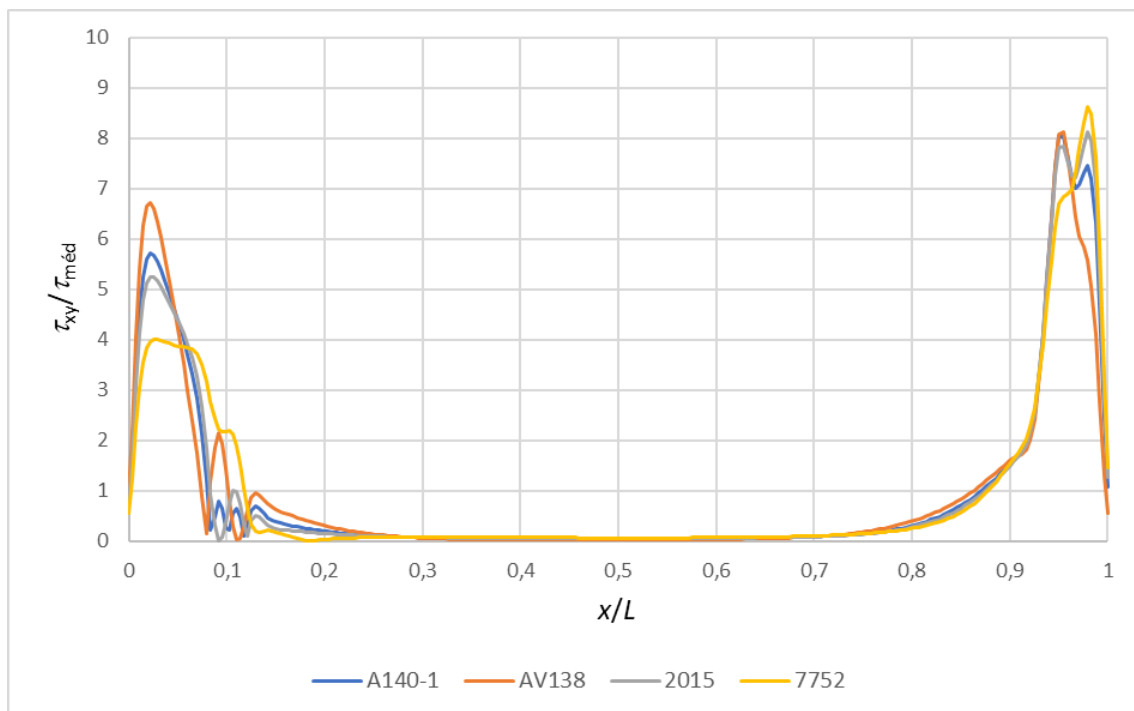


Figura 113 - Distribuição das tensões  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  para a geometria em chanfro 1 em função do tipo de adesivo (esforço de corte)

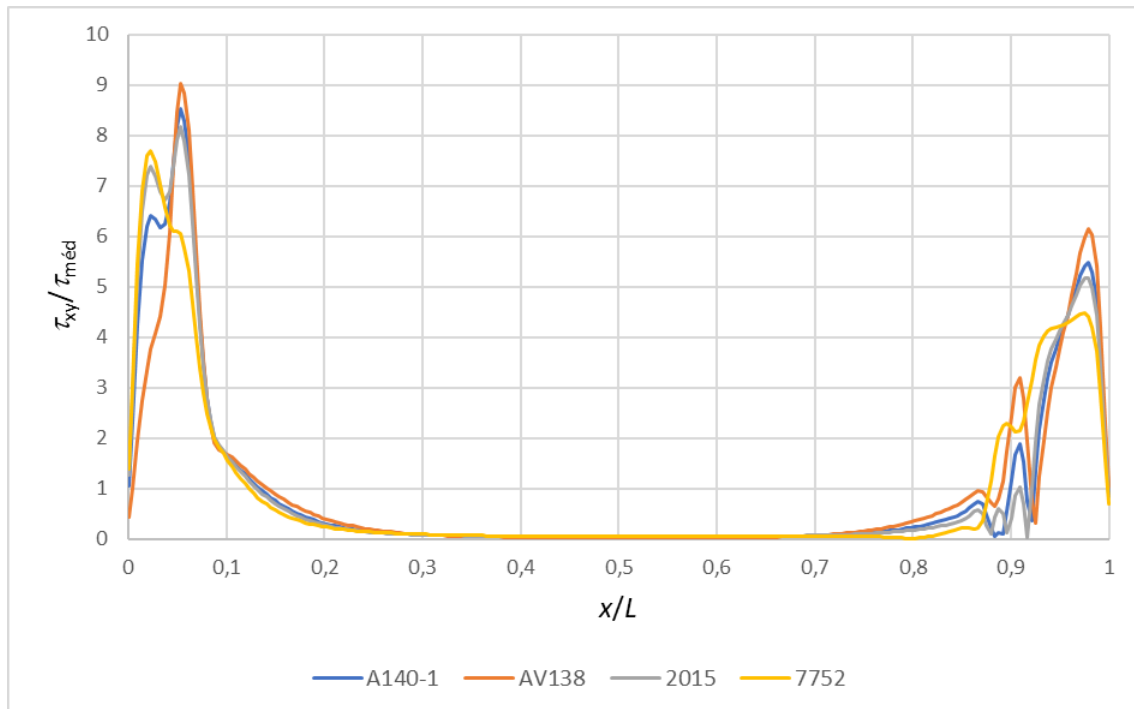


Figura 114 - Distribuição das tensões  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  para a geometria em chanfro 2 em função do tipo de adesivo (esforço de corte)

#### 3.5.7.4.2 Tensões de arrancamento

A distribuição das tensões de arrancamento normalizadas dos adesivos para esforços de corte pode ser consultada na Figura 115 para a geometria topo a topo, na Figura 116 para a geometria em chanfro 1 e na Figura 117 para a geometria em chanfro 2. O esforço de corte na geometria topo a topo (Figura 115) produz o aparecimento de picos de tensão nas zonas exteriores do adesivo, em  $x/L_0 \approx 0$  e  $x/L_0 \approx 1$ . É possível observar que existem picos de tensão com diferentes características, um à compressão na extremidade esquerda e outro à tração na extremidade direita do adesivo. Relativamente à organização dos picos de tensão, o adesivo mais rígido e o adesivo mais dúctil atingem menores valores de pico de tensão relativamente aos outros dois adesivos. Quando se observa os dois tipos de geometria em chanfro, verifica-se que o comportamento entre os dois é quase o mesmo, com os mesmos valores máximos para os picos de tensão de arrancamento normalizada. No entanto, no primeiro tipo o valor máximo é negativo (Figura 116), já no segundo tipo o valor máximo é positivo (Figura 117). Em ambos os casos os valores vão crescendo na mesma ordem da rigidez do adesivo. Apenas no caso do adesivo Sikaforce® 7752 a distribuição de tensão é um pouco mais uniforme. Relativamente às tensões  $\sigma_y/\tau_{méd}$ , comprova-se um aumento do pico de tensão máximo obtido para as geometrias em chanfro relativamente à geometria topo a topo. Na geometria em chanfro 1 (Figura 116) ocorre um aumento aproximado de 99% e na geometria em chanfro 2 (Figura 117) um aumento de 102%, comparativamente à geometria topo a topo (Figura 115).

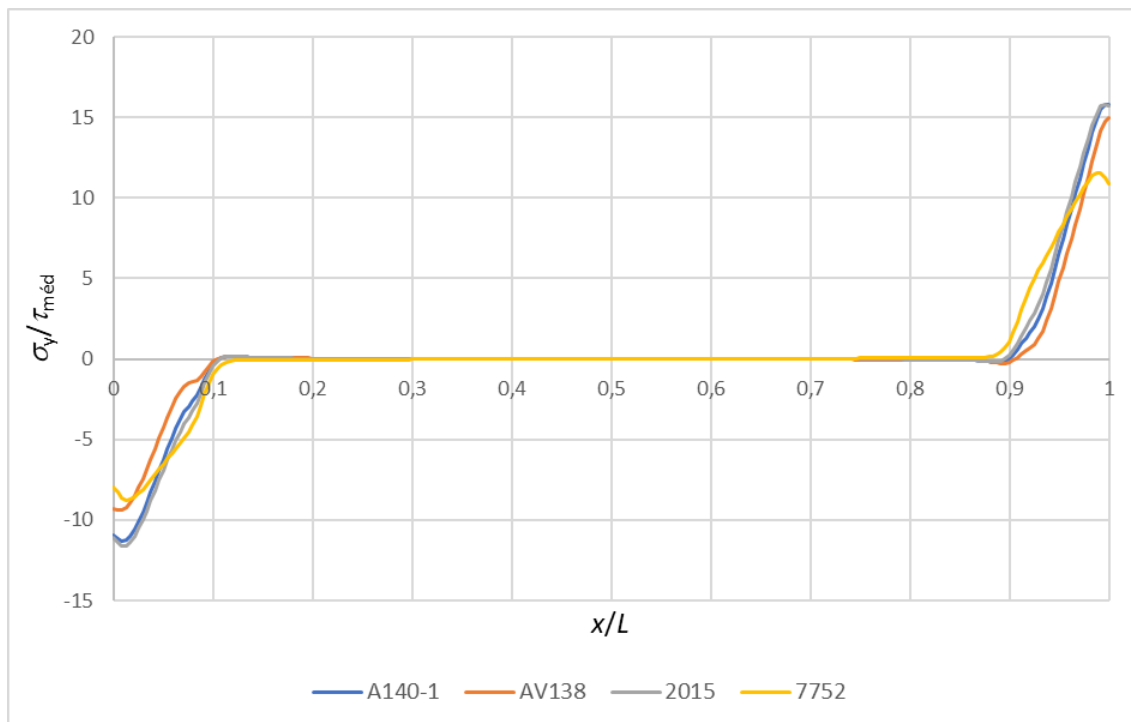


Figura 115 - Distribuição das tensões  $\sigma_y / \tau_{méd}$  para a geometria topo a topo em função do tipo de adesivo (esforço de corte)

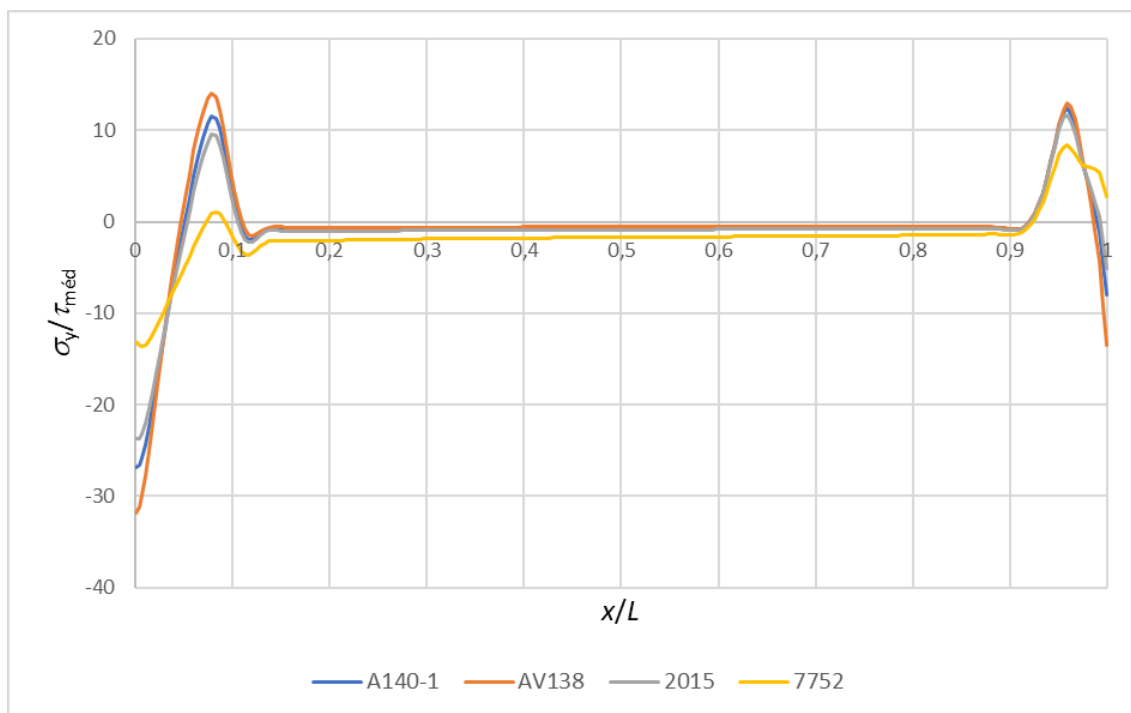


Figura 116 - Distribuição das tensões  $\sigma_y / \tau_{méd}$  para a geometria em chanfro 1 em função do tipo de adesivo (esforço de corte)

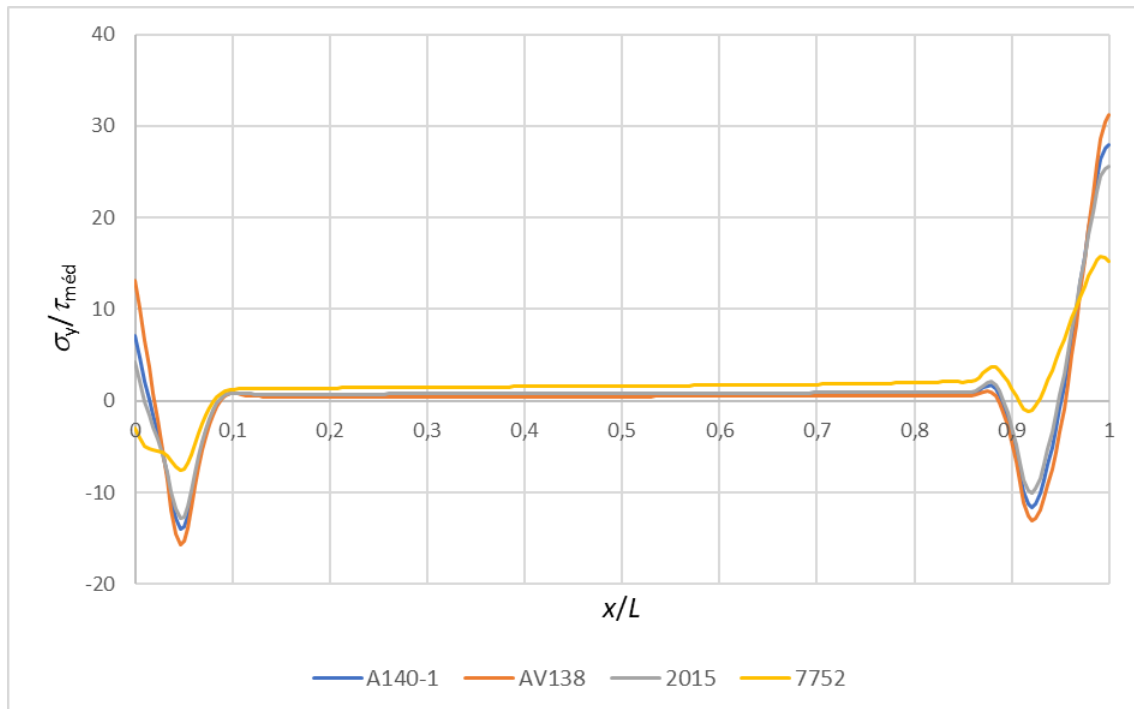


Figura 117 - Distribuição das tensões  $\sigma_y/\tau_{méd}$  para a geometria em chanfro 2 em função do tipo de adesivo (esforço de corte)

