



## Estudo numérico de juntas adesivas mistas solicitadas ao impacto

LUIS ANTONIO SALGUEIRO MAIA

novembro de 2018

# **ESTUDO NUMÉRICO DE JUNTAS ADESIVAS MISTAS SOLICITADAS AO IMPACTO**

Luís António Salgueiro Maia

1090825

**2018**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica





# **ESTUDO NUMÉRICO DE JUNTAS ADESIVAS MISTAS SOLICITADAS AO IMPACTO**

Luís António Salgueiro Maia

1090825

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 Eduardo André de Sousa Marques, do Mestre José Joaquim da Mota Machado e do Doutor Lucas Filipe Martins da Silva.

**2018**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica





## **JÚRI**

### **Presidente**

Doutora Sandra Cristina de Faria Ramos, Professor adjunto, ISEP

### **Orientador**

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, Professor adjunto, ISEP

### **Coorientadores**

Doutor Eduardo André de Sousa Marques, Professor Adjunto Convidado, ISEP

Mestre José Joaquim da Mota Machado, Investigador, FEUP

Doutor Lucas Filipe Martins da Silva, Professor Associado, FEUP

### **Arguente**

Doutor Ricardo João Camilo Carbas, Investigador, FEUP



## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e aos meus coorientadores Doutor Eduardo André de Sousa Marques e ao Engenheiro José Joaquim da Mota Machado pela oportunidade proporcionada e por todo o apoio e disponibilidade prestada ao longo de toda a dissertação.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, pelos conhecimentos transmitidos ao longo da minha licenciatura em Engenharia Mecânica e do Mestrado em Construções Mecânicas que permitiram a elaboração deste trabalho.

Por fim, mas não menos importante, à minha família, e em especial à minha namorada por todo o apoio, encorajamento e paciência ao longo desta jornada.



## PALAVRAS CHAVE

Análise de Elementos Finitos; Impacto; Junta mista de sobreposição simples; modelos de dano coesivo; resistência de junta; análise de tensões, otimização geométrica.

## RESUMO

As indústrias em geral aumentaram significativamente o uso de ligações adesivas com maior ênfase nas indústrias automóvel e espacial. A utilização deste tipo de ligações traz inúmeras vantagens comparativamente com as ligações tradicionais tais como ligações mecânicas (rebites e parafusos, que introduzem concentrações de tensão que reduzem a resistência das estruturas), ligações soldadas (impossível de ligar diferentes tipos de materiais). As juntas adesivas podem ser uma mais-valia, quando se pretende ligar materiais diferentes, ou reduzir o peso, que neste tipo de indústrias significa redução no consumo de combustíveis. Um dos principais parâmetros destas indústrias é a segurança e, desta forma, a resistência ao impacto é um fator muito importante a ter em conta. Assim, as juntas adesivas devem ser capazes de suportar cargas elevadas sem quebrar a ligação prematuramente. As juntas adesivas mistas são uma opção que tem vindo a ser adotada, e que consiste na utilização de um adesivo flexível e de outro rígido, que proporciona um melhor desempenho das estruturas devido à melhor distribuição de tensões, o que torna a junta mais resistente.

Este trabalho procurou explorar o comportamento de juntas adesivas mistas ao impacto com substratos em aço. É possível aumentar o desempenho ao impacto de juntas adesivas sem efetuar alterações complexas de projeto, com a variação de parâmetros de geometria ou com a introdução de alterações geométricas nos aderentes. Serão comparados neste trabalho os resultados de diferentes alterações geométricas numa junta mista de sobreposição simples (JMSS) solicitada ao impacto através de modelos de dano coesivo (MDC). As alterações geométricas realizadas são a variação do comprimento de sobreposição e a variação de espessura dos aderentes. As variações de geometria realizadas são a introdução de chanfros interiores e exteriores nos aderentes e a adição de filetes de adesivo. Posteriormente serão realizadas combinações de alterações geométricas para a obtenção de uma junta ótima.

O modelo numérico foi validado com sucesso e, desta forma, foi possível partir para o estudo numérico, no qual se conseguiram obter aumentos de resistência significativos ao impacto através da técnica das juntas mistas e da realização de alterações geométricas.



## KEYWORDS

Finite Element Method; Impact; Mixed Single-lap Joint; Cohesive zone Modelling; Joint strength; Stress analysis, Geometric optimization.

## ABSTRACT

Industries in general have significantly increased the use of adhesive bonds, with emphasis on the automotive and aerospace industries. The use of this type of joining method brings many advantages compared to traditional joints, such as mechanical joints (rivets and screws, which introduce stress concentrations that reduce the strength of the structures), welded joints (impossible to join different types of materials). Adhesive joints can be an advantage, when it is necessary to join different materials, or reduce the weight which, in this type of industries, means reduction in fuel consumption. One of the key parameters of these industries is safety and, thus, the impact strength is a very important factor to take into account. Thus, the adhesive joints must be able to withstand high loads without failing prematurely. Mixed adhesive joints are an option that consists on the use of a flexible adhesive and a rigid adhesive, which provides a better performance of the structures due to the better distribution of stresses and makes the joint more resistant.

This work investigated the behaviour of mixed adhesive joints with steel adherends. It is possible to increase the impact performance of adhesive joints without making complex design changes, with the variation of geometry parameters or with the introduction of geometric changes in the adhesives. The results of different geometric changes in impact-loaded mixed single-lap joint (MSLJ) by cohesive zone models (CZM) will be compared in this work. The tested geometric changes are the overlap length and the adherends' thickness. The variations of geometry performed are the introduction of inner and outer chamfers on the adherends, and the addition of adhesive fillets. Subsequently, combinations of geometric changes will be made to obtain an optimal joint.

The numerical model was successfully validated and, in this way, it was possible to proceed to the numerical study, in which it was possible to obtain significant impact strength improvements by the mixed joining technique and the accomplishment of geometric modifications.



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

CMTC	<i>Critério Máximo de Tensão de corte</i>
COH2D4	<i>4-node two-dimensional cohesive element</i>
CPE3	<i>3-node linear plane strain triangle</i>
CPE4R	<i>4-node bilinear plane strain quadrilateral, reduced integration, hourglass control</i>
CSTRESS	<i>Contact stresses</i>
CTNM	<i>Critério Tensão Normal Máximo</i>
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
JMSS	Junta Mista de Sobreposição Simples
JSS	Junta de sobreposição simples
MDC	Modelos de Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFX	Método de Elementos Finitos eXtendido
MFLE	Método de Mecânica da Fratura Linear Elastica
PEEQ	<i>Equivalent plastic strain</i>
RF	<i>Reaction forces and moments</i>
SDEG	<i>Scalar stiffness degradation</i>
SHPB	<i>Split Hopkinson Pressure Bar</i>
STATUS	<i>Status variable</i>
TAST	<i>Thick Adherent Shear Test</i>

---

TFFV	Técnica de Fecho da Fenda Virtual
------	-----------------------------------

---

U	<i>Translations and rotations</i>
---	-----------------------------------

---

### Lista de Símbolos

---

$E$	Energia
-----	---------

---

$E_c$	Energia cinética
-------	------------------

---

$E_p$	Energia potencial
-------	-------------------

---

$e$	Espessura do aderente
-----	-----------------------

---

$F$	Carga externa
-----	---------------

---

$g$	Aceleração da gravidade
-----	-------------------------

---

$G$	Taxa de libertação de energia
-----	-------------------------------

---

$G_c$	Taxa crítica de libertação de energia
-------	---------------------------------------

---

$G_{IC}$	Tenacidade à tração
----------	---------------------

---

$G_{IIC}$	Tenacidade ao corte
-----------	---------------------

---

$h_0$	Altura de queda
-------	-----------------

---

$L_0$	Comprimento de sobreposição
-------	-----------------------------

---

$m$	Massa
-----	-------

---

$P$	Carga aplicada
-----	----------------

---

$P_{max}$	Carga máxima aplicada
-----------	-----------------------

---

$t_m^0$	Resistência coesiva em modo misto
---------	-----------------------------------

---

$t_n$	Tensão coesiva à tração
-------	-------------------------

---

$t_n^0$	Resistência coesiva à tração
---------	------------------------------

---

$t_s$	Tensão coesiva ao corte
-------	-------------------------

---

---

$t_{s0}$	Resistência coesiva ao corte
$U$	Deslocamento
$\alpha$	Ângulo de chanfro exterior
$\beta$	Ângulo de chanfro interior
$\delta$	Deslocamento
$\delta_{\max}$	Deslocamento máximo
$\epsilon_f$	Deformação plástica dos aderentes
$\epsilon_n$	Deformação à tração
$\epsilon_s$	Deformação ao corte
$\theta$	Ângulo de filete de adesivo
$\nu$	Coefficiente de poisson
$\rho$	Densidade
$\sigma_f$	Tensão de rotura à tração
$\sigma_y$	Tensão de arrancamento
$\tau_{\text{média}}$	Tensão de corte média
$\tau_{xy}$	Tensão de corte