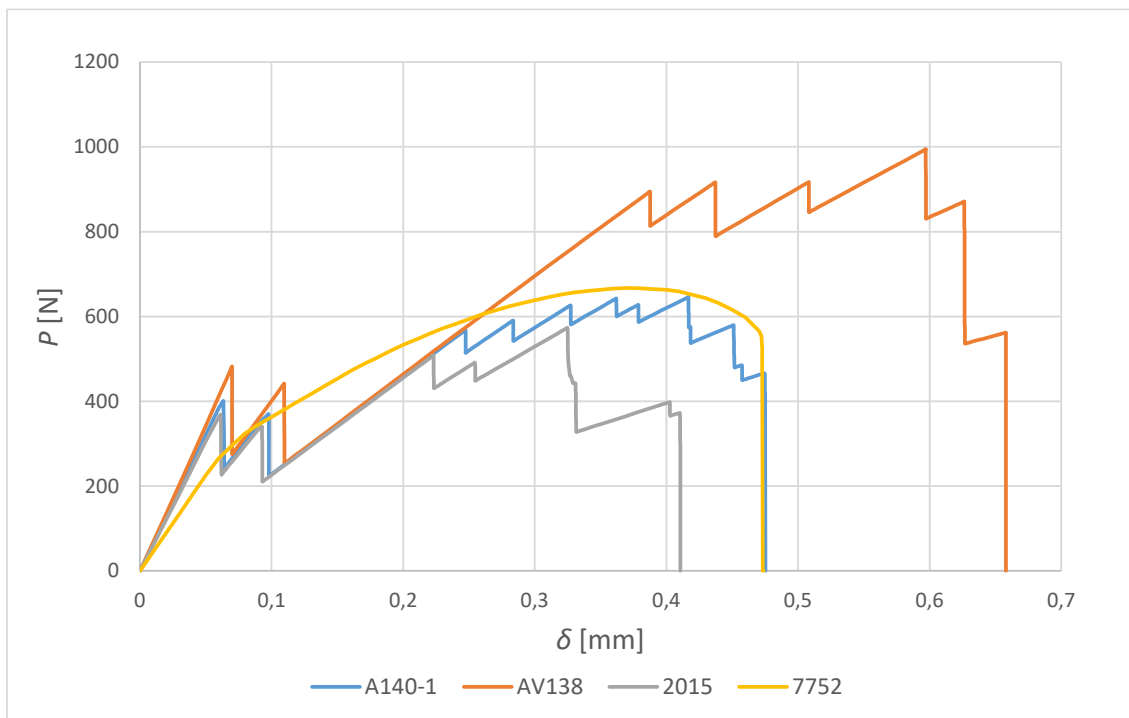
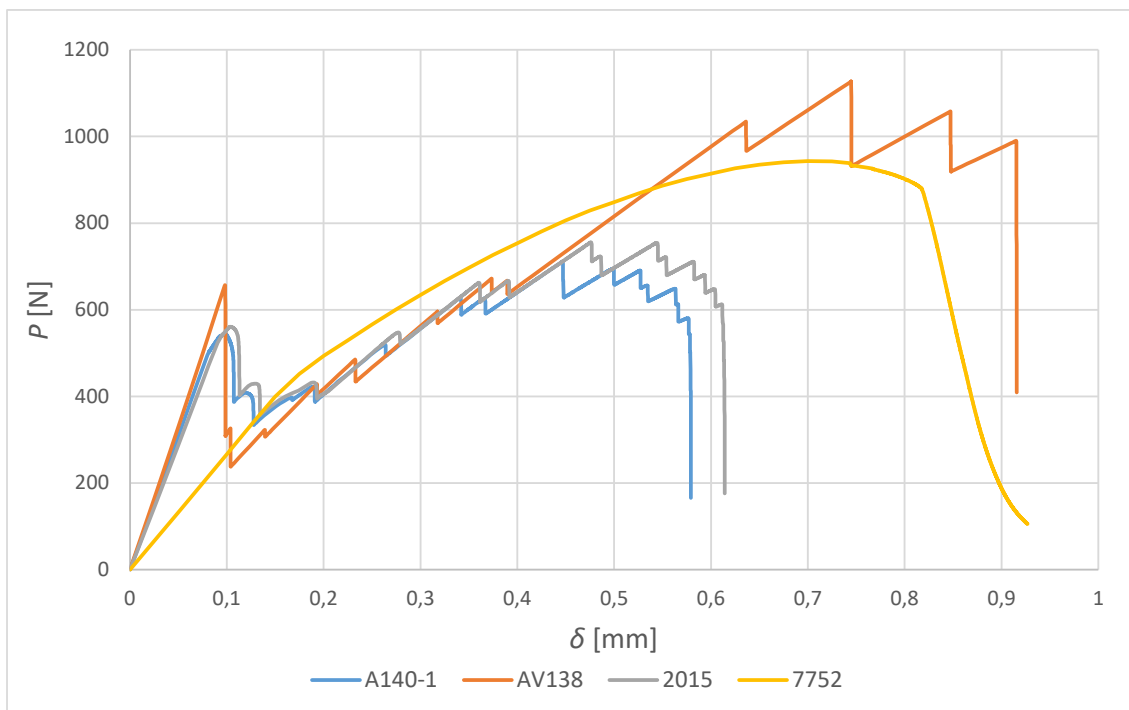
### 3.5.8 Resistência das juntas

Neste capítulo, são apresentadas as curvas  $P-\delta$  obtidas através da análise numérica para as diferentes geometrias e tipos de adesivos. As curvas são apresentadas e divididas pelos ensaios realizados, tração, compressão, flexão e corte. Também são apresentados os quadros que resumem as  $P_{máx}$ .

#### 3.5.8.1 Esforço de tração

Na Figura 118, Figura 119 e Figura 120 encontra-se representado o comportamento dos adesivos nas geometrias topo a topo, chanfro 1 e chanfro 2, respectivamente, quando submetidos a esforços de tração.

Pela análise da geometria topo a topo (Figura 118) é possível compreender, que numa fase inicial, o adesivo X, o adesivo Araldite® AV138 e o adesivo Araldite® 2015 apresentam um comportamento semelhante até ao deslocamento de 0,1 mm. Após esta fase, os seus comportamentos tendem a variar com base na resistência à tração que cada um tem. Por outro lado, a curva  $P-\delta$  para o adesivo Sikaforce® 7752 apresenta um crescimento mais uniforme comparativamente aos restantes adesivo ao longo do deslocamento aplicado, comportamento este que pode ser justificado pela alta ductilidade deste adesivo.

Figura 118 - Comparação entre curvas  $P$ - $\delta$  para esforços de tração na geometria topo a topoFigura 119 - Comparação entre curvas  $P$ - $\delta$  para esforços de tração na geometria em chanfro 1

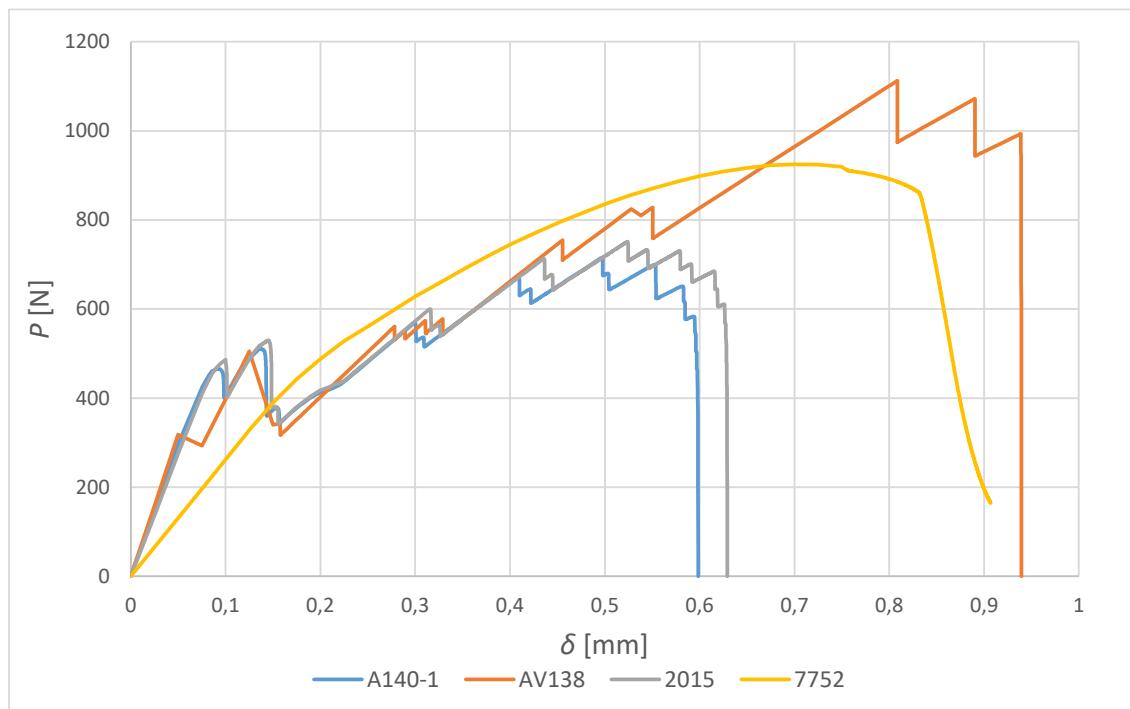


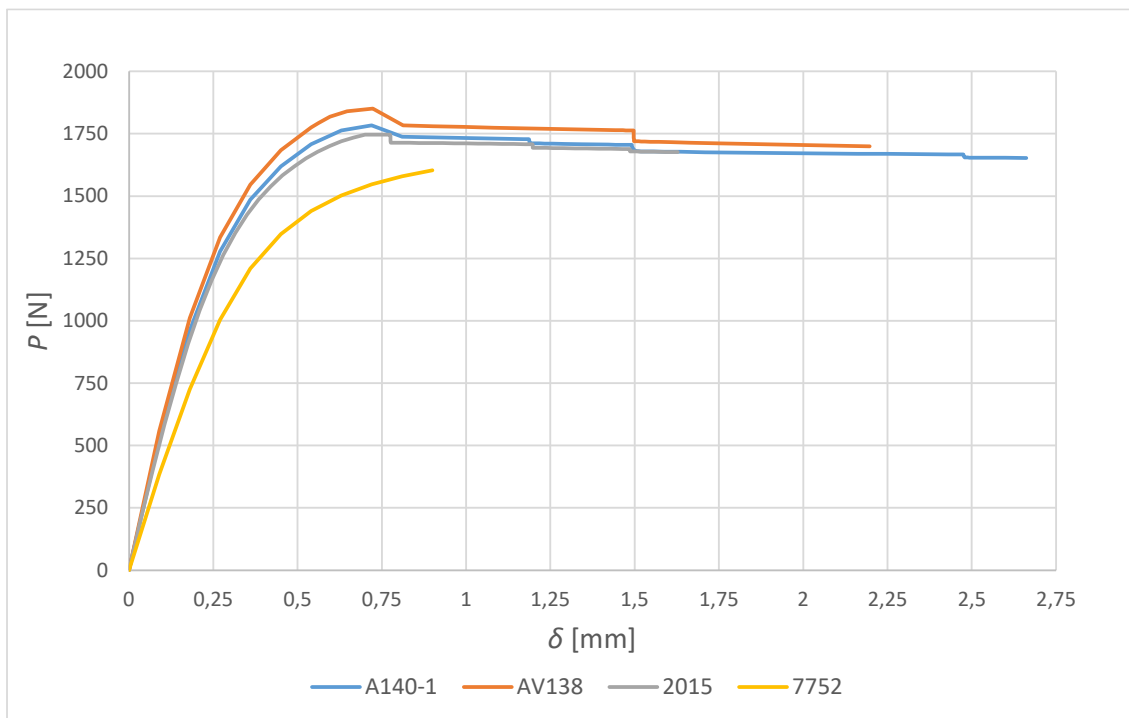
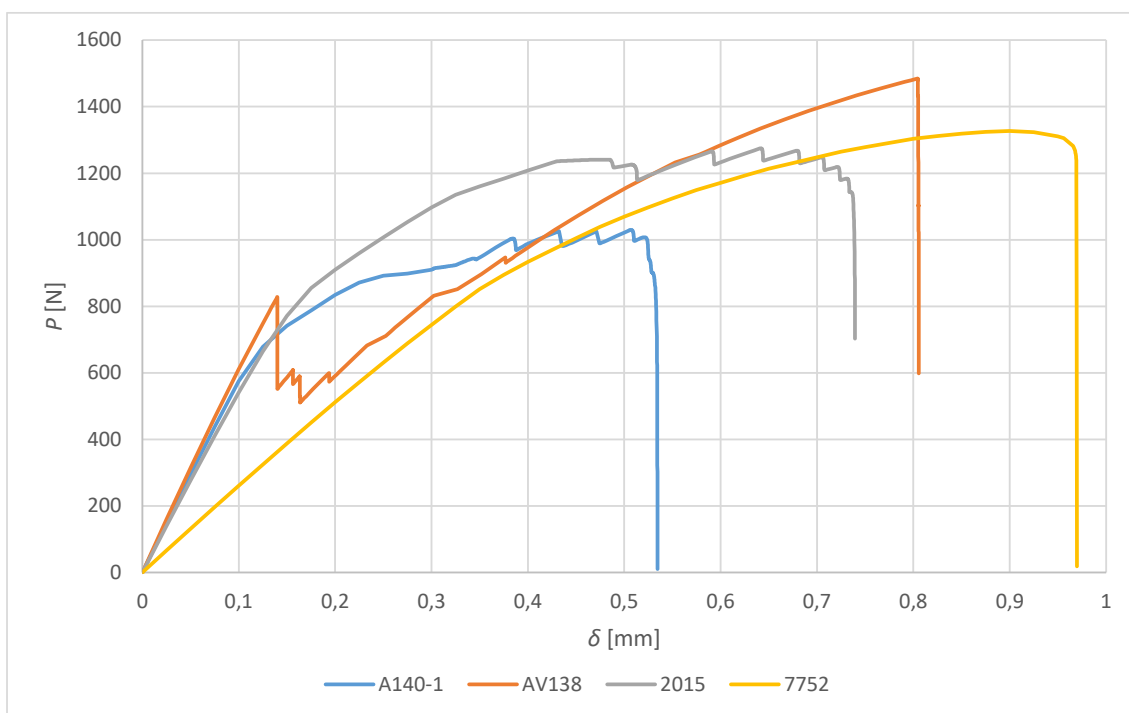
Figura 120 - Comparação entre curvas  $P$ - $\delta$  para esforços de tração na geometria em chanfro 2

Pela comparação das curvas da Figura 119 numa geometria em chanfro tipo 1, o adesivo atualmente usado (adesivo X) é o que apresenta a rotura mais prematura, ainda que nesta geometria apresente mais resistência comparativamente à geometria topo a topo. O efeito do adesivo Araldite® 2015 é muito semelhante a este anterior, mas pode-se verificar que apresenta ligeiramente um melhor  $P_{\text{máx}}$ . Os outros dois adesivos empregues foram destacadamente melhores, ainda que o adesivo Araldite® AV138 consiga apresentar ainda melhor resistência do que o adesivo Sikaforce® 7752.

Por fim, na geometria em chanfro 2 (Figura 120) é visível que o comportamento de todas as curvas  $P$ - $\delta$  dos adesivos é muito semelhante ao que se desenrolou na geometria em chanfro 1 (Figura 119). A diferença mais notória nesta geometria é que se conseguiu aplicar um pouco mais de deslocamento aos adesivos tracionados até à rotura da junta.

### 3.5.8.2 Esforço de compressão

Na Figura 121, na Figura 122 e na Figura 123, encontra-se representado o comportamento dos adesivos nas geometrias topo a topo, chanfro 1 e chanfro 2, respetivamente, quando submetidas a esforços de compressão.

Figura 121 - Comparação entre curvas  $P$ - $\delta$  para esforços de compressão na geometria topo a topoFigura 122 - Comparação entre curvas  $P$ - $\delta$  para esforços de compressão na geometria em chanfro 1

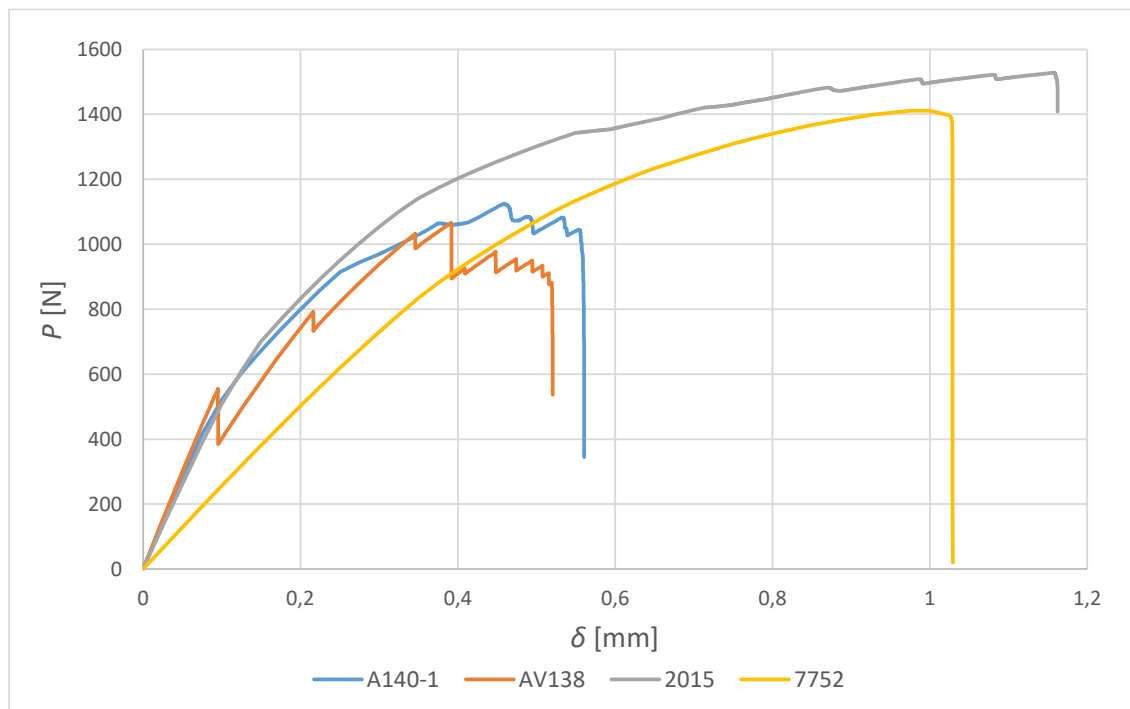


Figura 123 - Comparação entre curvas  $P$ - $\delta$  para esforços de compressão na geometria em chanfro 2

Pela análise da geometria topo a topo (Figura 121) é possível verificar que, apesar de os adesivos apresentarem desempenhos semelhantes, o adesivo Araldite® AV138 é o que possui melhor resistência à compressão. Através da figura também é possível observar a continuidade das curvaturas dos diferentes adesivos ao longo do carregamento, o que evidencia que a geometria influencia em grande parte este comportamento. Na geometria topo a topo (Figura 121) as curvas dos adesivos foram interrompidas no ponto onde se inicia a interseção entre substratos resultante do esforço de compressão, de forma a não influenciarem os resultados.