---



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Construções em argila [2] .....	7
Figura 2. Constituição típica de uma junta adesiva .....	9
Figura 3. Constituição do avião Boeing 787 [7] .....	11
Figura 4. Uso de ligações adesivas no Airbus A380 [8].....	12
Figura 5. Banco automóvel em espuma poliuretano [9] .....	12
Figura 6. Representação esquemática de um colete à prova de bala [10].....	13
Figura 7. Tipos de esforços em ligações adesivas [11] .....	13
Figura 8. Relação entre comprimento e largura de sobreposição da junta [3] .....	14
Figura 9. Rotura coesiva [12] .....	15
Figura 10. Rotura adesiva [12].....	15
Figura 11. Rotura mista [13] .....	15
Figura 12. Rotura do substrato [12] .....	16
Figura 13. Junta topo a topo [12] .....	17
Figura 14. Junta de sobreposição simples [12].....	18
Figura 15. Junta de sobreposição dupla [12].....	18
Figura 16. Junta c/ chanfro exterior [12] .....	18
Figura 17. Junta c/ chanfro interior [12].....	18
Figura 18. Cobre Junta [12] .....	18
Figura 19. Cobre junta dupla [12].....	19
Figura 20. Junta em degrau [12].....	19
Figura 21. Junta de ressalto [12] .....	19
Figura 22. Distribuição de tensões quando solicitado ao corte/arrancamento [3].....	20
Figura 23. Relação entre carga versus comprimento sobreposição em adesivos flexíveis e rígido [3].....	22
Figura 24. Esquema de distribuição de tensão de corte em juntas com adesivo dúctil, rígido e mistas [18] .....	24
Figura 25. Ensaio de tração com medidor ótico [4].....	25
Figura 26. Gráfico típico curva tensão-deformação [4].....	26

Figura 27. Esquema representativo teste Split Hopkinson [29] .....	28
Figura 28. Teste bloco de impacto [4] .....	29
Figura 29. Modos possíveis de impacto [4] .....	29
Figura 30. Exemplo de modelo de Voigt de três e cinco elementos [53] .....	35
Figura 31. Representação da lei tração-separação para o modo 1 e 2 [83] .....	39
Figura 32. Esquema $c/$ medidas provetes e adesivos usados [89] .....	40
Figura 33. Geometria das juntas (dimensões em mm) [18] .....	41
Figura 34. Resultados obtidos [18] .....	41
Figura 35. Geometria de uma JMSS [17] .....	42
Figura 36. Definição das secções para os constituintes das juntas em estudo .....	45
Figura 37. Condições fronteira do modelo 2D da JMSS.....	46
Figura 38. Velocidade aplicada à massa .....	47
Figura 39. Malha aplicada ao modelo de validação .....	47
Figura 40. Lei triangular do MDC.....	48
Figura 41. Geometria e dimensões da junta JMSS .....	50
Figura 42. Sistema de fixação das JSS [104] .....	53
Figura 43. Curva $P-\delta$ de validação da JMSS DP8005+AV138 .....	54
Figura 44. Comparação de resultado obtido com os valores de referência .....	54
Figura 45. Curvas $P-\delta$ de validação dos adesivos DP8005+AV138 com propriedades de referência e estimadas .....	55
Figura 46. Comparação de resultados obtidos com valores de referência para os adesivos DP8005+AV138 .....	55
Figura 47. Curva $P-\delta$ de validação dos adesivos RTV106+AV138 .....	56
Figura 48. Comparação do resultado obtido com valores de referência para JMSS RTV+AV138 .....	56
Figura 49. Curva $P-\delta$ de validação dos adesivos RTV106+AV138 .....	57
Figura 50. Comparação de resultados com valores de referência para os adesivos RTV106+AV138 .....	57
Figura 51. Geometria e dimensões da JMSS para o estudo do efeito da variação de $L_0$ (A representa o adesivo flexível e B representa o adesivo rígido).....	60
Figura 52. Malha do modelo com $L_0=12,5$ mm.....	61
Figura 53. Malha do modelo com $L_0=25$ mm.....	61
Figura 54. Malha do modelo com $L_0=37,5$ mm.....	61

Figura 55. Malha do modelo com $L_0=50$ mm.....	61
Figura 56. Distribuição de tensões $\tau_{xy}$ para os adesivos DP8005+AV138.....	62
Figura 57. Distribuição de tensões $\sigma_y$ para os adesivos DP8005+AV138 .....	63
Figura 58. Distribuição de tensões $\tau_{xy}$ para os adesivos RTV106+AV138.....	63
Figura 59. Distribuição de tensões $\sigma_y$ para os adesivos RTV106+AV138.....	64
Figura 60. Distribuição de tensões $\tau_{xy}$ para os adesivos DP8005+XNR6852E-2 .....	65
Figura 61. Distribuição de tensões $\sigma_y$ para os adesivos DP8005+XNR6852E-2 .....	65
Figura 62. Curvas $P-\delta$ dos adesivos DP8005+AV138 para os vários comprimentos de sobreposição .....	66
Figura 63. Deformação plástica para a combinação DP8005+AV138 para $L_0=50$ mm .....	68
Figura 64. Curvas $P-\delta$ dos adesivos RTV106+AV138 para os vários comprimentos de sobreposição.....	68
Figura 65. Curvas $P-\delta$ dos adesivos DP8005+XNR6852E-2 para os vários comprimentos de sobreposição .....	70
Figura 66. Deformação plástica com a combinação DP8005+XNR6852E-2 para $L_0=37,5$ mm .....	71
Figura 67. Deformação plástica com a combinação DP8005+XNR6852E-2 para $L_0=50$ mm .....	71
Figura 68. Resumo cargas máximas para as várias combinações de adesivos em função de $L_0$ .....	72
Figura 69. Dimensões da JMSS para o estudo do efeito de $e$ (A representa o adesivo flexível e B representa o adesivo rígido).....	72
Figura 70. Atribuição de materiais para o modelo com $e=4$ mm .....	73
Figura 71. Controlo de malha para o modelo com $e=4$ mm.....	73
Figura 72. Malha do modelo com $e=1$ mm.....	73
Figura 73. Malha do modelo com $e=2$ mm.....	73
Figura 74. Malha do modelo com $e=3$ mm.....	74
Figura 75. Malha utilizada no modelo com $e=4$ mm .....	74
Figura 76. Distribuição de tensões de corte para os adesivos DP8005+AV138 em função de $e$ .....	75
Figura 77. Distribuição de tensões de arrancamento para os adesivos DP8005+AV138 em função de $e$ .	76
Figura 78. Distribuição de tensões de corte para a combinação de adesivos RTV106+AV138 em função de $e$ .....	76
Figura 79. Distribuição de tensões de arrancamento para a combinação de adesivos RTV106+AV138 em função de $e$ .....	77
Figura 80. Distribuição de tensões de corte para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2 em função de $e$ .....	78

Figura 81. Distribuição de tensões de arrancamento para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2 em função de $e$ .....	78
Figura 82. Curva $P$ - $\delta$ para a combinação de adesivos DP8005+AV138 em função de $e$ .....	79
Figura 83. Curva $P$ - $\delta$ para a combinação de adesivos RTV106+AV138 em função de $e$ .....	80
Figura 84. Curva $P$ - $\delta$ para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2 em função de $e$ .....	82
Figura 85. Deformação plástica combinação DP8005+XNR6852E-2 para $e=1$ mm .....	83
Figura 86. Resumo cargas máximas para as várias combinações de adesivos em função de $e$ .....	84
Figura 87. Geometria da JMSS para o estudo da variação de $\alpha$ .....	84
Figura 88. Controlo de malha para a JMSS para $\alpha=45^\circ$ .....	85
Figura 89. Malha do modelo com $\alpha=60^\circ$ .....	85
Figura 90. Malha do modelo com $\alpha=45^\circ$ .....	85
Figura 91. Malha do modelo com $\alpha=30^\circ$ .....	85
Figura 92. Malha do modelo com $\alpha=15^\circ$ .....	86
Figura 93. Malha do modelo com $\alpha=7,5^\circ$ .....	86
Figura 94. Distribuição de tensões de corte para a combinação DP8005+AV138 em função de $\alpha$ .....	87
Figura 95. Distribuição de tensões de arrancamento para a combinação DP8005+AV138 em função de $\alpha$ .....	87
Figura 96. Concentração de tensões para o modelo com $\alpha=60^\circ$ .....	88
Figura 97. Concentração de tensões para o modelo com $\alpha=7,5^\circ$ .....	88
Figura 98. Distribuição de tensões de corte para a combinação RTV106+AV138 em função de $\alpha$ .....	89
Figura 99. Distribuição de tensões de arrancamento para a combinação RTV106+AV138 em função de $\alpha$ .....	89
Figura 100. Distribuição de tensões de corte para a combinação DP8005+XNR6852E-2 em função de $\alpha$ .....	90
Figura 101. Distribuição de tensões de arrancamento para a combinação DP8005+XNR6852E-2 em função de $\alpha$ .....	90
Figura 102. Curva $P$ - $\delta$ para a combinação de adesivos DP8005+AV138 em função de $\alpha$ .....	91
Figura 103. Curva $P$ - $\delta$ para a combinação de adesivos RTV106+AV138 em função de $\alpha$ .....	93
Figura 104. Curva $P$ - $\delta$ para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2 em função de $\alpha$ .....	94
Figura 105. Geometria e dimensões da JMSS para o estudo da variação de $\beta$ .....	96
Figura 106. Controlo de malha para o modelo com $\beta=30^\circ$ .....	96
Figura 107. Identificação e atribuição de materiais para as várias secções no modelo com $\beta=30^\circ$ .....	96