Na geometria em chanfro 1 (Figura 122) é possível visualizar que o adesivo X apresenta o pior comportamento, uma vez que é o primeiro a atingir a rotura. Ainda que o adesivo Araldite® AV138 atinja a maior força, a sua rotura ocorre para um deslocamento inferior comparativamente ao do adesivo Sikaforce® 7752. O ponto de rotura deste adesivo foi notavelmente superior aos outros adesivos, o que pode ser justificado pela sua elevada ductilidade.

Já na geometria em chanfro 2 (Figura 123), apesar da geometria ser igualmente em chanfro, os resultados foram surpreendentemente diferentes da geometria em chanfro do tipo 1. O adesivo Araldite® AV138 foi o que atingiu o menor pico de força e o primeiro a atingir a rotura. O adesivo X, ainda que atinja a rotura para um deslocamento ligeiramente superior ao da geometria em chanfro do tipo 1, pode-se considerar não adequado para aplicações em geometrias deste tipo quando o foco são esforços de compressão. A principal diferença surge com o adesivo Araldite® 2015, que, nestas condições de geometria, é o que permite obter a melhor resistência da junta.

### 3.5.8.3 Esforço de flexão

Na Figura 124, na Figura 125 e na Figura 126 encontra-se representado o comportamento dos adesivos nas geometrias topo a topo, chanfro 1 e chanfro 2, respectivamente, quando as juntas são submetidas a esforços de flexão.

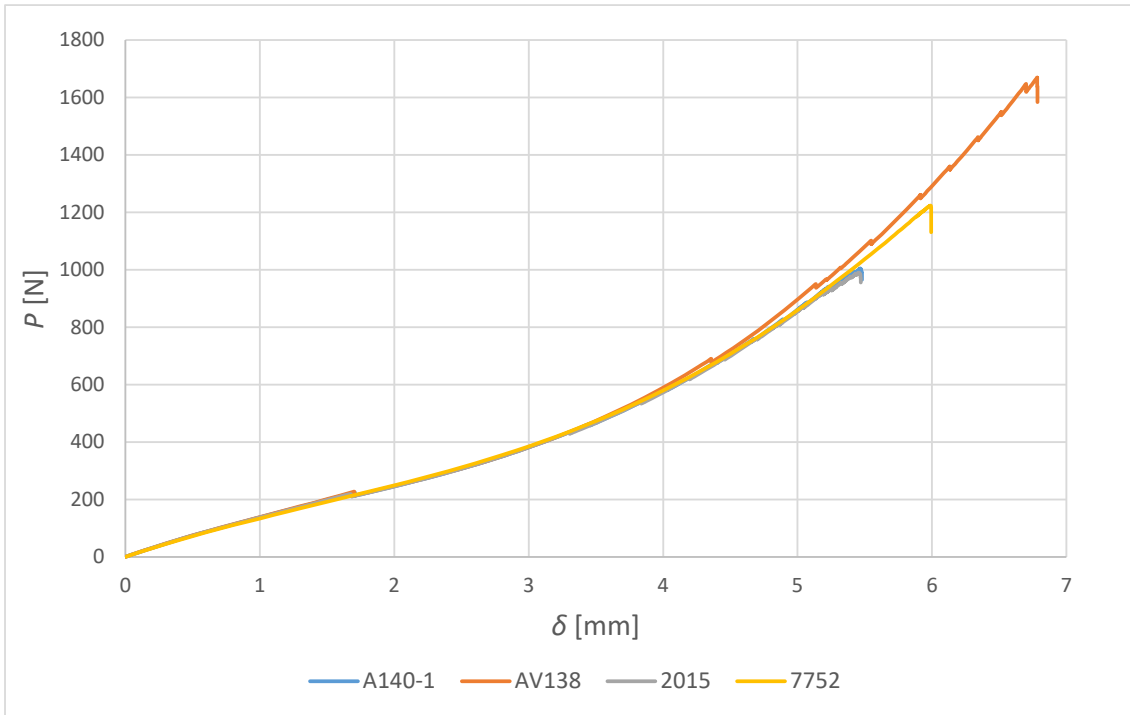


Figura 124 - Comparação entre curvas  $P$ - $\delta$  para esforços de flexão na geometria atual

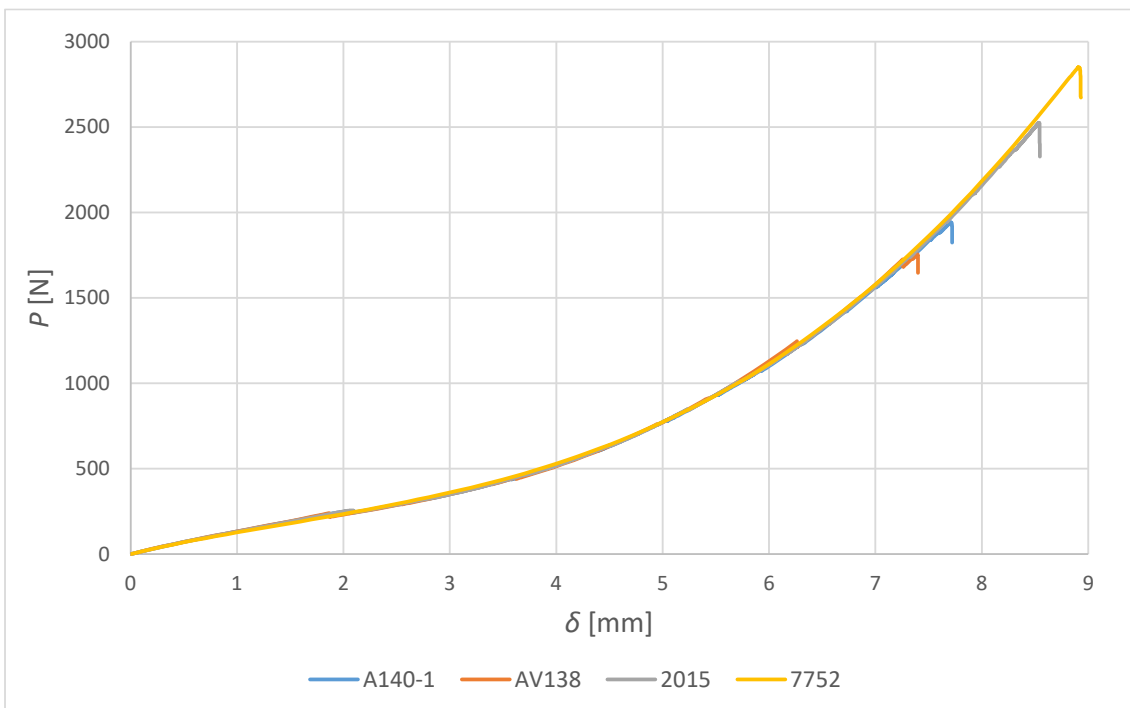


Figura 125 - Comparação entre curvas  $P$ - $\delta$  para esforços de flexão na geometria em chanfro 1

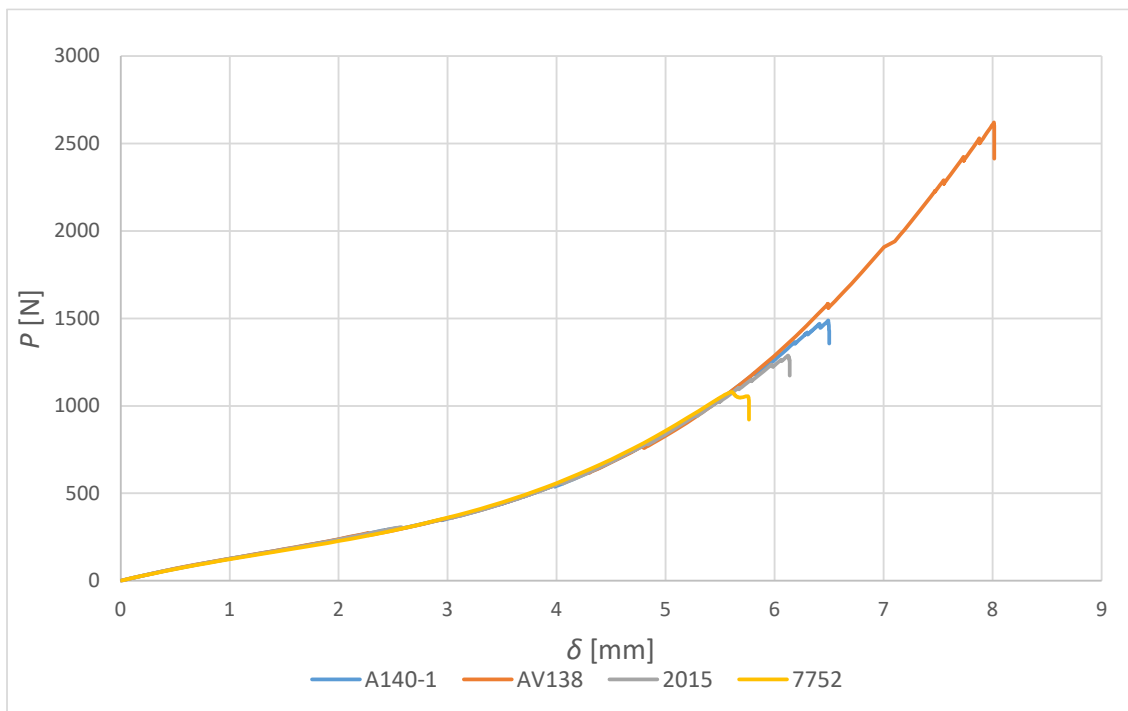


Figura 126 - Comparação entre curvas  $P$ - $\delta$  para esforços de flexão na geometria em chanfro 2

Na geometria topo a topo (Figura 124), os adesivos tiveram comportamentos semelhantes perante o esforço aplicado. É possível verificar que a rotura do adesivo X e adesivo Araldite® 2015 acontecem aproximadamente para o mesmo deslocamento. A elevada ductilidade do adesivo Sikaforce® 7752 contribui para que este fosse o penúltimo a atingir a rotura. Nesta geometria, o adesivo Araldite® AV138 é o que garante a melhor resistência para a junta adesiva e deslocamento.

Pela geometria em chanfro 1 (Figura 125) é possível verificar que todos os adesivos tiveram um comportamento semelhante até à sua rotura. Neste tipo de geometria o adesivo atualmente empregue no fabrico das embarcações não o mais adequado. A elevada tenacidade ao corte que os adesivos Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015 possuem permitiu-lhes ter o melhor comportamento nesta geometria ao esforço aplicado, ainda que os valores de resistência e deslocamento sejam um pouco melhores para o adesivo Sikaforce® 7752.

No segundo tipo de geometria em chanfro, o comportamento inverteu-se relativamente à geometria em chanfro anterior. Pela análise da Figura 126 é possível verificar que apenas um adesivo conseguiu ultrapassar a resistência de 1500 N, ficando aquém do que seria esperado. Enquanto os três primeiros adesivos atingem a rotura para um deslocamento aproximado entre 5,7 mm e 6,5 mm e valores de resistência não superam os 1500 N. O adesivo Araldite® AV138 pode ser declarado o melhor a ser aplicado quando este tipo de geometria está a ser submetido a esforços de flexão, uma vez que atingiu só atingiu a rotura para um deslocamento aproximado de 8 mm e apresenta uma resistência superior a 2500 N.

### 3.5.8.4 Esforço de corte

Na Figura 127, na Figura 128 e na Figura 129 encontra-se representado o comportamento dos adesivos na geometria topo a topo, chanfro 1 e chanfro 2, respectivamente, quando as juntas são submetidas a esforços de corte.

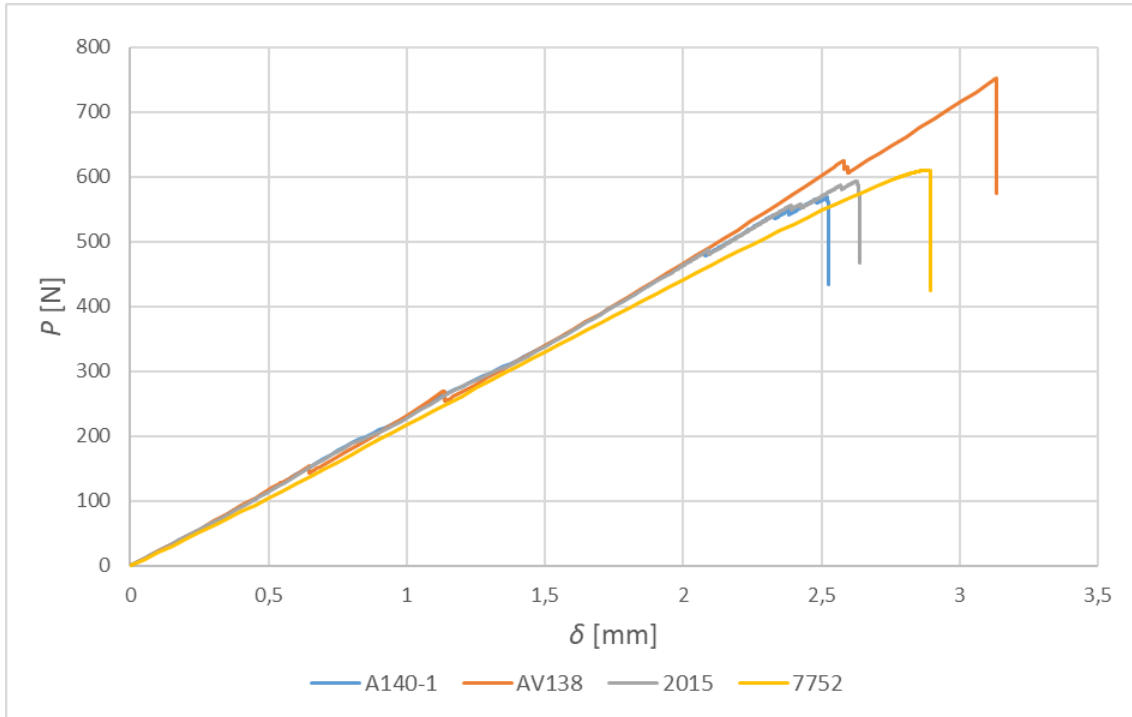


Figura 127 - Comparação entre curvas  $P$ - $\delta$  para esforços de corte na geometria topo a topo

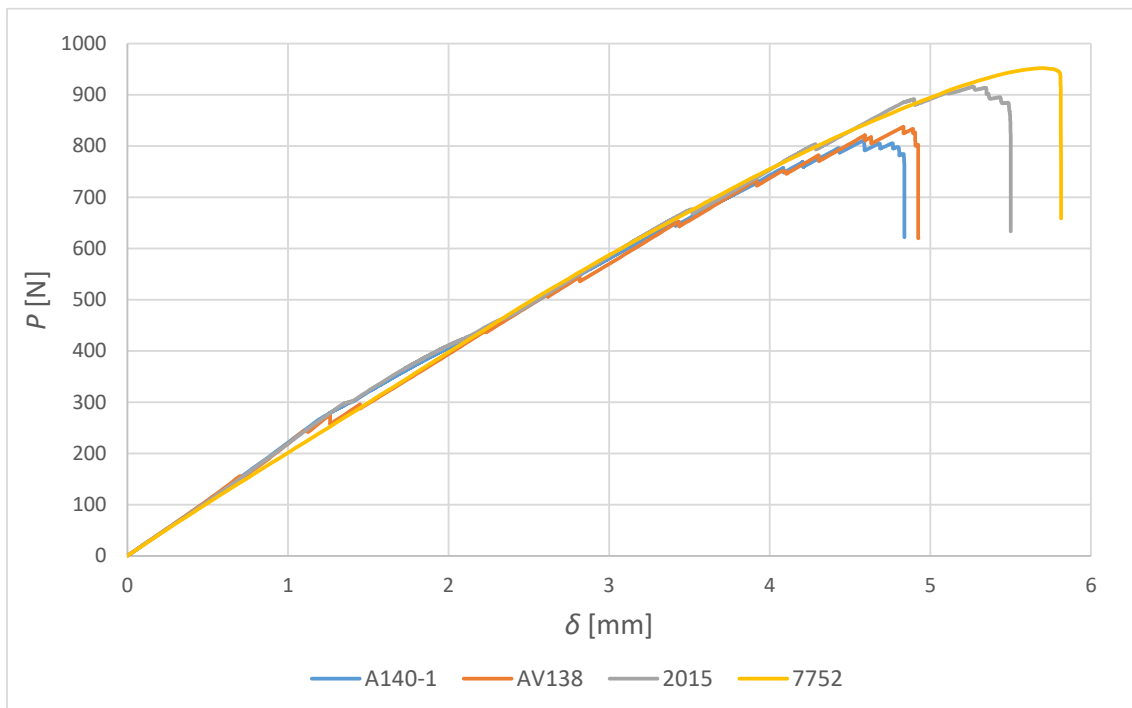


Figura 128 - Comparação entre curvas  $P$ - $\delta$  para esforços de corte na geometria em chanfro 1

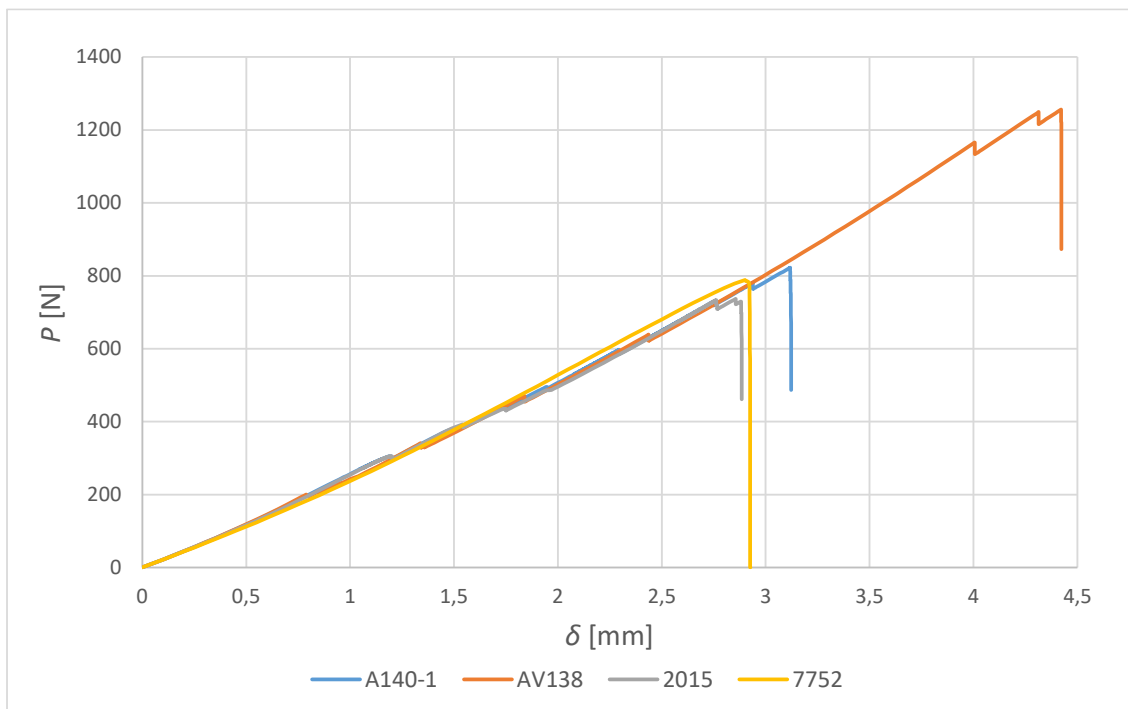


Figura 129 - Comparação entre curvas  $P$ - $\delta$  para esforços de corte na geometria em chanfro 2

Na geometria topo a topo (Figura 127) é possível visualizar que todas as curvas têm um comportamento linear até à rotura de cada adesivo. Entre os quatro adesivos, o adesivo Araldite® AV138 é o que tem maior resistência, mas o que tem menor tenacidade entre os quatro. Apesar disto, este foi o adesivo que produziu o maior deslocamento antes da rotura do mesmo, sendo que o resultado se deveu na maioria à alta resistência ao corte que o mesmo tem. Os restantes adesivos apresentam valores de resistência muito próximos, entre os 557 N e os 602 N. Apesar destes três adesivos terem valores de resistência muito próximos, o adesivo Sikaforce® 7752 conseguiu diferenciar-se ao atingir a rotura para um deslocamento bem superior aos outros dois adesivos.

Na geometria em chanfro 1 (Figura 128) é possível observar que o comportamento das curvas é menos linear comparativamente à geometria topo a topo, embora tenham atingido maiores valores de deslocamento e resistência por todos os adesivos. Nesta geometria em chanfro, os adesivos mais flexíveis conseguiram aguentar mais esforço até à rotura do mesmo. Nesta geometria, os adesivos Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015 atingiram os resultados melhores, respetivamente. Enquanto os valores obtidos para os restantes adesivos foram muito semelhantes, quer em resistência quer em deslocamento obtido.

Pela análise da geometria em chanfro 2 (Figura 129) é visível que o comportamento das curvas dos adesivos ocorre de forma linear. Nesta geometria todos os adesivos resistiram melhor ao esforço aplicado comparativamente à geometria topo a topo, no entanto comparativamente à geometria em chanfro 1, apenas o adesivo Sikaforce® AV 138 conseguiu melhorar a sua resistência. Relativamente aos deslocamentos obtidos

antes da rotura, os valores obtidos na geometria em chanfro 2 (Figura 129) localizam-se entre a geometria topo a topo (Figura 127) e a geometria em chanfro 1 (Figura 128), sendo a geometria topo a topo, a que garante os menores valores e a geometria em chanfro 1, a que garante os maiores valores. O adesivo Sikaforce® AV 138 resistiu claramente melhor ao esforço aplicado nesta geometria, conferindo-se um aumento aproximado de 67% relativamente ao observado na geometria topo a topo (Figura 127).

### 3.5.8.5 Comparação de resultados entre geometrias

A Figura 130, Figura 131 e Figura 132 apresentam um resumo de  $P_{m\acute{a}x}$  entre as juntas com diferentes adesivos para cada carregamento, considerando as geometrias topo a topo, chanfro 1 e chanfro 2, respetivamente.

Com base nas figuras apresentadas foi realizada uma tabela com vista a classificar os adesivos pelo valor de  $P_{m\acute{a}x}$  obtido durante os ensaios para as diferentes geometrias. Estes são classificados numa escala entre 1 e 4, onde 1 é o melhor e 4 é o pior, fazendo-se acompanhar por uma cor associada ao número de forma a ter uma melhor mancha visual para associar a respetiva classificação.

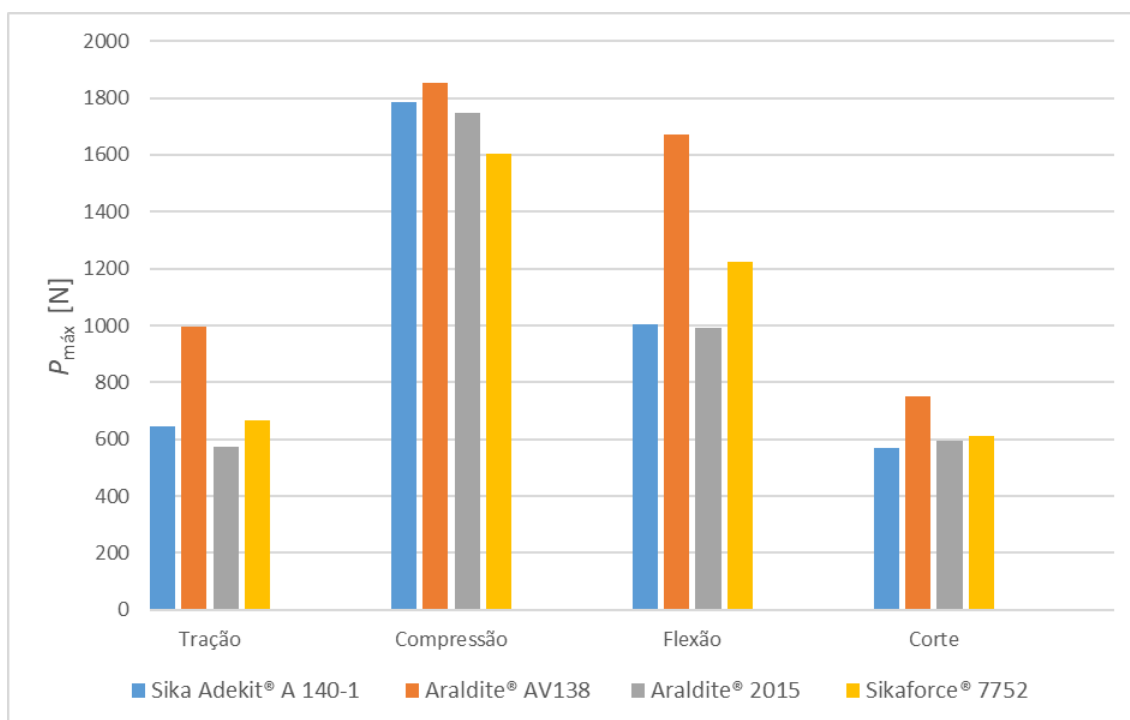


Figura 130 - Resumo das  $P_{m\acute{a}x}$  obtidas na geometria topo a topo

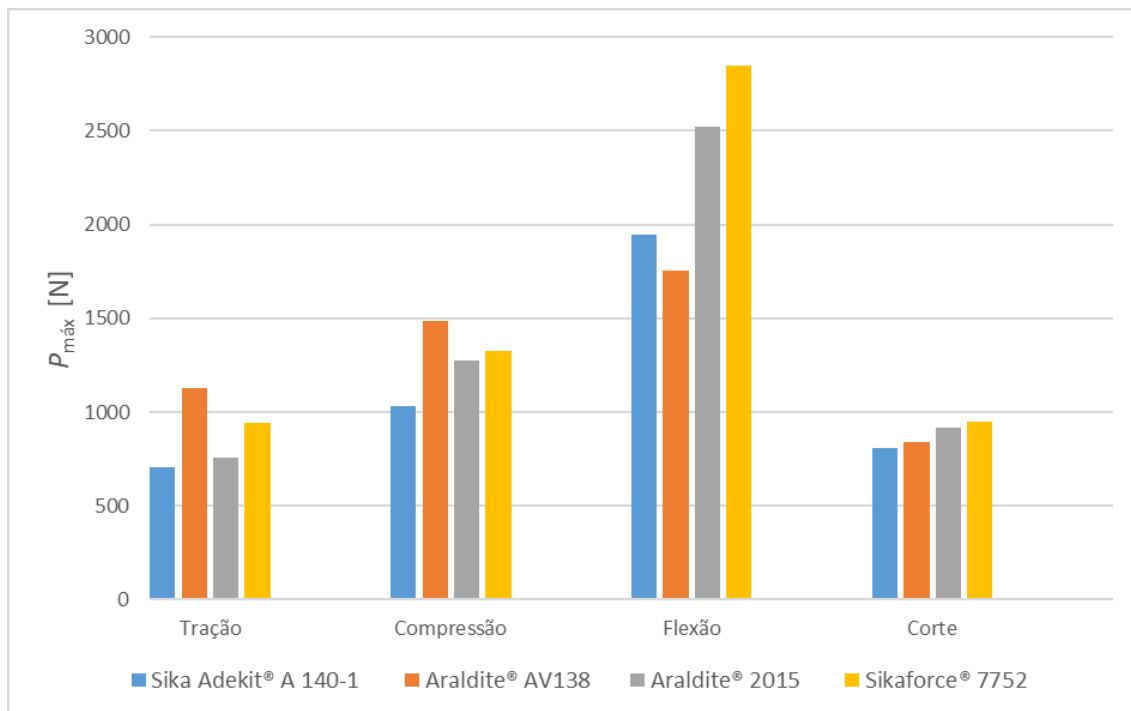


Figura 131 - Resumo das  $P_{m\acute{a}x}$  obtidas na geometria em chanfro 1

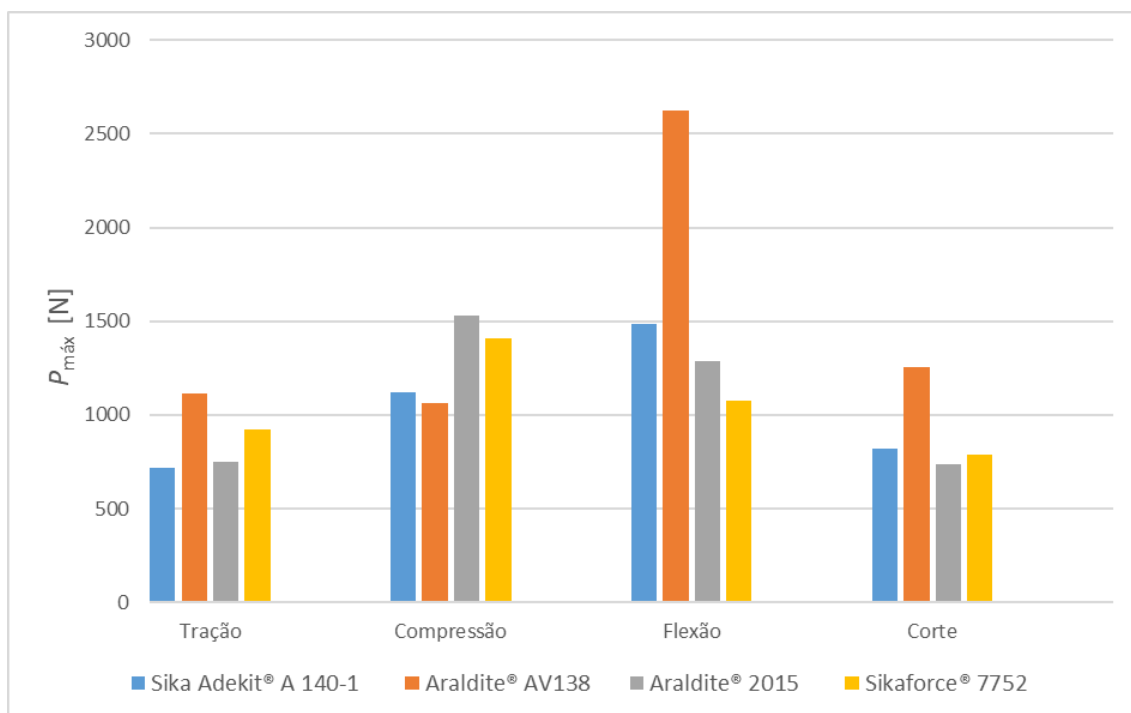


Figura 132 – Resumo das  $P_{m\acute{a}x}$  obtidas na geometria em chanfro 2

Na Tabela 40 apresenta-se a classificação de cada adesivo para os ensaios realizados nas diferentes geometrias.

Tabela 40 - Classificação dos adesivos para os diferentes ensaios em função do parâmetro geométrico considerado

Geometria	Ensaio	Adesivo X	Araldite® AV138	Araldite® 2015	Sikaforce® 7752
Geometria topo a topo	Tração	3	1	4	2
	Compressão	2	1	3	4
	Flexão	3	1	4	2
	Corte	4	1	3	2
Geometria em chanfro 1	Tração	4	1	3	2
	Compressão	4	1	3	2
	Flexão	3	4	2	1
	Corte	4	3	2	1
Geometria em chanfro 2	Tração	4	1	3	2
	Compressão	3	4	1	2
	Flexão	2	1	3	4
	Corte	2	1	4	3

Visto que neste estudo se pretende apresentar alternativas geométricas ou tipos de adesivo que permitam melhorar a configuração atualmente utilizada no fabrico das embarcações, primeiramente são discutidos os resultados obtidos para o adesivo X e posteriormente discutidos os restantes adesivos, com destaque para a comparação relativa com este e com o tipo de geometria utilizado.