Figura 108. Visualização da malha do modelo com $\beta=60^\circ$ .....	97
Figura 109. Visualização da malha do modelo com $\beta=45^\circ$ .....	97
Figura 110. Visualização da malha do modelo com $\beta=30^\circ$ .....	97
Figura 111. Visualização da malha do modelo com $\beta=15^\circ$ .....	97
Figura 112. Visualização da malha do modelo com $\beta=7,5^\circ$ .....	97
Figura 113. Distribuição de tensões de corte para a combinação de adesivos DP8005+AV138.....	98
Figura 114. Concentração de tensões nos limites do chanfro interior para $\beta=15^\circ$ para DP8005+AV138 .....	99
Figura 115. Distribuição de tensões de arrancamento para a combinação de adesivos DP8005+AV138 .	99
Figura 116. Distribuição de tensões de corte para a combinação de adesivos RTV106+AV138 .....	100
Figura 117. Distribuição de tensões de arrancamento para a combinação de adesivos RTV106+AV138	100
Figura 118. Distribuição de tensões de corte para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2 ....	101
Figura 119. Distribuição de tensões de arrancamento para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E- 2 .....	101
Figura 120. Curva $P-\delta$ para a combinação de adesivos DP8005+AV138 em função de $\beta$ .....	102
Figura 121. Curva $P-\delta$ para a combinação de adesivos RTV106+AV138 em função de $\beta$ .....	104
Figura 122. Curva $P-\delta$ para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2 em função de $\beta$ .....	105
Figura 123. Geometria da JMSS para o estudo do efeito de $\theta$ .....	106
Figura 124. Controlo de malha para o modelo com $\theta=45^\circ$ .....	106
Figura 125. Atribuição de materiais no modelo com $\theta=45^\circ$ .....	107
Figura 126. Malha do modelo com $\theta=7,5^\circ$ .....	107
Figura 127. Malha do modelo com $\theta=15^\circ$ .....	107
Figura 128. Malha do modelo com $\theta=30^\circ$ .....	107
Figura 129. Malha do modelo com $\theta=45^\circ$ .....	107
Figura 130. Malha do modelo com $\theta=60^\circ$ .....	108
Figura 131. Distribuição de tensões de corte para os adesivos DP8005+AV138 em função de $\theta$ .....	109
Figura 132. Distribuição de tensões de arrancamento para os adesivos DP8005+AV138 em função de $\theta$ .....	109
Figura 133. Distribuição de tensões de corte para os adesivos RTV106+AV138 em função de $\theta$ .....	110
Figura 134. Distribuição de tensões de arrancamento para os adesivos RTV106+AV138 em função de $\theta$ .....	110

Figura 135. Distribuição de tensões de corte para os adesivos DP8005+XNR6852E-2 em função de $\theta$ .	111
Figura 136. Distribuição de tensões de arrancamento para os adesivos DP8005+XNR6852E-2.....	111
Figura 137. Curvas P- $\delta$ para a combinação de adesivos DP8005+AV138 em função de $\theta$ .....	112
Figura 138. Curvas P- $\delta$ para a combinação de adesivos RTV106+AV138 em função de $\theta$ .....	113
Figura 139. Curvas P- $\delta$ para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2 em função de $\theta$ .....	115
Figura 140. Geometria da JMSS para o estudo de otimização geométrica .....	117
Figura 141. Modelo combinado os adesivos DP8005+AV138 .....	117
Figura 142. Malha do modelo combinado para os adesivos DP8005+AV138 .....	117
Figura 143. Distribuição de tensões de corte para a combinação DP8005+AV138 .....	118
Figura 144. Distribuição de tensões de arrancamento para a combinação DP8005+AV138 .....	119
Figura 145. Curva P- $\delta$ para a configuração DP8005+AV138 otimizada.....	119
Figura 146. Modelo combinado para os adesivos RTV106+AV138 .....	121
Figura 147. Malha do modelo combinado para os adesivos RTV106+AV138 .....	121
Figura 148. Distribuição de tensões de corte para a combinação RTV106+AV138.....	122
Figura 149. Distribuição de tensões de arrancamento para a combinação RTV106+AV138 .....	122
Figura 150. Curvas P- $\delta$ para a configuração RTV106+AV138 .....	123
Figura 151. Modelo combinado para os adesivos DP8005+XNR6852E-2.....	124
Figura 152. Malha do modelo combinado para os adesivos DP8005+XNR6852-E.....	124
Figura 153. Distribuição de tensões de corte para os adesivos DP8005+XNR6852E-2 .....	125
Figura 154. Distribuição de tensões de arrancamento para os adesivos DP8005+XNR6852E-2.....	125
Figura 155. Curvas P- $\delta$ para a os adesivos DP8005+XNR6852E-2 .....	126

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Evolução histórica dos adesivos [3] .....	8
Tabela 2. Caracterização dos constituintes de uma junta adesiva [4].....	10
Tabela 3. Diferenças entre juntas mecânicas e adesivas [5] .....	10
Tabela 4. Propriedades adesivas quanto à sua composição química [3] .....	16
Tabela 5. Classificação de adesivos quanto à forma [3].....	17
Tabela 6. Diferenças entre os testes Charpy e Izod.....	27
Tabela 7. Propriedades dos aderentes [90].....	50
Tabela 8. Propriedades dos adesivos [90] .....	51
Tabela 9. Parâmetros coesivos [90].....	52
Tabela 10. Propriedades estáticas do adesivo XNR6852E-2 [90] .....	59
Tabela 11. Parâmetros coesivos XNR6852E-2 em função da velocidade [90].....	60
Tabela 12. Número de elementos em função de $L_0$ .....	61
Tabela 13. Influência de $L_0$ na carga máxima para a JMSS DP8005+AV138 .....	66
Tabela 14. Energia absorvida JMSS DP8005+AV138 em função de $L_0$ .....	67
Tabela 15. Influência de $L_0$ na carga máxima para a JMSS RTV106+AV138 .....	69
Tabela 16. Energia absorvida JMSS RTV106+AV138 em função de $L_0$ .....	69
Tabela 17. Influência de $L_0$ na carga máxima para a JMSS DP8005+XNR6852E-2.....	70
Tabela 18. Energia absorvida JMSS DP8005+XNR6852E-2 em função de $L_0$ .....	71
Tabela 19. Número de elementos em função de $e$ .....	74
Tabela 20. Influência de $e$ na carga máxima para a JMSS DP8005+AV138 .....	79
Tabela 21. Energia absorvida JMSS DP8005+AV138 em função de $e$ .....	80
Tabela 22. Influência de $e$ na carga máxima para a JMSS RTV106+AV138 .....	81
Tabela 23. Energia absorvida JMSS RTV106+AV138 em função de $e$ .....	81
Tabela 24. Influência de $e$ na carga máxima para a JMSS DP8005+XNR6852E-2 .....	82
Tabela 25. Energia absorvida JMSS DP8005+XNR6852E-2 em função de $e$ .....	83
Tabela 26. Número de elementos em função de $\alpha$ .....	86
Tabela 27. Influência de $\alpha$ na carga máxima para a JMSS DP8005+AV138.....	92

Tabela 28. Energia absorvida JMSS DP8005+AV138 em função de $\alpha$ .....	92
Tabela 29. Influência de $\alpha$ na carga máxima para a JMSS RTV106+AV138 .....	93
Tabela 30. Energia absorvida JMSS RTV106+AV138 em função de $\alpha$ .....	94
Tabela 31. Influência de $\alpha$ na carga máxima para a JMSS DP8005+XNR6852E-2 em função de $\alpha$ .....	95
Tabela 32. Energia absorvida JMSS DP8005+XNR6852E-2 em função de $\alpha$ .....	95
Tabela 33. Número de elementos em função de $\beta$ .....	98
Tabela 34. Influência de $\beta$ na carga máxima para a JMSS DP8005+AV138 .....	103
Tabela 35. Energia absorvida JMSS DP8005+AV138 em função de $\beta$ .....	103
Tabela 36. Influência de $\beta$ na carga máxima para a JMSS RTV106+AV138 .....	104
Tabela 37. Energia absorvida JMSS RTV106+AV138 em função de $\beta$ .....	104
Tabela 38. Influência de $\beta$ na carga máxima para a JMSS DP8005+XNR6852E-2 .....	105
Tabela 39. Energia absorvida JMSS DP8005+XNR6852E-2 em função de $\beta$ .....	106
Tabela 40. Número de elementos em função de $\theta$ .....	108
Tabela 41. Influência de $\theta$ na carga máxima para a JMSS DP8005+AV138 .....	112
Tabela 42. Energia absorvida JMSS DP8005+AV138 em função de $\theta$ .....	113
Tabela 43. Influência de $\theta$ na carga máxima para a JMSS RTV106+AV138 .....	114
Tabela 44. Energia absorvida JMSS RTV106+AV138 em função de $\theta$ .....	114
Tabela 45. Influência de $\theta$ na carga máxima para a JMSS DP8005+XNR6852E-2 .....	115
Tabela 46. Energia absorvida JMSS DP8005+XNR6852E-2 em função de $\theta$ .....	116
Tabela 47. Elementos para o modelo combinado com os adesivos DP8005+AV138 .....	117
Tabela 48. Comparação de resultados para a combinação DP8005+AV138 .....	120
Tabela 49. Comparação energia absorvida obtida para a combinação DP8005+AV138 .....	120
Tabela 50. Número de elementos para o modelo combinado para os RTV106+AV138 .....	121
Tabela 51. Comparação de resultados para os adesivos RTV106+AV138 .....	123
Tabela 52. Comparação energia absorvida obtida para os adesivos RTV106+AV138 .....	124
Tabela 53. Número de elementos para o modelo combinado para os adesivos DP8005+XNR6852E-2 ..	124
Tabela 54. Comparação de resultados com a junta otimizada para a combinação DP8005+XNR6852E-2 .....	126
Tabela 55. Comparação energia absorvida obtida para a combinação DP8005+XNR6852E-2 .....	127

# ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Contextualização .....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.3	Organização do relatório .....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	7
2.1	Ligações adesivas.....	7
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas .....	8
2.1.2	Aplicações comuns das juntas adesivas .....	11
2.1.3	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas .....	13
2.1.4	Adesivos estruturais .....	16
2.1.5	Configurações possíveis de junta .....	17
2.1.6	Otimização geométrica das juntas .....	19
2.1.7	Técnica das juntas mistas .....	23
2.2	Ensaio de juntas adesivas .....	24
2.2.1	Testes estáticos .....	25
2.2.1.1	Ensaio de tração .....	25
2.2.1.2	Ensaio de corte .....	26
2.2.1.3	Ensaio de compressão .....	26
2.2.2	Testes dinâmicos/impacto .....	27
2.2.2.1	Teste Izod e Charpy .....	27
2.2.2.2	Teste Split-Hopkinson .....	28
2.2.2.3	Teste bloco de impacto.....	28
2.3	Previsão de resistência de juntas adesivas.....	29
2.3.1	Solicitações estáticas .....	30
2.3.1.1	Modelos analíticos .....	30
2.3.1.2	Métodos numéricos .....	31

---

2.3.1.2.1	Mecânica dos meios contínuos .....	31
2.3.1.2.2	Mecânica da fratura .....	31
2.3.1.2.3	Modelos de dano coesivo .....	32
2.3.1.2.4	Mecânica do dano .....	33
2.3.1.2.5	Método de Elementos Finitos eXtendido .....	33
2.3.2	Solicitações dinâmicas/impacto .....	34
2.3.2.1	Modelos analíticos .....	34
2.3.2.1.1	Modelos Voigt/ Maxwell .....	34
2.3.2.1.2	Modelo Cowper – Symonds .....	35
2.3.2.1.3	Modelo Johnson – Cook .....	35
2.3.2.1.4	Modelos de sobretensão .....	36
2.3.2.1.5	Curvas de fluência e curvas de tensão-deformação isócronas .....	36
2.3.2.2	Métodos numéricos .....	36
2.3.2.2.1	Configurações do modelo .....	37
2.3.2.2.2	Falhas na previsão de carga .....	38
<b>2.4</b>	<b>Comportamento de juntas adesivas sujeitas a impacto .....</b>	<b>39</b>
2.4.1	Avaliação experimental .....	39
2.4.2	Previsão numérica .....	41
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>45</b>
<b>3.1</b>	<b>Técnica numérica para previsão do comportamento ao impacto .....</b>	<b>45</b>
3.1.1	Condições da análise numérica .....	45
3.1.2	Modelos de dano coesivo .....	47
3.1.3	Validação da técnica numérica .....	49
3.1.3.1	Geometria da junta .....	49
3.1.3.2	Materiais utilizados .....	50
3.1.3.2.1	Substratos .....	50
3.1.3.2.2	Adesivos .....	50
3.1.3.3	Ensaio de impacto .....	52
3.1.3.4	Resultados obtidos .....	53

---

3.1.3.5	Discussão dos resultados .....	57
<b>3.2</b>	<b>Estudo numérico.....</b>	<b>58</b>
3.2.1	Geometria da junta .....	58
3.2.2	Materiais utilizados .....	59
3.2.2.1	Aderentes.....	59
3.2.2.2	Adesivos .....	59
3.2.3	Estudo dos parâmetros geométricos principais .....	60
3.2.3.1	Comprimento de sobreposição.....	60
3.2.3.1.1	Distribuições de tensões .....	62
3.2.3.1.2	Resistência das juntas .....	66
3.2.3.2	Espessura dos aderentes .....	72
3.2.3.2.1	Distribuições de tensões .....	74
3.2.3.2.2	Resistência das juntas .....	78
3.2.4	Estudo de alterações geométricas .....	84
3.2.4.1	Chanfro exterior dos aderentes .....	84
3.2.4.1.1	Distribuições de tensões .....	86
3.2.4.1.2	Resistência das juntas .....	91
3.2.4.2	Chanfro interior dos aderentes.....	95
3.2.4.2.1	Distribuições de tensões .....	98
3.2.4.2.2	Resistência das juntas .....	102
3.2.4.3	Filete de adesivo .....	106
3.2.4.3.1	Distribuições de tensões .....	108
3.2.4.3.2	Resistência das juntas .....	111
3.2.5	Outras alterações geométricas .....	116
3.2.5.1	DP8005+AV138 .....	117
3.2.5.1.1	Distribuições de tensões .....	118
3.2.5.1.2	Resistência das juntas .....	119
3.2.5.2	RTV106+AV138 .....	120
3.2.5.2.1	Distribuições de tensões .....	121
3.2.5.2.2	Resistência das juntas .....	122

---

3.2.5.3	DP8005+XNR6852E-2.....	124
3.2.5.3.1	Distribuições de tensões .....	125
3.2.5.3.2	Resistência das juntas .....	126
4	CONCLUSÕES.....	131
5	REFERÊNCIAS.....	135

# INTRODUÇÃO



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

As juntas adesivas contêm uma grande potencialidade na ligação de materiais, pois oferecem soluções muito apelativas em comparação com as ligações mecânicas tradicionais. Apresentam numerosas vantagens, tais como o seu baixo peso, boa resistência e fiabilidade, sendo possível ligar materiais diferentes e apresentar uma distribuição de tensões mais uniforme. No entanto, um dos maiores obstáculos é a impossibilidade de desmontagem na maioria dos casos e operam em ambientes de trabalho limitados sendo um dos fatores mais relevantes a temperatura.

Atualmente existe uma elevada variedade de adesivos com propriedades distintas, sendo uma das mais importantes a rigidez. A escolha do adesivo é um dos passos mais importantes para o sucesso das juntas e, sendo estas maioritariamente impossíveis de desfazer sem danificar a estrutura em que estão inseridas, é crítico que a junta seja devidamente dimensionada.

Existem ferramentas numéricas que permitem o estudo das ligações adesivas com recurso ao Método de Elementos Finitos (MEF) em ambiente de projeto que eliminam a necessidade de construção de provetes de ensaio, podendo eventualmente servir como método de validação destas ferramentas.

Numa junta de sobreposição simples (JSS), é possível aumentar a resistência e/ou melhorar a distribuição de tensões variando alguns parâmetros, tais como a espessura dos aderentes ou o comprimento de sobreposição, ou ainda com algumas alterações geométricas, tais como chanfro interior/exterior e filetes de adesivo. Estas variações podem ter maior ou menor impacto em função da escolha do adesivo.

As juntas adesivas mistas são juntas que utilizam mais que um adesivo. Estas juntas têm ganho preponderância devido às vantagens que trazem face a uma junta com apenas um adesivo. A introdução de vários adesivos com propriedades diferentes permite colmatar as falhas que cada adesivo separadamente tem. Isto é, a utilização de um adesivo muito rígido resulta por vezes numa junta com baixa resistência devido à sua fragilidade. Por outro lado, um adesivo muito dúctil e flexível resulta em juntas muito elásticas e com uma resistência muito reduzida. Por vezes, a junção destes dois, cria uma junta com propriedades bastante superiores.

Desta forma, considera-se necessário o estudo destas questões para a previsão da resistência de juntas adesivas mistas ao impacto.

## 1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é o estudo numérico de juntas mistas de sobreposição simples (JMSS) solicitadas ao impacto utilizando o *software* ABAQUS®. Serão abordadas algumas alterações geométricas como a variação da espessura dos aderentes e do comprimento de sobreposição, e de seguida efetuada a introdução de alterações à geometria dos aderentes, tais como chanfro interior/exterior e filetes de adesivo. Em cada alteração referida serão simulados três combinações diferentes de adesivos. Desta forma será possível concluir quais destas alterações têm mais influência numa junta.

A validação de resultados obtidos será feita por comparação a valores obtidos em ensaios experimentais.

## 1.3 Organização do relatório

Para uma melhor apresentação e análise dos conteúdos, esta dissertação encontra-se dividida em 4 capítulos.

No capítulo 1 foi feito o enquadramento do trabalho desenvolvido e definidos os objetivos.