Para o adesivo atualmente implementado no fabrico das embarcações, o adesivo X, a geometria que mais se adequa observando apenas a Tabela 40 é a geometria em chanfro 2, seguida da geometria topo a topo e por último a geometria em chanfro 1. Pela análise das figuras (Figura 130, Figura 131 e Figura 132), que demonstram o resumo das  $P_{máx}$  obtidas nas diferentes geometrias, a geometria em chanfro 2 obtém o valor mais alto de resistência deste adesivo para esforços de tração e corte, e o segundo valor mais alto para os outros dois esforços. A geometria que atinge a melhor resistência à compressão é a geometria topo a topo, e a que permite atingir a melhor resistência à flexão é a geometria em chanfro 1. Deste modo, numa segunda fase, relacionando as figuras e a

Tabela 40, conseguiu-se apurar que a melhor geometria é a geometria em chanfro 2. No entanto, comparando a média de valores para as geometrias em chanfro e topo a topo e para os quatro esforços, a geometria em chanfro 1 no final apresenta-se como a melhor geometria para este adesivo (Tabela 41).

Tabela 41 - Comparação das geometrias em chanfro com geometria topo a topo para o adesivo X

Esforço	Geometria em chanfro 1	Geometria em chanfro 2
Tração	+ 9,75%	+ 10,70%
Compressão	- 42,28%	- 36,99%
Flexão	+ 93,43%	+ 48,10%
Corte	+ 42,75%	+ 44,68%
$\bar{X}$	+ 25,91%	+ 16,62%

Para o adesivo Araldite® AV138 consegue-se apurar que a geometria que lhe auferir as melhores propriedades em comparação com os outros adesivos é a geometria topo a topo, seguida da geometria em chanfro 2 e, por fim, a geometria em chanfro 1 (Tabela 40). Relacionando apenas os valores representados das  $P_{\text{máx}}$  do próprio adesivo, a geometria em chanfro 2 consegue atingir a melhor resistência em esforços de flexão e corte e a segunda melhor resistência à tração. Já a geometria topo a topo confere uma vez mais o melhor valor deste adesivo à compressão, e a melhor resistência à tração é dada pela geometria em chanfro 1. Em suma, relacionando a média de valores obtidos para os esforços realizados (Tabela 42), averigua-se que a geometria em chanfro 2 garante no geral as melhores características.

Tabela 42 - Comparação das geometrias em chanfro com geometria topo a topo para o adesivo Araldite® AV138

Esforço	Geometria em chanfro 1	Geometria em chanfro 2
Tração	+ 13,36%	+ 11,88%
Compressão	- 19,79%	- 42,41%
Flexão	+ 5,18%	+ 57,01%
Corte	+ 11,44%	+ 67,07%
$\bar{X}$	+ 2,55%	+ 23,39%

A análise ao adesivo Araldite® 2015 (Tabela 40) mostra que a geometria que permite retirar as melhores características, comparando com os restantes adesivos, é a geometria em chanfro 1, seguida da geometria em chanfro 2 e finalmente a geometria topo a topo. A geometria em chanfro 1 obtém a melhor resistência em esforços de tração, flexão e corte. Já a geometria topo a topo apresenta a melhor resistência para esforços de compressão neste adesivo, mas a pior resistência nas restantes propriedades. Relacionando as figuras com a Tabela 40, conclui-se que a geometria em chanfro 1 é a melhor entre as três, caso se opte por utilizar este adesivo. Comparando os valores médios obtidos na Tabela 43 para cada geometria, destaca-se uma vez mais a geometria em chanfro 1.

Tabela 43 - Comparação das geometrias em chanfro com geometria topo a topo para o adesivo Araldite® 2015

Esforço	Geometria em chanfro 1	Geometria em chanfro 2
Tração	+ 31,79%	+ 31,01%
Compressão	- 27%	- 12,52%
Flexão	+ 154,99%	+ 30,11%
Corte	+ 54,25%	+ 24,03%
$\bar{X}$	+ 53,51%	+ 18,15%

O adesivo Sikaforce® 7752 confere o melhor comportamento para a geometria em chanfro 1, logo depois a geometria topo a topo e por fim a geometria em chanfro 2 (Tabela 40). Verificando apenas os valores das  $P_{m\acute{a}x}$  expostos entre nas figuras deste capítulo, a geometria em chanfro tipo 1 assegura os melhores valores de resistência deste adesivo para esforços de tração, flexão e corte. Por outro lado, a geometria topo a topo permite obter mais uma vez a melhor resistência para esforços de compressão. Concluindo, a geometria que garante as melhores propriedades a este adesivo é a geometria em chanfro 1. A Tabela 44 detalha o comportamento geral das geometrias em chanfro relativamente à geometria topo a topo, o que comprova novamente que a geometria em chanfro 1 garante as melhores características para este adesivo.

Tabela 44 - Comparação das geometrias em chanfro com geometria topo a topo para o adesivo Sikaforce® 7752

Esforço	Geometria em chanfro 1	Geometria em chanfro 2
Tração	+ 41,37%	+ 38,59%
Compressão	- 17,20%	- 11,99%
Flexão	+ 132,97%	- 11,88%
Corte	+ 55,97%	+ 29,22%
$\bar{X}$	+ 53,28%	+ 10,99%

A análise das diferentes geometrias mostra que a geometria topo a topo é a que tem o menor tempo de produção e conseqüentemente menor custo de produção, visto que não é realizada qualquer preparação das superfícies e o adesivo é colocado diretamente na junta (Figura 35). Para a geometria em chanfro, quer do tipo 1 ou tipo 2, é necessário realizar uma preparação da junta. Uma vez que a junta inicial não possui qualquer tipo inclinação, é necessário realizar uma preparação a fim de conferir a respectiva inclinação de 45°. Neste sentido os tempos de fabrico serão acrescidos e conseqüentemente os custos de produção também.

# 4. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 CONCLUSÕES

4.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS



## 4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

### 4.1 Conclusões

Esta dissertação teve como objetivo principal a realização de um estudo numérico para avaliação da resistência de uma junta adesiva formada entre o casco e o *deck* de uma embarcação utilizada na canoagem, e posterior proposta de soluções geométricas e tipos de adesivos que possam melhorar a configuração atual da junta adesiva.

Desta forma, começou-se por caracterizar o adesivo atualmente empregue na embarcação para a obtenção dos valores de referência que serão utilizados na parte numérica. Foram fabricados provetes de adesivo maciço e, posteriormente, ensaiados à tração numa máquina de ensaios universal. Através dos ensaios dos provetes maciços determinou-se o módulo de Young, a tensão de limite elástico à tração, a tensão de rotura à tração, a deformação de rotura à tração. Os valores obtidos para estas propriedades mecânicas foram, respetivamente,  $2571,40 \pm 105,8$  MPa;  $18,84 \pm 0,81$  MPa;  $25,90 \pm 1,77$  MPa e  $2,6 \pm 0,4\%$ . Excetuando a tensão de limite elástico do adesivo, que não se encontra disponível na ficha do fabricante, os parâmetros obtidos neste trabalho tiveram um desvio percentual de +2,86%, -13,65% e -35%, respetivamente. Os parâmetros de corte e fratura foram obtidos através da ficha do fabricante do adesivo e dois artigos de pesquisa.

De forma a permitir utilizar a técnica de MDC para realizar o estudo numérico que compõe o objetivo principal deste trabalho, esta foi inicialmente validada através de resultados experimentais de JSS, considerando os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, que são utilizados neste trabalho como alternativa ao adesivo X. Observou-se que a capacidade de previsão é bastante satisfatória para os dois adesivos Araldite®, enquanto para o adesivo Sikaforce® 7752 se constatou que as previsões apresentaram alguma diferença devido à ductilidade do mesmo, embora esta não invalide o método.

De seguida, foram determinadas as propriedades dos materiais que compõem a geometria de construção da embarcação, mais concretamente as propriedades das camadas da estrutura *sandwich*. Após obtidas estas propriedades, foi desenhada uma aproximação da geometria em 2D, no *software* ABAQUS®, tendo o cuidado de ter sido replicada a curvatura de secção selecionada. Uma vez que se pretendeu estudar as vantagens que diferentes alterações geométricas e adesivos trazem a esta junta adesiva quando submetidos a diferentes esforços, na base deste trabalho surgiram mais dois

tipos de geometria (chanfro 1 e chanfro 2) e três tipos de adesivos (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752), para além da geometria e adesivo atualmente utilizados. Através das simulações, em função do modelo de dano coesivo triangular, obtiveram-se as distribuições de tensões  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  e  $\sigma_y/\tau_{méd}$  para todas as combinações possíveis, assim como as curvas  $P-\delta$  que traduzem a evolução da resistência dos adesivos nas diferentes geometrias.

No que diz respeito às distribuições de tensões  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  e  $\sigma_y/\tau_{méd}$  todas as geometrias, quando sujeitas aos diferentes esforços, conferem o aparecimento de concentrações de tensões mais elevadas nas extremidades do adesivo, isto é, para  $x/L_0 \approx 0$  e  $x/L_0 \approx 1$ . No entanto, comparando os valores obtidos pelas diferentes geometrias, a geometria topo a topo garante o aparecimento de menores valores de pico de tensão quando as juntas estão submetidas ao esforço de corte, a geometria em chanfro 1 assegura o aparecimento de valores de pico menores para esforços de tração e compressão e a geometria em chanfro 2 garante o aparecimento de menores valores de pico para esforços de flexão. Relativamente aos adesivos, verifica-se que o adesivo Araldite® AV138 no geral é o que apresenta os picos de tensões  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  e  $\sigma_y/\tau_{méd}$  mais elevados, em consequência de ser o que possui a maior rigidez.

Pela análise da previsão de resistência obtida na análise numérica apresentam-se as seguintes conclusões comparando apenas nas diferentes geometrias. No caso da geometria topo a topo, o adesivo que apresenta os maiores valores de  $P_{máx}$  em todos os ensaios é o adesivo Araldite® AV138. Na geometria em chanfro 1, o adesivo que apresenta o melhor comportamento geral é o adesivo Sikaforce® 7752. E, por último, na geometria em chanfro 2, torna-se mais viável o uso do adesivo Araldite® AV138.

Ainda na análise de previsão de resistência, mas agora focando nos adesivos de forma individual, para o adesivo X, a geometria que traduz o melhor crescimento dos valores  $P_{máx}$  relativamente à geometria topo a topo é a geometria em chanfro 1, com um aumento médio de 25,91%, considerando os quatro esforços. No caso do adesivo Araldite® AV138, a geometria em chanfro 2 é a que garante os valores mais altos de resistência, com um aumento médio de 23,39% em relação à geometria topo a topo. Para o adesivo Araldite® 2015, a geometria em chanfro 1 garante a melhor resistência a este adesivo, com um aumento médio de 53,51% comparativamente à geometria topo a topo. Finalmente, para o adesivo Sikaforce® 7752, também se deve optar por utilizar a geometria em chanfro 1, verificando-se um aumento médio da resistência em cerca de 53,28% relativamente à geometria topo a topo. No entanto, é de referir que, independentemente de qual seja o adesivo utilizado, a geometria topo a topo é sempre a que confere a maior resistência quando os adesivos estão sujeitos a esforços de compressão.

Concluindo, caso seja necessário aumentar a resistência de uma embarcação sem aumentar significativamente o tempo de produção, deve-se optar por utilizar o adesivo

Araldite® AV138 aplicado na geometria topo a topo. No entanto, caso se opte por ter a melhor configuração possível, existem duas configurações possíveis: a primeira envolve o uso do adesivo Sikaforce® 7752 aplicado na geometria em chanfro 1, e a segunda envolve a aplicação do adesivo Araldite® AV138 aplicado na geometria em chanfro 2. Relativamente a estas últimas duas configurações, a primeira tem um comportamento melhor para as tensões  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  e  $\sigma_y/\tau_{méd}$ , uma vez que os picos de tensão obtidos são menores que os obtidos na segunda configuração. Para além disso, visto que na primeira configuração se utiliza um adesivo mais dúctil, este irá resistir melhor às tensões sentidas.

## 4.2 Propostas de trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, apresentam-se as seguintes propostas:

- Validar os resultados numéricos das alterações geométricas com ensaios experimentais;
- Avaliar o comportamento dos adesivos para diferentes condições como, por exemplo, temperatura e humidade;
- Avaliar o comportamento da junta adesiva caso se opte por utilizar duas geometrias diferentes no fabrico da mesma embarcação.



## **5. BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO**



## 5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Klausener, P.C., *História da Canoagem*. n.d.
2. International Canoe Federation. *History*. n.d [cited 2021; Available from: <https://www.canoeicf.com/history>].
3. Szanto, C., *Canoe Sprint - Coaching Manual - Level 2 and 3*. 2014, Budapest.
4. Federação Portuguesa de Canoagem. *História*. n.d [cited 2021; Available from: <https://www.fpcanoagem.pt/federacao/historia>].
5. Federação Portuguesa de Canoagem, *Regulamento Geral de Competições*, F.P.d. Canoagem, Editor. 2019.
6. Sipre. *K1 Kepler*. n.d [cited 2021; Available from: <https://www.kayaksipre.com/k1-kepler/>].
7. International Canoe Federation. *Canoe Sprint*. 2021 [cited 2022; Available from: [https://www.canoeicf.com/sites/default/files/rules\\_canoe\\_sprint\\_2022.pdf](https://www.canoeicf.com/sites/default/files/rules_canoe_sprint_2022.pdf)].
8. International Canoe Federation. *Canoe Marathon*. 2021 [cited 2022; Available from: [https://www.canoeicf.com/sites/default/files/rules\\_canoe\\_marathon\\_2022.pdf](https://www.canoeicf.com/sites/default/files/rules_canoe_marathon_2022.pdf)].
9. International Canoe Federation. *The difference between Canoe and Kayak*. 2021 [cited 2022; Available from: <https://www.canoeicf.com/canoe-kayak-difference>].
10. International Canoe Federation. *Paracanoe*. 2021 [cited 2022; Available from: [https://www.canoeicf.com/sites/default/files/rules\\_paracanoe\\_2022.pdf](https://www.canoeicf.com/sites/default/files/rules_paracanoe_2022.pdf)].
11. International Canoe Federation. *Canoe Slalom*. 2021 [cited 2022; Available from: [https://www.canoeicf.com/sites/default/files/rules\\_canoe\\_slalom\\_2022.pdf](https://www.canoeicf.com/sites/default/files/rules_canoe_slalom_2022.pdf)].
12. International Canoe Federation. *Canoe Ocean Racing*. 2021 [cited 2022; Available from: [https://www.canoeicf.com/sites/default/files/rules\\_canoe\\_ocean\\_racing\\_2022.pdf](https://www.canoeicf.com/sites/default/files/rules_canoe_ocean_racing_2022.pdf)].
13. International Canoe Federation. *Wildwater Canoeing*. 2021 [cited 2022; Available from: [https://www.canoeicf.com/sites/default/files/rules\\_wildwater\\_canoeing\\_2022.pdf](https://www.canoeicf.com/sites/default/files/rules_wildwater_canoeing_2022.pdf)].
14. International Canoe Federation. *Canoe Polo*. 2021 [cited 2022; Available from: [https://www.canoeicf.com/sites/default/files/rules\\_canoe\\_polo\\_2022.pdf](https://www.canoeicf.com/sites/default/files/rules_canoe_polo_2022.pdf)].
15. International Canoe Federation. *Dragon Boat*. 2021 [cited 2022; Available from: [https://www.canoeicf.com/sites/default/files/rules\\_dragon\\_boat\\_2022.pdf](https://www.canoeicf.com/sites/default/files/rules_dragon_boat_2022.pdf)].
16. Nelo. *Maintenance*. n.d [cited 2022; Available from: <http://www.nelo.eu/maintenance/>].
17. Zedtech. *Maintenance*. n.d [cited 2022; Available from: <https://zedtech.pt/products/information/maintenance>].
18. Elio. *Regras de Manutenção*. n.d [cited 2022; Available from: [http://www.eliokayaks.com/?page\\_id=639](http://www.eliokayaks.com/?page_id=639)].
19. Stuhau, D., *Kayaking Made Easy*. Third ed. 2006: The Globe Pequot Press.
20. Salisbury, P. *10 Plywood Kayak Plans (With PDFs)*. n.d [cited 2022; Available from: <https://www.kayakhel.com/plywood-kayak-plans-with-pdfs/>].
21. Ferreira, A.D., C.X. Gonçalves, e V.D. Branco, *Utilização de materiais poliméricos e compósitos na produção de caiaques*. 2012, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. p. 38.