No capítulo 2 é feita a revisão bibliográfica das juntas adesivas, nomeadamente a sua caracterização, sendo abordadas as suas vantagens e desvantagens, as suas aplicações, a sua evolução histórica, os tipos de configurações de junta mais usuais e os esforços e tipos de rutura a que estão sujeitas. É feita uma abordagem às otimizações geométricas e de que forma estas podem influenciar a resistência de uma junta. É abordada a previsão da resistência das juntas através dos modelos de cálculo numéricos e analíticos e os testes estáticos e dinâmicos/impacto, que permitem validar estes métodos de cálculo. Por fim, é feita uma abordagem ao comportamento das juntas mistas sujeitas ao impacto com a apresentação de alguns estudos numéricos e experimentais elaborados por outros autores.

O capítulo 3 está dividido em duas partes, na primeira (capítulo 3.1) são apresentadas as condições da análise numérica onde é descrita com algum pormenor a construção dos modelos numéricos, a localização dos esforços de reação, e da carga que simula o impacto de uma massa tal como acontece nos ensaios experimentais. Na validação da técnica numérica são primeiramente apresentadas as características dos adesivos utilizados e é feita uma abordagem aos ensaios experimentais, cujos resultados foram usados como valores de referência. Por fim, é feita a comparação dos resultados obtidos com os valores experimentais de referência. Na segunda parte (capítulo 3.2), após validados os resultados, partiu-se para o estudo numérico com a criação de novos modelos em função das alterações geométricas em análise, cujos parâmetros serão descritos nos seus capítulos respetivos. Os resultados obtidos serão analisados com recurso às curvas  $P-\delta$  e às curvas de tensão de corte e arrancamento. Após análise destes

resultados serão combinados os melhores efeitos de forma a se obter uma configuração de junta teoricamente ótima.

No capítulo 4 são apresentadas as conclusões obtidas do trabalho desenvolvido, e, com base nelas são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.



# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Ligações adesivas

Um adesivo pode ser definido como um material capaz de unir de forma permanente duas superfícies diferentes [1].

Os adesivos são usados como forma de ligação entre elementos há centenas de anos maioritariamente a partir de produtos naturais. As primeiras substâncias a serem usadas com propriedades adesivas foram a lama e a argila (Figura 1).



Figura 1. Construções em argila [2]

Na Tabela 1 é descrita, de forma breve, a evolução dos adesivos [3]. Ao longo dos anos, o uso de adesivos tem aumentado, e como tal, a indústria dos adesivos tem evoluído em termos de quantidade e qualidade. Nos dias de hoje, as ligações adesivas são usadas em todas as áreas das quais se podem salientar devido às suas exigências: a indústria aeronáutica, espacial e automóvel. Este tipo de ligações permite uma melhor distribuição de tensões ao longo da área ligada o que permite ter uma maior rigidez e transmissão de carga reduzindo o peso e o custo. As ligações adesivas estão também associadas a algumas desvantagens forçando a pesquisa e o desenvolvimento de novas soluções. Com os avanços tecnológicos foram desenvolvidos *softwares* capazes de nos ajudar a calcular e dimensionar qualquer junta adesiva.

Tabela 1. Evolução histórica dos adesivos [3]

Década	Adesivo
1910	Fenol – Formaldeído Adesivos de caseína
1920	Éster de celulosa Resina alquídica Borracha ciclizada em adesivos Policloropreno Adesivos de soja
1930	Ureia – Formaldeído Resina fenólica em filme Colas para madeira em acetato de polivinilo
1940	Nitrilo – fenólico Borracha clorada Melamina formaldeído Vinílico-fenólico Acrílico Poliuretanos
1950	Epóxidos Cianoacrilatos Anaeróbicos
1960	Poliimida <i>Polybenzimidazole</i> Poliquinoxalina
1970	Acrílicos sensíveis à pressão Poliuretanos estruturais
1980	Endurecedores para resinas termoendurecíveis Epóxidos à base de água Espumas
1990	Sistemas de cura por UV

### 2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

As juntas adesivas podem ser caracterizadas pela sua facilidade em unir materiais diferentes e por outras numerosas vantagens que se podem citar [1]:

- Distribuição uniforme de tensões;

- Capaz de ligar materiais diferentes;
- Elevada resistência à fadiga face às ligações tradicionais se a junta for bem concebida;
- Excelente capacidade de amortecimento de vibrações;
- Baixa densidade, logo baixo peso;
- Substituem ligações aparafusadas/rebitadas;
- Boa aparência estética;
- Bom isolamento térmico e capacidade de vedação;
- Rácio resistência/peso atrativo;
- Mais rápido e/ou mais barato que as ligações mecânicas tradicionais.

Por outro lado, podem-se encontrar algumas desvantagens que fazem algumas indústrias rezear pela mudança [1]:

- Não permite exame visual na área colada (exceto com aderentes transparentes);
- Preparação de superfície exigente que pode implicar custos acentuados;
- Tempos de cura por vezes elevados, principalmente quando não são usadas curas a altas temperaturas;
- Temperaturas de serviço são limitadas a até 177°C na maioria dos adesivos, utilizando adesivos especiais podem ascender aos 371°C por tempo limitado;
- Grandes limitações em termos de solicitações – tensões de arrancamento e clivagem devem ser evitadas;
- Impossibilidade de desmontagem sem destruição da junta;
- Sensíveis ao meio ambiente em que estão inseridas devido aos fatores temperatura, humidade, radiação UV, etc).

Pode-se caracterizar uma ligação adesiva pelos constituintes ilustrados na Figura 2 e descritos na Tabela 2. Na Tabela 3 podem-se ver algumas diferenças entre juntas mecânicas e juntas adesivas.

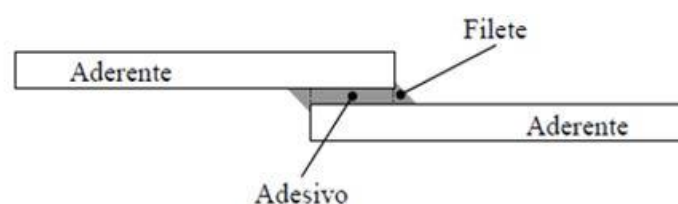


Figura 2. Constituição típica de uma junta adesiva

Tabela 2. Caracterização dos constituintes de uma junta adesiva [4]

Constituinte	Descrição
Aderente/substrato	Material, corpo ou componente ligado através de um adesivo. O termo aderente é geralmente utilizado para designar o material ligado. O termo substrato é geralmente utilizado para designar o material a ser ligado.
Adesivo	Substância capaz de fixar pelo menos duas superfícies de forma permanente e resistente

Tabela 3. Diferenças entre juntas mecânicas e adesivas [5]

Propriedades	Junta mecânica	Junta adesiva
Tempo de fabrico	Várias etapas, montagem da junta rápida	Poucas etapas, longo processo de cura
Preparação de superfície	Mínima	Extensiva, crítica
Secções finas	Pode não ser possível	Pode ser realizado
Peso da Junta	Pesado	Leve
Superfície	Saliências	Pode ser lisa
Limitações de temperatura	Baixa	Alta
Dificuldade para inspecionar	Fácil	Difícil
Problemas com meio ambiente	Pode ter corrosão galvânica	Sensibilidade ao solvente
Penetração de humidade	Sem resistência	Auto vedante
Concentração de tensões	Significativas	Podem ser muito baixas
Carregamentos de longa duração	Efeitos de relaxamento e de fadiga	Fluência
Sensibilidade às forças de arrancamento	Resistente	Suscetível
Sensibilidade às forças de tração	Suscetível	Resistente
Amortecimento de vibrações	Sem amortecimento	Amortecimento intrínseco
Impacto na saúde e segurança	Corte, perfuração, temperatura	Solvente, temperatura

### 2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

Devido ao seu baixo peso e elevada resistência as juntas adesivas têm ganho importância em todos os setores industriais. Na indústria aeronáutica, o avião Boeing 787 (Figura 3) cujo primeiro voo foi em 2009, 50% da sua constituição é em materiais compósitos. A principal técnica de ligação neste tipo de indústria são as ligações aparafusadas/rebitadas, que, com o aumento progressivo da utilização de materiais compósitos, estão a ser substituídas por juntas adesivas [6]. Resulta na redução/eliminação de parafusos/rebitas, na substituição por materiais mais leves tornando o avião mais leve. Desta forma pode-se optar por criar mais lugares ou por ter um veículo mais económico.