22. Kayakportugal. *Tipos de Construção*. n.d [cited 2022; Available from: <https://sites.google.com/site/kayakportugal/canoas-e-kayaks/tipos-de-constr>.
23. Baptista, D., *Design and Manufacturing of Natural Composite Canoe*. n.d, California Polytechnic State University.
24. Dias, P., *Análise Estrutural de um Kayak de Competição*. 2011, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. p. 79.
25. Walrus Kayaks. *An Introduction to Composite Kayak Construction*. 2011 [cited 2022; Available from: <http://walruskayaks.squarespace.com/blog/an-introduction-to-composite-kayak-construction.html>].
26. Haghani, R. e J. Yang, *Application of FRP Materials for Construction of Culvert Road Bridges*. 2016, Chalmers University Of Technology.
27. Silva, L.F.M.d. e P.D.A. Ochsner, *Modeling of Adhesively Bonded Joints*. 2008, Berlin: Springer. 335.
28. Romano, M.G., M. Guida, F. Marulo, M. Giugliano Auricchio, e S. Russo, *Characterization of Adhesives Bonding in Aircraft Structures*. Materials (Basel), 2020. **13**(21).
29. Pinto, A., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
30. Petrie, E.M., *Handbook of Adhesives and Sealants*. 1999: McGraw-Hill Professional. 884.
31. Adams, R.D. e J. Comyn, *Joining using adhesives*. 2000.
32. Troughton, M., *Handbook of Plastics Joining*. 2008: William Andrew Publishing.
33. European Aluminium Association, *EAA Aluminium Automotive Manual - Joining*. 2015.
34. Silva, L.F.M.d., A.G.d. Magalhães, e M.F.d.S.F.d. Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. 2007, Porto: Publindústria. 358.
35. Fernandes, T., *Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
36. Silva, L.F.M.d., A. Ochsner, e R.D. Adams, *Handbook of Adhesion Technology*. 2011: Springer.
37. Banea, M.D. e L.F.M. da Silva, *Adhesively bonded joints in composite materials: An overview*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2016. **223**(1): p. 1-18.
38. Schmidt, R., G., e J.P. Belle, *Adcanver in Polymer Science*. 1985.
39. Ennis, B.C., P.J. Pearce, e C.E.M. Morris, *Journal of Applied Polymer Science*. 1989. **37**.
40. Falconer, D.J., N.C. MacDonald, e P. Walkes, *Chem. Ind. London*. 1964.
41. Dinte, E. e B. Sylvester, *Adhesives: Applications and Recent Advances*, in *Applied Adhesive Bonding in Science and Technology*. 2018.
42. Volkersen, O., *Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. Luftfahrtforschung 15, 1938: p. 41-47.
43. Adams, R.D. e N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1974. **9**(3): p. 185-196.
44. Harris, J.A. e R.A. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1984. **4**(2): p. 65-78.
45. Curiel Sosa, J.L. e N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology, 2012. **72**(7): p. 788-791.
46. Adams, R.D., J. Comyn, e W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 2nd ed. 1997, London: Chapman & Hall.
47. Panigrahi, S.K. e B. Pradhan, *Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP*

- Composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2007. **26**(2): p. 183-201.
48. Campilho, R.D., *Strength Prediction of Adhesively-bonded Joints*. 2017: CRC Press.
  49. Griffith, A.A., *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1921. **221**(582-593): p. 163-198.
  50. Williams, M.L., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1959. **49**(2): p. 199-204.
  51. Hutchinson, J., *Plastic stress and strain fields at a crack tip*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1968. **16**(5): p. 337-342.
  52. Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. Journal of Applied Mechanics, 1968. **35**(2): p. 379-386.
  53. Fernlund, G. e J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991. **11**(4): p. 221-227.
  54. Barenblatt, G.I., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks*. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1959. **23**(3): p. 622-636.
  55. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
  56. 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.
  57. da Silva, L.F.M. e R.D.S.G. Campilho, *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2011: Springer.
  58. Ji, G., Z. Ouyang, G. Li, S. Ibekwe, e S.-S. Pang, *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47**(18-19): p. 2445-2458.
  59. Turon, A., J. Costa, P.P. Camanho, e C.G. Dávila, *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.
  60. Carvalho, U.T.F. e R.D.S.G. Campilho, *Validation of pure tensile and shear cohesive laws obtained by the direct method with single-lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017. **77**(Supplement C): p. 41-50.
  61. Yang, Q.D. e M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.
  62. Banea, M.D., L.F.M.d. Silva, e R.D.S.G. Campilho, *Effect of Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Toughness of a High Temperature Epoxy Adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012. **26**(7): p. 939-953.
  63. 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.
  64. 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.
  65. Chandra, N., H. Li, C. Shet, e H. Ghonem, *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.
  66. 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.

67. Kafkalidis, M.S. e M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
68. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, J.A.B.P. Neto, e L.F.M. da Silva, *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.
69. Liljedahl, C.D.M., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
70. Rocha, R.J.B. e R.D.S.G. 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.
71. Fernandes, R.L. e R.D.S.G. Campilho, *Testing different cohesive law shapes to predict damage growth in bonded joints loaded in pure tension*. The Journal of Adhesion, 2017. **93**(1-2): p. 57-76.
72. Fernandes, R.L. e R.D.S.G. Campilho, *Accuracy of cohesive laws with different shape for the shear behaviour prediction of bonded joints*. The Journal of Adhesion, 2019. **95**(4): p. 325-347.
73. Carlberger, T. e U. Stigh, *Influence of Layer Thickness on Cohesive Properties of an Epoxy-Based Adhesive—An Experimental Study*. The Journal of Adhesion, 2010. **86**(8): p. 816-835.
74. Jung Lee, M., T. Min Cho, W. Seock Kim, B. Chai Lee, e J. Ju Lee, *Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(5): p. 322-328.
75. Zhu, Y., K.M. Liechti, e K. Ravi-Chandar, *Direct extraction of rate-dependent traction–separation laws for polyurea/steel interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(1): p. 31-51.
76. Nunes, S.L.S., R.D.S.G. Campilho, F.J.G. da Silva, C.C.R.G. de Sousa, T.A.B. Fernandes, M.D. Banea, e L.F.M. da Silva, *Comparative failure assessment of single and double-lap joints with varying adhesive systems*. The Journal of Adhesion, 2016. **92**: p. 610-634.
77. Pandya, K.C. e J.G. Williams, *Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene*. Polymer Engineering & Science, 2000. **40**(8): p. 1765-1776.
78. Chai, H., *Experimental evaluation of mixed-mode fracture in adhesive bonds*. Experimental Mechanics, 1992. **32**(4): p. 296-303.
79. Campilho, R.D.S.G., D.C. Moura, M.D. Banea, e L.F.M. da Silva, *Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **53**: p. 15-22.
80. Stigh, U., K.S. Alfredsson, T. Andersson, A. Biel, T. Carlberger, e K. Salomonsson, *Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers*. International Journal of Fracture, 2010. **165**(2): p. 149-162.
81. Constante, C.J., R.D.S.G. Campilho, e D.C. Moura, *Tensile fracture characterization of adhesive joints by standard and optical techniques*. Engineering Fracture Mechanics, 2015. **136**: p. 292-304.
82. ASTM D3433-99, *Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*. 2012: ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
83. Gustafson, P.A. e A.M. Waas, *The influence of adhesive constitutive parameters in cohesive zone finite element models of adhesively bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(10): p. 2201-2215.
84. Yoshihara, H., *Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. **71**(13–14): p. 2065-2077.

85. Leal, A.J.S. e R.D.S.G. Campilho, *Numerical evaluation of the ENF and 4ENF tests for the shear toughness estimation of adhesive joints*. *Composite Structures*, 2018. **202**: p. 333-343.
86. Daudeville, L. e P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. *Composite Structures*, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
87. Khoramishad, H., A.D. Crocombe, K.B. Katnam, e I.A. Ashcroft, *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. *International Journal of Fatigue*, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
88. Kattan, P.I. e G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001: Springer Berlin Heidelberg.
89. Raghavan, P. e S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. *Mechanics of Materials*, 2005. **37**(9): p. 955-979.
90. Wahab, M.M.A., I.A. Ashcroft, A.D. Crocombe, e S.J. Shaw, *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2001. **15**(7): p. 763-781.
91. Imanaka, M., T. Hamano, A. Morimoto, R. Ashino, e M. Kimoto, *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2003. **17**(7): p. 981-994.
92. Shenoy, V., I.A. Ashcroft, G.W. Critchlow, e A.D. Crocombe, *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. *Engineering Fracture Mechanics*, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.
93. Hua, Y., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2008. **28**(6): p. 302-313.
94. Chen, Z., R.D. Adams, e L.F.M. da Silva, *Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion*. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011. **78**(6): p. 990-1007.
95. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. 2008: Wiley.
96. Belytschko, T. e T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999. **45**(5): p. 601-620.
97. Moës, N., J. Dolbow, e T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999. **46**(1): p. 131-150.
98. Abaqus®, *Documentation. D. Systèmes*. 2013: Vélizy-Villacoublay.
99. Gwinner, J., E.J.T. Stephan, e d.o.b. Contact Problems, *Advanced Boundary Element Methods—Treatment of Boundary Value*. 2017.
100. Wang, H. e Q.-H. Qin, *Methods of fundamental solutions in solid mechanics*. 2019, Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
101. Lucy, L.B., *A numerical approach to the testing of the fission hypothesis*. *The Astronomical Journal*, 1977. **82**: p. 1013-1024.
102. Gingold, R.A. e J. Monaghan, *Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1977. **181**(3): p. 375-389.
103. Belytschko, T., Y.Y. Lu, e L. Gu, *Element-free Galerkin methods*. *International journal for numerical methods in engineering*, 1994. **37**(2): p. 229-256.
104. Chen, J.-S., C. Pan, C.-T. Wu, e W.K. Liu, *Reproducing kernel particle methods for large deformation analysis of non-linear structures*. *Computer Methods in Applied Mechanics Engineering*, 1996. **139**(1-4): p. 195-227.
105. Liu, W.K., S. Jun, e Y.F. Zhang, *Reproducing kernel particle methods*. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 1995. **20**(8-9): p. 1081-1106.

106. Wang, J. e G. Liu, *A point interpolation meshless method based on radial basis functions*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2002. **54**(11): p. 1623-1648.
107. Wang, J., G. Liu, e Y. Wu, *A point interpolation method for simulating dissipation process of consolidation*. Computer Methods in Applied Mechanics Engineering, 2001. **190**(45): p. 5907-5922.
108. Liu, G., *A point assembly method for stress analysis for two-dimensional solids*. International journal of solids and structures, 2002. **39**(1): p. 261-276.
109. Tsai, C., Y. Guan, D. Ohanehi, J. Dillard, D. Dillard, e R. Batra, *Analysis of cohesive failure in adhesively bonded joints with the SSPH meshless method*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **51**: p. 67-80.
110. Bodjona, K. e L. Lessard, *Nonlinear static analysis of a composite bonded/bolted single-lap joint using the meshfree radial point interpolation method*. Composite Structures, 2015. **134**: p. 1024-1035.
111. Ramalho, L.D.C., R.D.S.G. Campilho, J. Belinha, e L.F.M. da Silva, *Static strength prediction of adhesive joints: A review*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020. **96**.
112. de Sousa, C., R. Campilho, E.A.S. Marques, M. Costa, e L.F.M. da Silva, *Overview of different strength prediction techniques for single-lap bonded joints*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2016. **231**(1-2): p. 210-223.
113. Dionísio, J.M.M., L.D.C. Ramalho, I.J. Sánchez-Arce, R.D.S.G. Campilho, e J. Belinha, *Fracture mechanics approach to stress singularities in composite adhesive joints*. Composite Structures, 2021. **276**.
114. Kim, M.-H., H.-S. Hong, e Y.-C. Kim, *Determination of failure envelope of functionally graded adhesive bonded joints by using mixed mode continuum damage model and response surface method*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2021. **106**.
115. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, A.M.G. Pinto, L.F.M. da Silva, e A.M.P. de Jesus, *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.
116. Ramalho, L.D.C., R.D.S.G. Campilho, e J. Belinha, *Single lap joint strength prediction using the radial point interpolation method and the critical longitudinal strain criterion*. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2020. **113**: p. 268-276.
117. Petrie, E.M., *Adhesive in the Marine Industry*. 2013.
118. Silva, L.F.M.d., A. Öchsner, e R.D. Adams, *Handbook of Adhesion Technology*. Second ed. 2018: Springer. 1805.
119. Adams, R.D., *Adhesive bonding - Science, Technology and Applications*. 2005: Woodhead Publishing Limited.
120. Alderucci, T., C. Borsellino, e G. Di Bella, *Effect of surface pattern on strength of structural lightweight bonded joints for marine applications*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2021.
121. Diez de Ulzurrun, I., F. López, M.A. Herreros, e J.C. Suárez, *Tests of deck-to-hull adhesive joints in GFRP boats*. Engineering Failure Analysis, 2007. **14**(2): p. 310-320.
122. Di Bella, G., G. Galtieri, E. Pollicino, e C. Borsellino, *Mechanical characterization of adhesive joints with dissimilar substrates for marine applications*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **41**: p. 33-40.
123. Broughton, W.R. e G. Hinopoulos, *Evaluation of the single-lap joint using finite element analysis*. 1999.
124. Ferreira, P.R., *Processos Especiais de Transformação Compósitos*, C.e.T. Instituto Federal de Educação, Editor. 2017.

125. Talreja, R. e J.-A.E. Manson, *Comprehensive Composites Materials*. Vol. 2. 2000: Elsevier.
126. Pinto, S.D.M., *Determinação das propriedades mecânicas à tração de adesivos estruturais frágeis e dúcteis*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2013, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
127. LOCTITE, *Technical data sheet FREKOTE 770-NC*. 2014.
128. Faneco, T.M.S., R.D.S.G. Campilho, F.J.G. Silva, e R.M. Lopes, *Strength and Fracture Characterization of a Novel Polyurethane Adhesive for the Automotive Industry*. *Journal of Testing and Evaluation*, 2017. **45**(2).
131. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e J.J.M.S. 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.
132. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. *Composites Science and Technology*, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
133. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2009. **29**(2): p. 195-205.
134. Barbosa, N., *Comparação experimental e numérica por modelos de dano coesivo de diversos tipos de juntas adesivas*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2017, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
135. *ASTM E8 / E8M, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. 2016, ASTM International: West Conshohocken, PA.
136. Neto, J.A.B.P., R.D.S.G. Campilho, e L.F.M. da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2012. **37**: p. 96-101.
137. Campilho, R., *Adhesive, welded and weld-bonded single-lap joints: Numerical technique for strength prediction*. Vol. 24. 2012. 35-42.
138. Campilho, R.D.S.G., A.M.G. Pinto, M.D. Banea, e L.F.M. da Silva, *Optimization study of hybrid spot-welded/bonded single-lap joints*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2012. **37**: p. 86-95.
139. Faneco, T.M.S., *Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica – Ramo de Materiais e Tecnologias de Fabrico. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
140. Campilho, R., A. Pinto, M.D. Banea, R. Silva, e L.F. da Silva, *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2011. **25**(18): p. 2351-2368.
141. De Moura, M., R. Campilho, e J. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. *Composites Science and Technology*, 2008. **68**(10): p. 2224-2230.
142. De Moura, M., R. Campilho, e J. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. *International Journal of Solids and Structures*, 2009. **46**(6): p. 1589-1595.
143. Marques, E. e L.F. da Silva, *Joint strength optimization of adhesively bonded patches*. *The Journal of Adhesion*, 2008. **84**(11): p. 915-934.
144. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIC) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*. 2014, ISEP: Porto.

145. Darwish, S. e A. Ghanya, *Critical assessment of weld-bonded technologies*. Journal of Materials Processing Technology, 2000. **105**(3): p. 221-229.
146. HAUFLE COMPOSITES *Technacal data sheet Woven Carbon Fibre Fabric 160 g/m<sup>2</sup>, Plain* 2017.
147. Interglas Porcher Industries *Glass Filament Fabrics for Plastics Reinforcement - Product Specification*. 2019.
148. Diab Group *Technacal data Divinycell H*. 2021.
149. Résoltech, *Data sheet RESOLCOAT 1400-1407 and Accelerator AC140*.
150. Marcelo F.S.F. de Moura, António Gonçalves de Magalhães, e A.B.d. Morais, *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. 2010. 370.
151. Campilho, R.D.S.G., *Modelação da execução de reparações em materiais compósitos*, in *Departamento em Engenharia Mecânica*. 2005: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
152. Pocius, A., *Adhesion and Adhesives Technology, An introduction: The chemistry and physical properties of elastomer-based adhesives*. 2002, Maplewood Cincinnati: Hansen Gardner Publications.
153. Högberg, J.L. e U. Stigh, *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2541-2556.
154. Andersson, T. e U. Stigh, *The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. International Journal of Solids and Structures, 2004. **41**(2): p. 413-434.