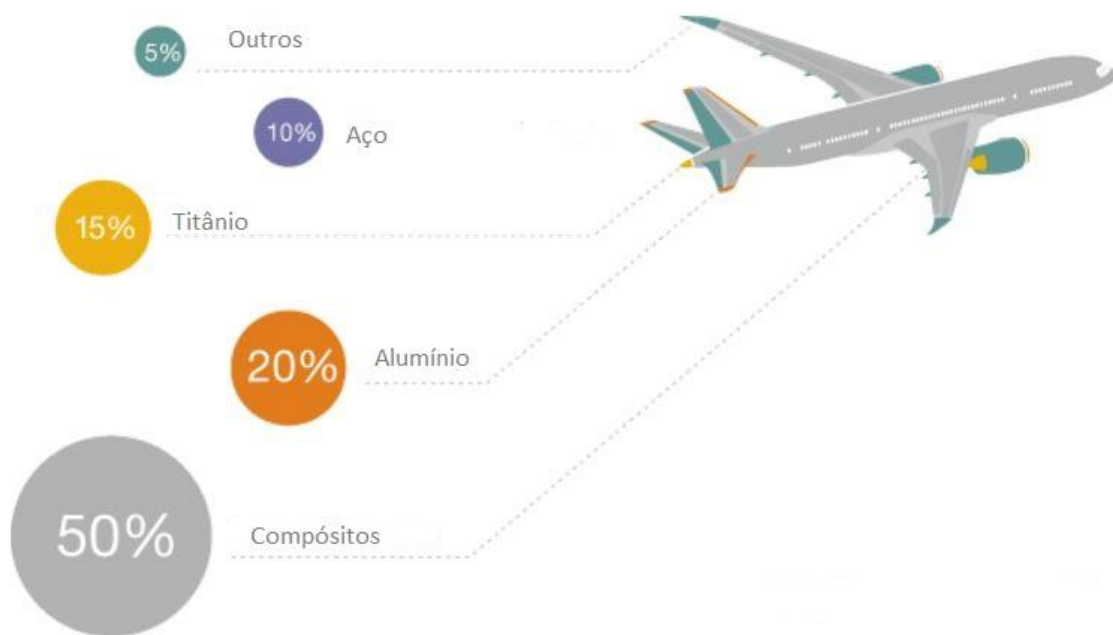


Figura 3. Constituição do avião Boeing 787 [7]

Os exemplos do uso de ligações adesivas são cada vez mais, no Airbus A380 (Figura 4) podem-se salientar a cauda vertical, as asas traseiras, os ailerons, etc.

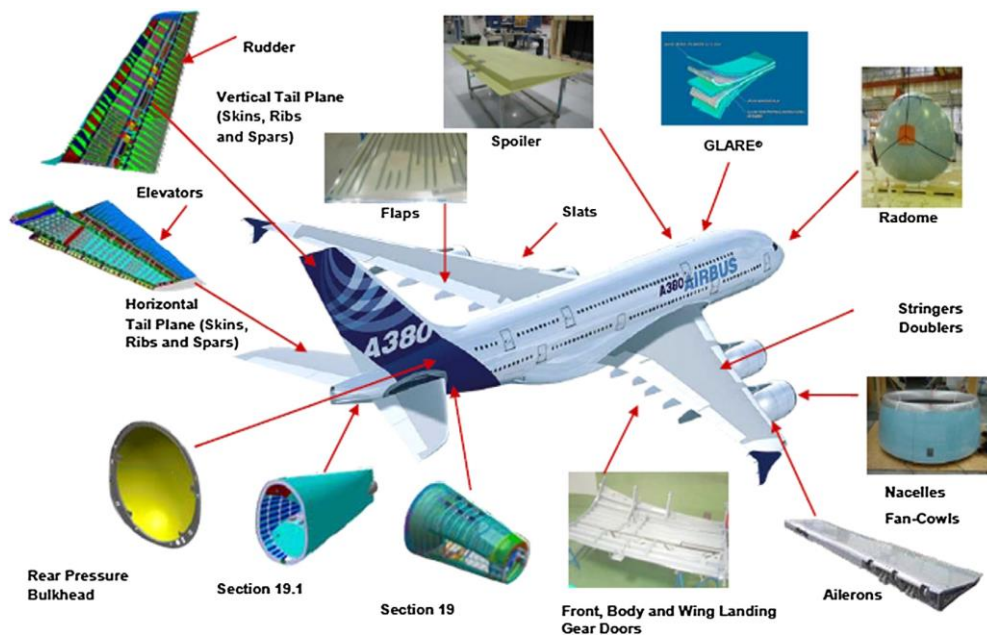


Figura 4. Uso de ligações adesivas no Airbus A380 [8]

A indústria automóvel nestes últimos anos têm estado sobre grande pressão na temática “emissões de gases”, e têm sido criadas normas europeias que forçam os construtores a produzir os seus veículos sobre parâmetros cada vez mais refinados (a norma atual em vigor é a Euro VI). Apesar de as ligações adesivas já serem usadas nos automóveis há muitos anos, os construtores são forçados a procurar novas soluções para cumprirem a legislação e ao mesmo tempo conseguirem ser competitivos. A utilização de ligações adesivas passa por uma dessas soluções. Pode-se encontrar as ligações adesivas em vários componentes de um automóvel: nos para choques, na fixação dos para-brisas, ailerons, placas eletrónicas; aplicação de adesivos para redução e amortecimento do ruído, óticas, bancos feitos em espumas poliuretano (Figura 5), elementos decorativos, etc.



Figura 5. Banco automóvel em espuma poliuretano [9]

Um colete à prova de balas deve resistir a impactos e impedir a perfuração de órgãos vitais do seu utilizador, são construídos em materiais compósitos, combinando

diferentes camadas com o objetivo de dispersar gradualmente a energia de impacto. São utilizados adesivos na ligação dos vários materiais e ao mesmo tempo ajudam na dissipação de energia. Na Figura 6 pode-se ver uma representação esquemática da construção de um colete à prova de bala.



Figura 6. Representação esquemática de um colete à prova de bala [10]

### 2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

Uma distribuição de tensões uniforme raramente é produzida por aplicação de uma força externa. Quando é iniciada a fratura, a tensão local excede a resistência local. As concentrações de tensões têm grande influência na forma como acontece a rotura da junta. Pode-se dividir os esforços em 5 categorias: tração, compressão, corte, clivagem e arrancamento, conforme mostra a Figura 7 [11].

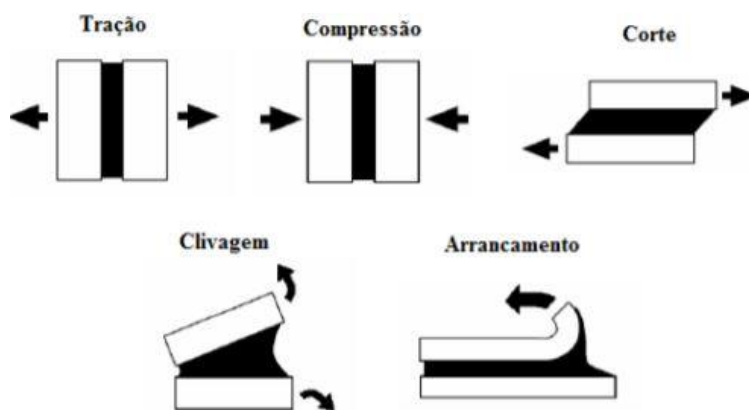


Figura 7. Tipos de esforços em ligações adesivas [11]

Esforços de tração ocorrem quando as forças atuam perpendicularmente ao plano de corte. Neste caso, as tensões normais são distribuídas uniformemente ao longo da área colada.

Esforços de compressão são forças que tendem a comprimir um aderente contra o outro. A distribuição da tensão pelo adesivo é constante. Na realidade uma junta em compressão pura praticamente não precisa de adesivo.

Esforços de corte provocam o escorregamento entre os dois aderentes. As extremidades da junta estão sujeitas a um maior nível de tensões do que a zona central da ligação, uma vez que cada aderente deforma-se longitudinalmente a uma taxa crescente desde a sua extremidade até à extremidade oposta da sobreposição. É o modo de carregamento preferencial para juntas adesivas. As tensões de corte são obtidas dividindo a força aplicada pela área colada.

Um aumento da largura da ligação torna a junta mais resistente porque aumenta a área em cada um dos extremos da zona de sobreposição, que corresponde aos locais onde o nível de tensões é mais elevado. Contudo, um aumento do comprimento de sobreposição provoca um aumento da resistência da junta, mas a uma taxa decrescente, devido ao efeito mais acentuado de deformação diferencial dos aderentes (Figura 8).

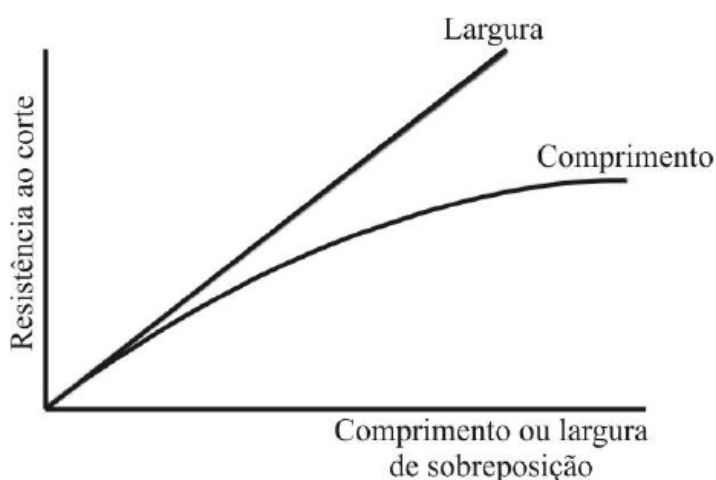


Figura 8. Relação entre comprimento e largura de sobreposição da junta [3]

Esforços de clivagem são provocados por forças de tração mas aplicadas na extremidade de uma junta. Neste caso existe uma forte concentração de tensões na extremidade da junta que tendem a separar os substratos. O adesivo na extremidade oposta pouco contribui para a resistência da junta. Este tipo de sollicitação deve ser evitado ao máximo nas juntas adesivas.

Os esforços de arrancamento são um caso bastante idêntico ao verificado para os esforços de clivagem. No caso do arrancamento um ou os dois aderentes são bastante flexíveis e podem deformar plasticamente por ação das forças aplicadas o que leva à concentração das forças de tração numa zona muito mais localizada numa das extremidades da ligação. Este tipo de sollicitação deve ser evitado ao máximo.