## 6. ANEXOS

- 6.1 ANEXO A. DESMOLDANTE LOCTITE® FREKOTE 770-NC
- 6.2 ANEXO B. TECIDO DE FIBRA DE CARBONO 160 G/M2, *PLAIN*
- 6.3 ANEXO C. TECIDO DE FIBRA DE VIDRO 220 G/M2, *PLAIN*
- 6.4 ANEXO D. ESPUMA DE PVC
- 6.5 ANEXO E. RESINA EPÓXI RESOLCOAT 1400-1407



## 6 ANEXOS

### 6.1 Anexo A. Desmoldante Loctite® Frekote 770-NC



# LOCTITE® FREKOTE 770-NC™

Known as 770-NC™

August 2014

## PRODUCT DESCRIPTION

LOCTITE® FREKOTE 770-NC™ provides the following product characteristics:

<b>Technology</b>	Mold Release
Appearance	Clear, colorless <sup>LMS</sup>
Chemical Type	Solvent Based Polymer
Odor	Solvent
<b>Cure</b>	Room temperature cure
Cured Thermal Stability	≤400 °C
<b>Application</b>	Release Coatings
Application Temperature	15 to 60 °C
Specific Benefit	<ul style="list-style-type: none"><li>• No contaminating transfer</li><li>• High gloss finish</li><li>• High slip</li><li>• No mold build-up</li><li>• Low odor</li></ul>

LOCTITE® FREKOTE 770-NC™ offers excellent release for various molding applications. LOCTITE® FREKOTE 770-NC™ can be used for the release of epoxies, polyester resins, vinyl ester resins, thermoplastics, adhesives, and rotationally molded plastics. This product is particularly well suited for tougher to release processes such as filament winding and non gel coated polyester and fiberglass molding.

## TYPICAL PROPERTIES OF UNCURED MATERIAL

Specific Gravity @ 25 °C 0.715 to 0.725<sup>LMS</sup>

Flash Point - See SDS

## GENERAL INFORMATION

**This product is not recommended for use in pure oxygen and/or oxygen rich systems and should not be selected as a sealant for chlorine or other strong oxidizing materials.**

**For safe handling information on this product, consult the Safety Data Sheet (SDS).**

### Mold Preparation

#### Cleaning:

Mold surfaces must be thoroughly cleaned and dried. All traces of prior release must be removed. This may be accomplished by using Frekote® PMC or other suitable cleaner. Frekote® 915WB™ or light abrasives can be used for heavy build-up.

### Sealing

### New/Repaired

### Molds:

Occasionally, green or freshly repaired molds are rushed into service prior to complete cure causing an increased amount of free styrene on the mold surface. Fresh or "production line" repairs, new fiberglass and epoxy molds should be cured per manufacturer's instructions, usually a minimum of 2 -3 weeks at 22°C before starting full-scale production. Fully cured previously unused molds should be sealed before use. This can be accomplished by applying one to two coats of an appropriate Frekote® mold sealer, following the directions for use instructions. Allow full cure of the appropriate Frekote® mold sealer before you apply the first coat of LOCTITE® FREKOTE 770-NC™ as outlined in the directions of use.

### Directions for use:

1. LOCTITE® FREKOTE 770-NC™ can be applied to mold surfaces at room temperature up to 60°C by spraying, brushing or wiping with a clean lint-free, cloth. When spraying ensure a dry air source is used or use an airless spray system. Always use in a well ventilated area.
2. Wipe or spray on a smooth, thin, continuous, wet film. Avoid wiping or spraying over the same area that was just coated until the solvent has evaporated. If spraying, hold nozzle 20 to 30cm from mold surface. It is suggested that small areas be coated, working progressively from one side of the mold to the other.
3. Initially, apply 2 to 3 base coats allowing 5 to 10 minutes between coats for solvent evaporation .
4. Allow the final coat to cure for 5 to 10 minutes at 22°C.
5. Maximum releases will be obtained as the mold surface becomes conditioned to LOCTITE® FREKOTE 770-NC™ . Performance can be enhanced by re-coating once, after the first few initial pulls.
6. When any release difficulty is experienced, the area in question can be "touched-up" by re-coating the entire mold surface or just those areas where release difficulty is occurring.
7. **NOTE:** LOCTITE® FREKOTE 770-NC™ is moisture sensitive, keep container tightly closed when not in use. The product should always be used in a well ventilated area.
8. **Precaution:** Users of closed mold systems (rotomolding) must be certain that solvent evaporation is complete and that all solvent vapors have been ventilated from the mold cavity prior to closing the mold. An oil-free compressed air source can be used to assist in evaporation of solvents and ventilation of the mold cavity.

### Mold Touch up

Touch up coats should only be applied to areas where poor release is noticed and should be applied using the same

method as base coats. This will reduce the possibility of release agent or polymer build-up. The frequency of touch ups will depend on the polymer type, mold configuration, and abrasion parameters.

#### Loctite Material Specification<sup>LMS</sup>

LMS dated May 29, 2007. Test reports for each batch are available for the indicated properties. LMS test reports include selected QC test parameters considered appropriate to specifications for customer use. Additionally, comprehensive controls are in place to assure product quality and consistency. Special customer specification requirements may be coordinated through Henkel Quality.

#### Storage

The product is classified as flammable and must be stored in an appropriate manner in compliance with relevant regulations. Do not store near oxidizing agents or combustible materials. Store product in the unopened container in a dry location. Storage information may also be indicated on the product container labelling.

**Optimal Storage: 8 °C to 21 °C. Storage below 8 °C or greater than 28 °C can adversely affect product properties.**

Material removed from containers may be contaminated during use. Do not return product to the original container. Henkel cannot assume responsibility for product which has been contaminated or stored under conditions other than those previously indicated. If additional information is required, please contact your local Technical Service Center or Customer Service Representative.

#### Conversions

$(^{\circ}\text{C} \times 1.8) + 32 = ^{\circ}\text{F}$   
 $\text{kV/mm} \times 25.4 = \text{V/mil}$   
 $\text{mm} / 25.4 = \text{inches}$   
 $\mu\text{m} / 25.4 = \text{mil}$   
 $\text{N} \times 0.225 = \text{lb}$   
 $\text{N/mm} \times 5.71 = \text{lb/in}$   
 $\text{N/mm}^2 \times 145 = \text{psi}$   
 $\text{MPa} \times 145 = \text{psi}$   
 $\text{N}\cdot\text{m} \times 8.851 = \text{lb}\cdot\text{in}$   
 $\text{N}\cdot\text{m} \times 0.738 = \text{lb}\cdot\text{ft}$   
 $\text{N}\cdot\text{mm} \times 0.142 = \text{oz}\cdot\text{in}$   
 $\text{mPa}\cdot\text{s} = \text{cP}$

#### Note:

The information provided in this Technical Data Sheet (TDS) including the recommendations for use and application of the product are based on our knowledge and experience of the product as at the date of this TDS. The product can have a variety of different applications as well as differing application and working conditions in your environment that are beyond our control. Henkel is, therefore, not liable for the suitability of our product for the production processes and conditions in respect of which you use them, as well as the intended applications and results. We strongly recommend that you carry out your own prior trials to confirm such suitability of our product.

Any liability in respect of the information in the Technical Data Sheet or any other written or oral recommendation(s) regarding the concerned product is excluded, except if otherwise explicitly agreed and except in relation to death or personal injury caused by our negligence and any liability under any applicable mandatory product liability law.

**In case products are delivered by Henkel Belgium NV, Henkel Electronic Materials NV, Henkel Nederland BV, Henkel Technologies France SAS and Henkel France SA please additionally note the following:**

In case Henkel would be nevertheless held liable, on whatever legal ground, Henkel's liability will in no event exceed the amount of the concerned delivery.

**In case products are delivered by Henkel Colombiana, S.A.S. the following disclaimer is applicable:**

The information provided in this Technical Data Sheet (TDS) including the recommendations for use and application of the product are based on our

knowledge and experience of the product as at the date of this TDS. Henkel is, therefore, not liable for the suitability of our product for the production processes and conditions in respect of which you use them, as well as the intended applications and results. We strongly recommend that you carry out your own prior trials to confirm such suitability of our product.

Any liability in respect of the information in the Technical Data Sheet or any other written or oral recommendation(s) regarding the concerned product is excluded, except if otherwise explicitly agreed and except in relation to death or personal injury caused by our negligence and any liability under any applicable mandatory product liability law.

**In case products are delivered by Henkel Corporation, Resin Technology Group, Inc., or Henkel Canada Corporation, the following disclaimer is applicable:**

The data contained herein are furnished for information only and are believed to be reliable. We cannot assume responsibility for the results obtained by others over whose methods we have no control. It is the user's responsibility to determine suitability for the user's purpose of any production methods mentioned herein and to adopt such precautions as may be advisable for the protection of property and of persons against any hazards that may be involved in the handling and use thereof. In light of the foregoing, **Henkel Corporation specifically disclaims all warranties expressed or implied, including warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, arising from sale or use of Henkel Corporation's products. Henkel Corporation specifically disclaims any liability for consequential or incidental damages of any kind, including lost profits.** The discussion herein of various processes or compositions is not to be interpreted as representation that they are free from domination of patents owned by others or as a license under any Henkel Corporation patents that may cover such processes or compositions. We recommend that each prospective user test his proposed application before repetitive use, using this data as a guide. This product may be covered by one or more United States or foreign patents or patent applications.

#### Trademark usage

Except as otherwise noted, all trademarks in this document are trademarks of Henkel Corporation in the U.S. and elsewhere. ® denotes a trademark registered in the U.S. Patent and Trademark Office.

#### Reference 0.1

Americas  
+860.571.5100

Europe  
+49.89.320800.1800

Asia  
+86.21.2891.8863

**For the most direct access to local sales and technical support visit [www.henkel.com/industrial](http://www.henkel.com/industrial)**

---

## 6.2 Anexo B. Tecido de fibra de carbono 160 g/m<sup>2</sup>, *plain*



## Woven Carbon Fibre Fabric 160 g/m<sup>2</sup>, Plain

Article: K160L3K

### Properties Woven Carbon fibre fabric:

Total weight per unit area:	160 g/m <sup>2</sup>
Weave type:	Plain
Yarn       warp:	HT-Carbonfibre 3K 200 tex
Yarn       weft:	HT-Carbonfibre 3K 200 tex
End count  warp:	4 threads/cm
End count  weft:	4 threads/cm
Thickness:	0,30 cm
Width:	100 cm

### Properties HT-Carbon fibre:

Tensile strength:	4200 MPa
Tensile modulus:	240 GPa
Fibre density:	1,78 g/cm <sup>3</sup>

*Information contained in this data sheets is up-to-date and correct as at the date of issue. As we can't control or anticipate the conditions under which this product may be used, each user should review the information in specific context of the planned use. We will not be responsible for damages of any nature resulting from the use or reliance upon the information contained in this data sheet.*



---

### 6.3 Anexo C. Tecido de fibra de vidro 220 g/m<sup>2</sup>, *plain*



**GLASS FILAMENT FABRICS for PLASTICS REINFORCEMENT**  
**PRODUCT SPECIFICATION**

			Specification
<b>Style Number</b>	<b>92145</b>	<b>Old ITG desc.</b>	92145 MIL-Y-1140H
<b>US Style</b>			AMS / MIL-C-9084
<b>WLB No.</b>	8.4520.60		DIN 65066
<b>British Standard</b>			BS 3396

<b>Finish/Designatio</b>	FK144
--------------------------	-------

	Unit	Tolerance		Specification
<b>Weave pattern</b>		Plain		DIN ISO 9354
Area weight	g / m <sup>2</sup>	220,0	± 5%	DIN EN 12127
<b>Yarn</b>	tex			DIN EN 12654
warp yarn		EC9-68x5 t0 tex		
weft yarn		EC7-22 tex		
<b>Fibre count</b>	1 / cm			DIN EN 1049
warp ends		6,0	± 5%	
weft picks		7,0	± 5%	

<b>Temperature resistance 1)</b>				
Continuous load	°C	260		
Short time resistance	°C	600		

<b>Moisture content</b>	%	< 0,2		DIN EN 3616
<b>Finish content</b>	%	0,08 - 0,28		DIN ISO 1887
				DIN EN 60

<b>Thickness (approx. dry)</b>	mm	0,25	± 5%	DIN ISO 4603/E
in laminate (43% Vol.)	mm	0,19	± 5%	

All statements herein are expressions of opinion which we believe to be accurate and reliable, but are presented without guarantee or responsibility on our part. Statements concerning possible use of our products are not intended as recommendations for their use in the infringement of any patent. No patent warranty of any kind, express or implied, is made or intended.  
Porcher Industries Germany GmbH, Benzstraße 14, D-89155 Erbach, Telefon +49 (0)7305 / 955-485, Fax +49 (0)7305 / 955-524

## GLASS FILAMENT FABRICS for PLASTICS REINFORCEMENT

### PRODUCT SPECIFICATION

	Unit	Standard	P-D ITG	Tolerance	Specification
<b>Style Number</b>		<b>92145</b>			<b>/ FK144</b>
<b>Tensile Strength</b>					ASTM D 4029
warp	N/cm	626		>	
weft	N/cm			>	
<b>Tensile strength</b>					DIN EN 2747
warp	MPa	630		>	
weft	MPa			>	
<b>Young's-Modulus</b>					
warp	GPa	33		>	
weft	GPa			>	
<b>Compression strength</b>					DIN 53454
warp	MPa	510		>	DIN 65380
weft	MPa			>	DIN prEN 2580
<b>Compression-Modulus</b>					
warp	GPa	28		>	
weft	GPa			>	
<b>Interlaminar shear strength</b>					DIN EN 2377
warp	MPa	50		>	
weft	MPa			>	
<b>Flexural strength</b>					DIN EN 2746
warp	MPa	810		>	
weft	MPa			>	
<b>Flexural-Modulus</b>					
warp	GPa	37		>	
weft	GPa			>	

All statements herein are expressions of opinion which we believe to be accurate and reliable, but are presented without guarantee or responsibility on our part. Statements concerning possible use of our products are not intended as recommendations for their use in the infringement of any patent. No patent warranty of any kind, express or implied, is made or intended.  
 Porcher Industries Germany GmbH, Benzstraße 14, D-89155 Erbach, Telefon +49 (0)7305 / 955-485, Fax +49 (0)7305 / 955-524

**Remarks**

- 1) Temperature resistance for dry fabrics



---

## 6.4 Anexo D. Espuma de PVC





## TECHNICAL DATA

# Divinycell H

### HIGH PERFORMANCE PVC CORE MATERIAL

Divinycell H provides excellent mechanical properties to low weight. The unique PVC chemical structure, yields impressive mechanical performance to a low weight. Divinycell H has been widely used and has a proven track record in virtually every application area where sandwich composites are employed including the marine (leisure, military and commercial), land transportation, wind energy, civil engineering/infrastructure and general industrial markets.

Divinycell H is ideal for applications subject to fatigue, slamming or impact loads. Other key features of Divinycell H include consistent high quality, excellent adhesion/peel strength, excellent chemical resistance, low water absorption and good thermal/acoustic insulation. Divinycell H is compatible with virtually all commonly used resin and manufacturing systems.