A norma ASTM D 5573 – 99 prevê os principais modos de rutura, que podem ser classificados como: rutura adesiva, coesiva, mista e rutura do substrato.

Rutura coesiva (Figura 9) ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo. As superfícies de rutura estão

ambas cobertas por adesivo. Pode-se concluir que houve uma boa preparação das superfícies.

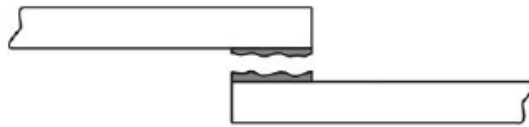


Figura 9. Rotura coesiva [12]

Rotura adesiva (Figura 10) ocorre na interface entre o adesivo e um dos aderentes. Após rotura verifica-se que a superfície de um dos aderentes não apresenta resíduos de adesivo. A superfície de rotura do outro aderente apresenta-se coberta de adesivo. Neste caso ocorre falha na adesão entre o adesivo e a superfície do aderente. Este tipo de rutura pode ocorrer se houver má preparação das superfícies. Em juntas adesivas de sobreposição simples, existe variação de tensões de arrancamento e de corte ao longo da espessura do adesivo. Os valores máximos destas tensões ocorrem junto da interface. Isto pode explicar o aparecimento de uma rotura adesiva. Saliente-se ainda que muitas roturas consideradas inicialmente adesivas são, na realidade, roturas coesivas. De facto, uma observação rigorosa da superfície do substrato revela por vezes, a existência de uma fina película de adesivo.

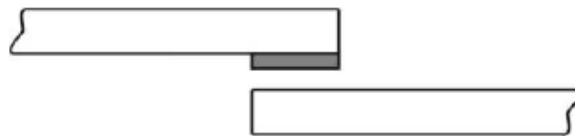


Figura 10. Rotura adesiva [12]

Rotura mista (Figura 11) consiste numa combinação de rotura adesiva e rotura coesiva. Por vezes este modo de rotura deve-se à limpeza ineficaz numa dada região das superfícies a ligar, ou mesmo do próprio adesivo.



Figura 11. Rotura mista [13]

Rotura do Substrato (Figura 12) dificilmente ocorre em materiais de elevada resistência, é uma rotura similar à rotura coesiva do adesivo, e difere apenas no local da mesma, já que neste caso a rotura se dá no substrato. Esta rotura ocorre porque a resistência interna do substrato é mais fraca do que a zona de ligação.



Figura 12. Rotura do substrato [12]

O modo de rotura preferencial é a rotura coesiva no adesivo ou no aderente, uma vez que se está a utilizar a totalidade da resistência dos materiais constituintes da junta. A rotura de um dos aderentes é demonstrativa de uma junta bem concebida, nomeadamente se a carga de rotura corresponder à resistência nominal do substrato.

#### 2.1.4 Adesivos estruturais

Os adesivos podem ser caracterizados por vários parâmetros, os mais comuns são: origem; função; composição química; forma física; custo e método de reação ou aplicação.

Quanto à origem, os adesivos podem ser naturais – fabricados a partir de materiais naturais como subprodutos animais ou de agricultura e são biodegradáveis; sintéticos – fabricados a partir de materiais feitos pelo homem tais como polímeros ou adesivos semissintéticos – fabricados através de combinações com os anteriores. Quanto à função, podem ser estruturais ou não estruturais [1], entende-se como adesivos estruturais aqueles com resistência ao corte superior a 5-10MPa, que não sofrem fluência sob ação de cargas significativas, que resistem a cargas elevadas sem grandes deformações. A classificação dos adesivos quanto à composição química descreve os adesivos como sendo termoendurecíveis (resinas fenólicas, epóxico, poliéster, etc.), termoplásticos (resinas acrílicas, celulósicas, vinílicas poliamidas, etc.) e elastómeros (poliuretanos, nitrilos, silicões, etc.) Na Tabela 4 são comparadas algumas propriedades com os diferentes tipos de materiais [3].

Tabela 4. Propriedades adesivas quanto à sua composição química [3]

Material	Flexibilidade (Resiliência)	Resistência Mecânica	Resistência Térmica	Resistência a agentes químicos
Resinas termoendurecíveis	Má	Boa	Boa	Boa
Resinas termoplásticas	Média	Medíocre	Medíocre	Boa
Elastómeros	Muito Boa	Má	Variável	Medíocre

Os adesivos são fornecidos sob várias formas e cada uma com as suas vantagens, na Tabela 5 encontram-se as principais formas e respetivas vantagens.

Tabela 5. Classificação de adesivos quanto à forma [3]

Tipo	Observações	Vantagens
Líquido	Forma mais comum	Aplicação fácil, viscosidade controlada pelo utilizador; forma principal para aplicação manual
Pasta	Ampla gama de consistências, são principalmente epóxidos modificados	Vantajoso em grandes produções por causa do tempo de espera; Excelente resistência ao corte.
Pó	Requer mistura ou aquecimento para ativar a cura	Vida útil longa
Filme	Limitado a superfícies planas, tempo de cura amplo	Aplicação rápida e fácil; espessura uniforme, sem desperdício

### 2.1.5 Configurações possíveis de junta

A resistência de uma junta adesiva na ausência de fatores ambientais pode ser determinada pelas propriedades mecânicas dos materiais que a constituem. Pode-se afirmar que a junta ideal é aquela em que o adesivo é solicitado na direção de maior resistência à falha, quando sujeita às condições reais de carregamento. As juntas adesivas podem ter um número elevado de configurações, as mais comuns serão abordadas de seguida de forma breve [3]. Estas disposições de juntas têm as suas vantagens/desvantagens, tornando a sua seleção um trabalho importante. As juntas topo a topo (Figura 13) são as mais simples de fabricar, no entanto apresentam elevadas tensões de arrancamento e de corte nas extremidades da ligação e não suportam esforços de flexão que neste tipo de juntas se transformaria em esforços de clivagem que, conforme explicado anteriormente são esforços a evitar.

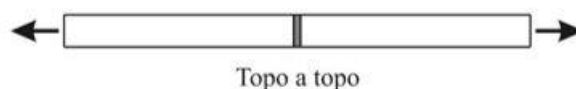


Figura 13. Junta topo a topo [12]

A sobreposição simples (Figura 14) é fácil de fabricar e é muito usada em aplicações industriais e o adesivo é solicitado principalmente ao corte. Um dos problemas

associados a esta junta é o facto da distribuição de tensões (corte e arrancamento) estar concentrada nas extremidades da sobreposição.



Figura 14. Junta de sobreposição simples [12]

Para reduzir os efeitos de flexão, pode-se utilizar a sobreposição dupla (Figura 15), é uma produção mais demorada que as juntas de sobreposição simples.



Figura 15. Junta de sobreposição dupla [12]

Com chanfro exterior (Figura 16), consegue-se diminuir os efeitos de arrancamento nas extremidades, com esta tipologia de junta consegue-se diminuir a concentração de tensões nas extremidades e uma distribuição mais uniforme das mesmas. É necessário ter em conta a dificuldade em maquinar que resulta em aumento de tempo e custo.



Figura 16. Junta c/ chanfro exterior [12]

Juntas com chanfro interior (Figura 17), reduzem o gradiente de esforço ao longo do adesivo, são mais eficientes que as juntas topo a topo, no entanto são mais difíceis de produzir devido à necessidade em realizar o chanfro. Desta forma o tempo de fabrico é mais elevado e caro.



Figura 17. Junta c/ chanfro interior [12]

A Cobre-junta (Figura 18) têm como resultado uma resistência superior às juntas de sobreposição simples. Juntas sujeitas a esforços de arrancamento.



Figura 18. Cobre Junta [12]

A cobre-junta dupla (Figura 19) reduz o aparecimento de esforços de flexão, mas implica tempo de fabrico mais elevado.



Figura 19. Cobre junta dupla [12]

Com o método em degrau (Figura 20) consegue-se diminuir os esforços de arrancamento, mas o seu tempo de fabrico é elevado e em materiais compósitos, a maquinação pode danificar as fibras.

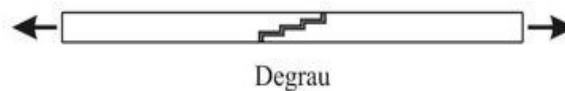


Figura 20. Junta em degrau [12]

Juntas em ressalto (Figura 21) garantem o alinhamento das forças, o ressalto é difícil de fabricar principalmente em substratos frágeis ou de alta resistência.



Figura 21. Junta de ressalto [12]

### 2.1.6 Otimização geométrica das juntas

As juntas adesivas têm sido utilizadas como uma das abordagens para a união de componentes e tem sido questão de pesquisa considerável nas últimas décadas. Indústria automóvel, aeronáutica, indústria civil, marítima, etc., estão progressivamente a integrar os adesivos estruturais nos seus processos de montagem. Por um lado, a geometria inadequada das juntas pode levar a problemas estruturais, sendo que na maioria dos casos as falhas começam nas juntas. Uma das principais preocupações nas juntas adesivas são as concentrações tensões no final da sobreposição. Por outro lado, geometrias conservadoras podem tornar a estrutura exageradamente pesada. Assim, a otimização da junta e consequente redução do peso, é crucial para muitas indústrias estratégicas, incluindo a indústria aeroespacial. Exemplo: a redução de peso dos veículos automóveis tem a vantagem de diminuir o consumo de combustível.