### MECHANICAL PROPERTIES DIVINYCELL® H

Property	Test Procedure	Unit		H45	H60	H80	H100	H130	H160	H200	H250
Compressive Strength <sup>1</sup>	ASTM D1621	MPa	Nominal	0.6	0.9	1.4	2.0	3.0	3.4	5.4	7.2
			Minimum	0.5	0.7	1.15	1.65	2.4	2.8	4.5	6.1
Compressive Modulus <sup>1</sup>	ASTM D1621-B-73	MPa	Nominal	50	70	90	135	170	200	310	400
			Minimum	45	60	80	115	145	175	265	350
Tensile Strength <sup>1</sup>	ASTM D1623	MPa	Nominal	1.4	1.8	2.5	3.5	4.8	5.4	7.1	9.2
			Minimum	1.1	1.5	2.2	2.5	3.5	4.0	6.3	8.0
Tensile Modulus <sup>1</sup>	ASTM D1623	MPa	Nominal	55	75	95	130	175	205	250	320
			Minimum	45	57	85	105	135	160	210	260
Shear Strength	ASTM C 273	MPa	Nominal	0.56	0.76	1.15	1.6	2.2	2.6	3.5	4.5
			Minimum	0.46	0.63	0.95	1.4	1.9	2.2	3.2	3.9
Shear Modulus	ASTM C 273	MPa	Nominal	15	20	27	35	50	60	73	97
			Minimum	12	16	23	28	40	50	65	81
Shear Strain	ASTM C 273	%	Nominal	12	20	30	40	40	40	45	45
Density	ISO 845	kg/m <sup>3</sup>	Nominal	48	60	80	100	130	160	200	250

All values measured at +23°C

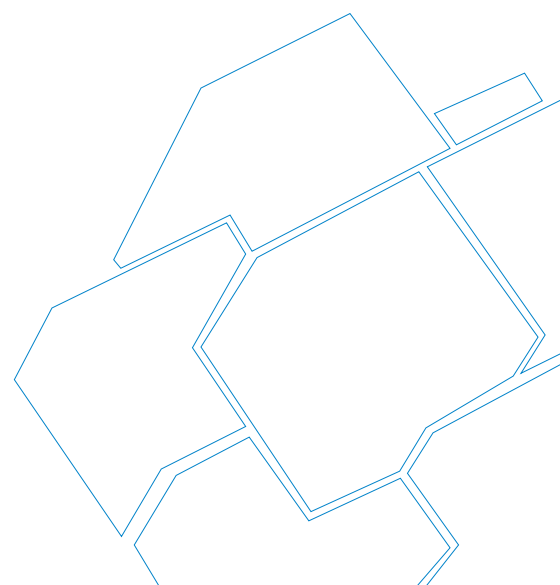
1. Properties measured perpendicular to the plane

Nominal value is an average value of a mechanical property at a nominal density

Minimum value is a minimum guaranteed mechanical property a material has independently of density

### PRODUCT CHARACTERISTICS

- Low water absorption
- Superior damage tolerance
- Fast and easy to process
- Good chemical resistance
- Excellent fatigue properties
- Low resin uptake
- Wide range of properties
- Provides excellent mechanical properties to a low weight



# TECHNICAL CHARACTERISTICS

## TECHNICAL CHARACTERISTICS DIVINYCELL® H

Characteristics <sup>1</sup>	Unit	H45	H60	H80	H100	H130	H160	H200	H250	Test method
Density variation	%	± 10	± 10	± 10	± 10	± 10	± 10	± 10	± 10	-
Thermal conductivity <sup>2</sup>	W/(m·K)	0.028	0.029	0.031	0.033	0.036	0.040	0.044	0.049	EN 12667
Coeff, linear heat expansion	x10 <sup>-6</sup> /°C	40	40	40	40	40	40	40	40	ISO 4897
Heat Distortion Temperature	°C	+125	+125	+125	+125	+125	+125	+125	+125	DIN 53424
Continuous temp range	°C	-200/+70	-200/+70	-200/+70	-200/+70	-200/+70	-200/+70	-200/+70	-200/+70	-
Max process temp	°C	+90	+90	+90	+110	+110	+110	+110	+110	-
Dissipation factor	-	0.0002	0.0003	0.0005	0.0006	0.0009	0.0012	0.0015	0.0019	ASTM D 2520
Dielectric constant	-	1.05	1.06	1.09	1.11	1.15	1.18	1.23	1.29	ASTM D 2520
Poissons ratio <sup>3</sup>	-	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	D638-08

1. Typical values
2. Thermal conductivity at +20°C
3. Standard deviation is 0.045

Continuous operating temperature is typically -200°C to +70°C. The foam can be used in sandwich structures, for outdoor exposure, with external skin temperatures up to +85°C. For optimal design of applications used in high operating temperatures in combination with continuous load, please contact Diab Technical Services for detailed design instructions.

Maximum processing temperature is dependent on time, pressure and process conditions. Therefore users are advised to contact Diab Technical Services to confirm that Divinycell H is compatible with their particular processing parameters.

## PHYSICAL CHARACTERISTICS DIVINYCELL® H

Format		Unit	H45	H60	H80	H100	H130	H160	H200	H250
Plain sheets	Length	mm	2440	2440	2440	2160	1960	1860	1730	1640
	Width	mm	1220	1220	1220	1070	970	915	850	800
GS sheet	Length	mm	1220	1220	1220	1080	980	930	865	-
	Width	mm	813	813	813	1070	970	915	850	-
GS sheet	Length	mm	1220	1220	1220	-	-	-	-	-
	Width	mm	1220	1220	1220	-	-	-	-	-

Divinycell H is type approved by:



**Disclaimer:**

This data sheet may be subject to revision and changes due to development and changes of the material. The data is derived from tests and experience. If not stated as minimum values, the data is average data and should be treated as such. Calculations should be verified by actual tests. The data is furnished without liability for the company and does not constitute a warranty or representation in respect of the material or its use. The company reserves the right to release new data sheets in replacement.

All content in this publication is protected by international copyright laws. Copyright © Diab April 2021.

**Diab Group**

Drottninggatan 7, 5th floor  
 SE-252 21 Helsingborg, Sweden  
 Tel +46 (0) 430 163 00  
 E-mail: info@diabgroup.com

---

## 6.5 Anexo E. Resina epóxi RESOLCOAT 1400-1407



## RESOLCOAT 1400-1407 and Accelerator AC140

### Hot curing epoxy system

**RST 1400 is an epoxy resin**  
**RST 1407 is an anhydride hardener**  
**Accelerator AC140 is an imidazole accelerator**

#### Applications

High performance composite parts

#### Properties

Anhydride-cured, low-viscosity standard matrix system with extremely long pot life. The reactivity of the system is adjustable by variation of the accelerator content. The system is easy to process, has good fibre impregnation properties and exhibits excellent mechanical, dynamic and thermal properties. It has an excellent chemical resistance especially to acids at temperatures up to 80 °C. This epoxy system fulfils MIL specifications R 9300.

#### Processing

Filament Winding, Pultrusion, Pressure Moulding

#### Key Data

##### RST 1400

Aspect (visual) :	clear, pale yellow liquid
Colour (Gardner, ISO 4630) :	<2
Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1) :	10000 - 12000 [mPa s]
Density at 25 °C (ISO 1675) :	1.15 - 1.20 [g/cm <sup>3</sup> ]
Flash point (ISO 2719) :	> 200 [°C]
Storage temperature :	2 - 40 °C [°C]

##### RST 1407

Aspect (visual) :	clear liquid
Colour (Gardner, ISO 4630) :	<2
Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1) :	50 - 100 [mPa s]
Density at 25 °C (ISO 1675) :	1.20 - 1.25 [g/cm <sup>3</sup> ]
Flash point (ISO 2719) :	195 [°C]
Storage temperature :	2 - 40 °C [°C]

##### Accelerator AC104

Aspect (visual) :	clear liquid
Colour (Gardner, ISO 4630) :	<9
Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1) :	<90 [mPa s]
Density at 25 °C (ISO 1675) :	0.95 - 1.05 [g/cm <sup>3</sup> ]
Flash point (ISO 2719) :	92 [°C]
Storage temperature :	2 - 40 °C [°C]

#### Storage

Provided that RST 1400, RST 1407 and Accelerator AC104 are stored in a dry place in their original, properly closed containers at the above mentioned storage temperatures they will have the shelf lives indicated on the labels. Partly emptied containers should be closed immediately after use. Because RST 1407 is sensitive to moisture, storage containers should be ventilated with dry air only. RST 1400 which has crystallized and looks cloudy can be restored to its original state by heating to 60 - 80 °C.

## Processing data

### Mix ratio

Components	Parts by weight	Parts by volume
RST 1400	100	100
RST 1407	90	86
AC140	0.5 – 2	0.6 - 2.4

We recommend that the components are weighed with an accurate balance to prevent mixing inaccuracies which can affect the properties of the matrix system. The components should be mixed thoroughly to ensure homogeneity. It is important that the side and the bottom of the vessel are incorporated into the mixing process. When processing large quantities of mixture the pot life will decrease due to exothermic reaction. It is advisable to divide large mixes into several smaller containers.

### Processing recommendations

To simplify the mixing process the resin can be preheated to about 30 °C to 50 °C before adding the cold hardener. Hardener and accelerator can be premixed, thus allowing the use of two component mixing/metering equipment. The mix of hardener and accelerator has a shelf life of several days. The processing of the system at elevated temperatures of 30 °C to 40 °C shows the best results. The gelation temperature should not be higher than absolutely necessary. A high gelation temperature induces high shrinkage and generates internal stresses.

### Initial mix viscosity

[°C]	[mPa s]
at 25	600 - 900
at 40	200 - 300
at 60	< 75

### Viscosity build-up

(Hoeppler, ISO 9371B)	Components [pbw]		System 1	System 2	System 3
	RST 1400		100	100	100
	RST 1407		90	90	90
	AC104		0.5	1	2
	[°C]	[mPa s]			
at 25	to 1500	[h]	10 - 12	3.5 - 4.5	1.5 - 2
	to 3000	[h]	33 - 37	16 - 18	6 - 7
at 40	to 1500	[h]	19 - 21	7 - 8	3 - 4
	to 3000	[h]	23 - 26	9 - 10	4 - 5
at 80	to 1500	[min]	95 - 105	52 - 57	32 - 35
	to 3000	[min]	105 - 115	60 - 65	35 - 38
at 90	to 1500	[min]			14 - 16
	to 3000	[min]			15 - 17

**Pot life**

 (Tecam, 65 % RH,  
 100 g)  
 10 kg metal  
 container

$^{\circ}\text{C}$		System 1	System 2	System 3
at 23	[h]	165 - 175	95 - 105	48 - 54
at 40	[h]	5 - 7	4 - 5	-

**Gel time**

(Hot plate)

$^{\circ}\text{C}$		System 1	System 2	System 3
at 80	[min]	230 - 270	140 - 160	65 - 75
at 100	[min]	65 - 75	35 - 45	18 - 22
at 120	[min]	21 - 25	10 - 12	5 - 7
at 140	[min]	7 - 9	3 - 5	1 - 3
at 160	[min]	2 - 4	1 - 2	-

The values shown are for small amounts of pure resin/hardener mix. In composite structures the gel time can differ significantly from the given values depending on the fibre content and the laminate thickness.

**Typical cure cycles**

Gelation either	2 - 4 h at 80 °C
or	1 - 3 h at 90 °C
Post-cure either	4 - 8 h at 120 °C
or	2 - 8 h at 140 °C
or	2 - 8 h at 160 °C

Cure temperatures in excess of about 130 °C cause brown discolouration but do not impair the properties of the product.

## Properties of the cured, neat formulation

Unless otherwise stated, the processing schedule for the samples tested was gelation for 4 hours at 80 °C and post-cure for 8 hours at 140 °C.

**Glass transition temperature ( $T_g$ )**

 (IEC 1006,  
 10 K/min)

Cure:	$T_g$ DSC [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_g$ Kinemat [ $^{\circ}\text{C}$ ] Or TMA [ $^{\circ}\text{C}$ ]
4 h 80 °C + 4 h 120 °C	140 - 144	125 - 128
4 h 80 °C + 8 h 120 °C	144 - 148	125 - 128
4 h 80 °C + 4 h 140 °C	145 - 150	130 - 135
4 h 80 °C + 8 h 140 °C	148 - 153	135 - 145
4 h 80 °C + 4 h 160 °C	150 - 155	140 - 145
4 h 80 °C + 8 h 160 °C	150 - 155	140 - 145

**Tensile test**

(ISO 527)	Tensile strength	[Mpa]	83 - 93
	Elongation at tensile strength	[%]	4.2 - 5.6
	Ultimate strength	[Mpa]	80 - 90
	Ultimate elongation	[%]	5.0 - 7.0
	Tensile modulus	[Mpa]	3100 - 3300

**Flexural test**

(ISO 178)	Flexural strength	[Mpa]	125 - 135
	Deflection at maximum load	[mm]	10 - 18
	10 days in H <sub>2</sub> O 23 °C		
	Flexural strength	[Mpa]	110 - 120
	Deflection at maximum load	[mm]	8 - 18
	60 min in H <sub>2</sub> O/100 °C		
	Flexural strength	[Mpa]	125 - 135
	Deflection at maximum load	[mm]	10 - 18

**Fracture properties Bend notch test**

(PM 258-0/90)	Fracture toughness K <sub>1C</sub>	[Mpa√m]	0.56 - 0.6
	Fracture energy G <sub>1C</sub>	[J/m <sup>2</sup> ]	88 - 96

**Water absorption**

(ISO 62)	<i>Immersion:</i>		
	1 day H <sub>2</sub> O 23 °C	[%]	0.10 - 0.15
	10 days H <sub>2</sub> O 23 °C	[%]	0.30 - 0.40
	30 min H <sub>2</sub> O 100 °C	[%]	0.10 - 0.15
	60 min H <sub>2</sub> O 100 °C	[%]	0.15 - 0.20

**Coefficient of linear thermal expansion**

(DIN 53 752)	<i>Mean value:</i>		
	α from 20 - 100 °C	[10 <sup>-6</sup> /K]	55 - 57
	α from 100 - 130 °C	[10 <sup>-6</sup> /K]	67 - 70

**Poisson's ratio**

	[μ]	0.35
--	-----	------

## Properties of the cured, reinforced formulation

Unless otherwise stated, the figures given are for pressed laminate samples comprising 16 layers (4 mm) of E-glass fabric 1:1, 280 - 300 g/m<sup>2</sup>, fibre volume content 42 - 47 %.

### Flexural test

(ISO 178)	Flexural strength	[Mpa]	520 - 550
	Deflection at maximum load	[mm]	5 - 6
	Flexural modulus	[Mpa]	16500 - 16700
	10 days in H <sub>2</sub> O 23 °C		
	Flexural strength	[Mpa]	390 - 410
	Deflection at maximum load	[mm]	4 - 5
	60 min in H <sub>2</sub> O/100 °C		
	Flexural strength	[Mpa]	460 - 480
	Deflection at maximum load	[mm]	5 - 6

### Tensile test

(ISO 3268 - 1978)	Tensile strength	[Mpa]	345 - 375
	Ultimate elongation	[%]	1 - 2
	Tensile modulus	[Mpa]	25500 - 26000

### Interlaminar shear strength

(ASTM D 2344) Short beam : E-glass unidirectional specimen  
 Laminate thickness t = 6.4 mm  
 Fibre volume content: 60 %

Shear strength :	[Mpa]	75 - 77
------------------	-------	---------

### Water absorption

(ISO 62)	<i>Immersion:</i>		
	1 day H <sub>2</sub> O 23 °C	[%]	0.15 - 0.20
	10 days H <sub>2</sub> O 23 °C	[%]	0.25 - 0.30
	30 min H <sub>2</sub> O 100 °C	[%]	0.01 - 0.05
	60 min H <sub>2</sub> O 100 °C	[%]	0.03 - 0.07

### Tensile, Compressive and Torsional test

E-glass	Roving	E-glass roving, 1200 tex, silane finish
	Fibre volume content	67 %
	Gelation temperature	90 °C
	Post-cure	8 h at 140 °C
Carbon HT	Roving	Carbon fibre high tensile,
		Torayca T 300 B - 6000 - 50 B
	Fibre volume content	64 %
	Gelation temperature	90 °C
	Post-cure	8 h at 140 °C



		<i>E-Glass</i>	<i>Carbon HT</i>
<b><i>Transverse tensile test</i></b>			
Tensile strength	[Mpa]	48 - 55	77 - 85
Tensile strain	[%]	0.25 - 0.33	0.9 - 1.0
Elastic modulus	[Mpa]	18000 – 20000	9300 - 9900
<b><i>Transverse compressive test</i></b>			
Compressive strength	[Mpa]	165 - 175	190 - 206
Compressive strain at brak	[%]	1.2 - 1.4	2.7 - 3.4
Elastic modulus	[Mpa]	20000 - 22000	9700 - 9900
<b><i>Torsional test</i></b>			
Shear strength	[Mpa]	77 - 82	76 - 80
Shear angle	[%]	2.7 - 3.1	3.3 - 4.0
Shear modulus	[Mpa]	6100 – 7100	6000 - 6300

**Handling precautions**

Mandatory and recommended industrial hygiene procedures should be followed whenever our products are being handled and processed. For additional information please consult the corresponding product safety data sheets and the brochure edited by the APME “Epoxy Resins and reticulation agents – Toxicology, Hygienic and environmental precautions”

**Personal hygiene**

*Safety precautions at workplace*

protective clothing	yes
gloves	essential
arm protectors	recommended when skin contact likely
goggles/safety glasses	yes

*Skin protection*

before starting work	Apply barrier cream to exposed skin
after washing	Apply barrier or nourishing cream

*Cleansing of contaminated skin*

Dab off with absorbent paper, wash with warm water and alkali-free soap, then dry with disposable towels. Do not use solvents

*Disposal of spillage*

Soak up with sawdust or cotton waste and deposit in plastic-lined bin

*Ventilation*

of workshop	Renew air 3 to 5 times an hour
of workplaces	Exhaust fans. Operatives should avoid inhaling vapours



#### First aid

Contamination of the *eyes* by resin, hardener or mix should be treated immediately by flushing with clean, running water for 10 to 15 minutes. A doctor should then be consulted. Material smeared or splashed on the *skin* should be dabbed off, and the contaminated area then washed and treated with a cleansing cream (see above). A doctor should be consulted in the event of severe irritation or burns. Contaminated clothing should be changed immediately. Anyone taken ill after *inhaling* vapours should be moved out of doors immediately. In all cases of doubt call for medical assistance.