Uma técnica para minimizar o pico de tensão de corte nas extremidades da sobreposição é usar uma junta adesiva mista, que utiliza um adesivo frágil (rígido) na zona do meio da sobreposição e um adesivo dúctil (flexível) nas extremidades da sobreposição da junta. A ideia de variar a flexibilidade e resistência do adesivo ao longo do comprimento de sobreposição foi proposta pela primeira vez por Raphael [14]. Esta abordagem foi estudada teoricamente em várias outras referências [15-17]. Há relativamente poucas

demonstrações experimentais publicadas de um método prático que produz melhorias significativas no desempenho da junta [16, 18, 19]. Embora existam vários tipos de métodos de otimização para resolver um problema, a escolha do método depende do problema que está a ser investigado. A resistência de uma junta adesiva excluindo a influência dos fatores ambientais, é determinada pelas propriedades mecânicas dos materiais que a constituem, para que se possa projetar uma junta com as propriedades necessárias, é fundamental conhecer os requisitos de funcionamento. A geometria da junta tem particular importância na durabilidade da mesma durante as solicitações a que for sujeita. Para uma maior eficiência da junta, a distribuição de tensões deve ser o mais uniforme possível, evitando o aparecimento de elevadas tensões de clivagem ou de arrancamento.

As seguintes propriedades são as mais importantes na maximização da eficiência da junta [3]:

- Propriedades dos adesivos;
- Espessura do adesivo;
- Geometria da área ligada;
- Propriedades dos aderentes.

Um exemplo simples de como as propriedades do adesivo podem influenciar a eficiência da junta, pode ser demonstrado na Figura 22 abaixo que representa uma análise da distribuição de tensões de uma junta sujeita ao corte ou ao arrancamento.

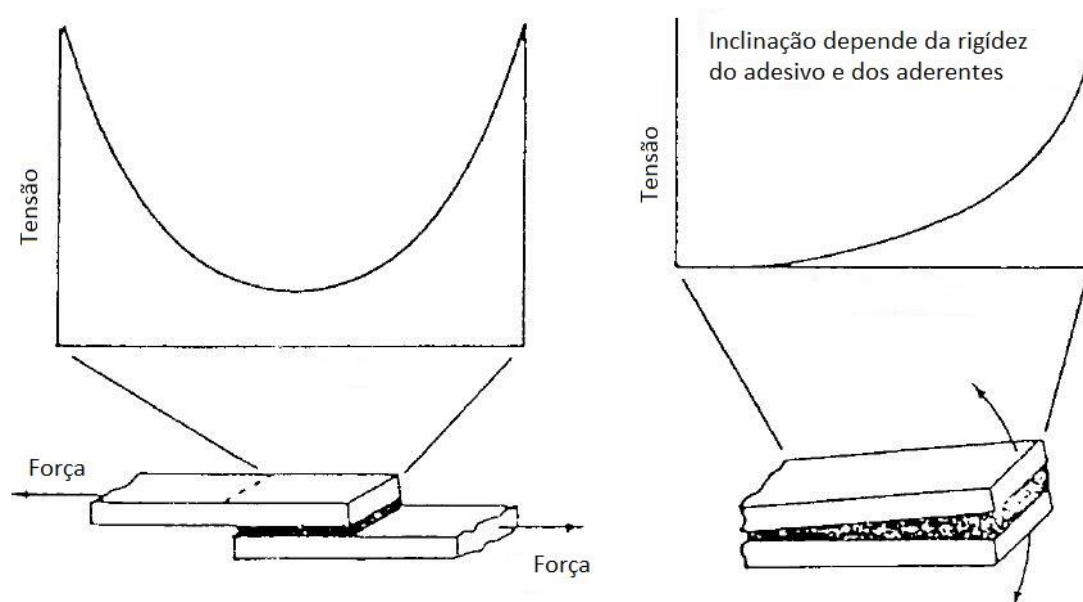


Figura 22. Distribuição de tensões quando solicitado ao corte/arrancamento [3]

Os adesivos flexíveis têm um valor de tensão máxima menor, mas a tensão média normalmente é maior. A propagação de fendas é maior com adesivos frágeis (isto é, aqueles com baixo alongamento e módulo elevado). A vida à fadiga é geralmente menor com adesivos frágeis. O módulo de elasticidade do adesivo também influencia a distribuição de tensões, no entanto, não é um efeito direto. Comparando dois adesivos com a mesma resistência e alongamento, o adesivo com módulo mais elevado suportaria mais carga. No entanto, os adesivos com alongamento mais elevado que têm boa resistência ao arrancamento e clivagem tendem a ter módulos mais baixos e menor resistência de corte [3]. A probabilidade de propagação de fendas é maior em adesivos frágeis (baixo alongamento e alto módulo). A vida à fadiga é normalmente menor com adesivos frágeis. Se as distribuições de tensões não forem uniformes, quer devido ao carregamento externo, como a arrancamento ou clivagem, ou a partir de tensões internas, os adesivos flexíveis são geralmente melhores que os frágeis. É por isso que os adesivos flexíveis são frequentemente recomendados para a ligação de superfícies plásticas ou elastômeras.

Resumindo, é preferível um adesivo flexível a um rígido e frágil, desde que o adesivo tenha uma força de coesão suficiente para a aplicação em estudo. Torna-se mais fácil ter uma junta com uma distribuição de tensões uniforme. No entanto, existem desvantagens no uso de adesivos flexíveis pois têm menor força de coesão. Uma vez que as forças que mantêm as moléculas internas juntas são mais baixas, a resistência às temperaturas e a resistência ambiental também são menores. Como resultado, os adesivos flexíveis são normalmente usados em substratos, como plásticos e elastômeros, onde as condições do serviço ambiental geralmente não são extremas e as propriedades físicas do adesivo correspondem intimamente às dos substratos. Os adesivos rígidos são usados em aplicações estruturais que provavelmente terão temperaturas elevadas um meio ambiente agressivo [3].

O aspeto mais importante na espessura do adesivo é a sua uniformidade ou homogeneidade. Deve-se obter uma camada adesiva tão fina quanto possível com valores entre os 0,05 a 0,2 mm. A resistência adesiva não varia significativamente nesse intervalo. É extremamente importante ter uma espessura de adesivo constante e dentro dos valores de espessura anteriormente referidos, caso contrário corre-se o risco de surgirem vazios na junta. Deve ser tido em conta que os adesivos são formulados para curar em seções finas. Espessuras elevadas de adesivo podem tornar o processo de cura deficiente e alterar as propriedades finais pretendidas do adesivo. Por outro lado, com uma espessura irregular, os substratos não ficam paralelos e criar-se-ão condições para esforços de clivagem no adesivo.

A resistência de uma junta solicitada ao corte depende principalmente da largura e profundidade da sobreposição e da espessura do aderente. A resistência ao corte do adesivo é diretamente proporcional à largura da junta. A resistência às vezes pode ser aumentada aumentando a profundidade de sobreposição, mas a relação não é linear, a forma mais eficiente de aumentar a resistência das juntas é aumentando a largura. Na

Figura 23, pode-se ver a relação entre a carga aplicada e o comprimento de sobreposição para adesivos rígidos e flexíveis.

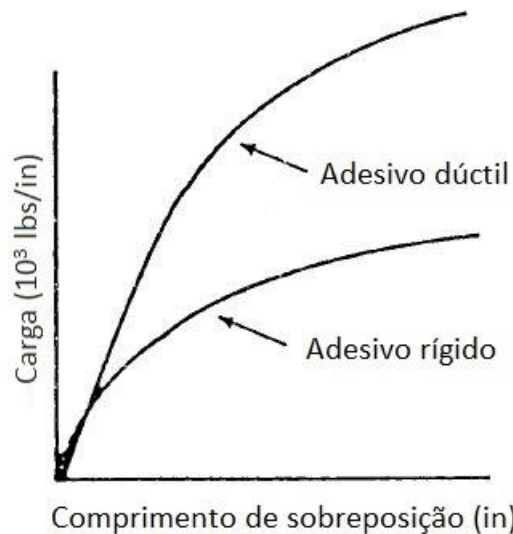


Figura 23. Relação entre carga versus comprimento sobreposição em adesivos flexíveis e rígido [3]

Em resumo, podem ser definidas algumas regras gerais que se devem ter em consideração ao longo da construção de uma junta adesiva [3]:

- Manter as tensões na linha de ligação no mínimo;
- Sempre que possível projetar a junta para que as cargas atuem no adesivo em corte;
- Tensões de arrancamento e clivagem devem ser minimizadas;
- As tensões devem ser distribuídas da forma mais uniforme possível na área colada;
- A resistência da adesão é diretamente proporcional à largura da junta. Aumentar a largura aumenta a resistência da ligação. Aumentar o comprimento nem sempre aumenta a resistência da ligação;
- No geral, adesivos rígidos são mais resistentes ao corte e adesivos flexíveis têm melhor comportamento em arrancamento;
- Embora tipicamente um adesivo mais forte possa produzir uma junta mais forte, um adesivo com um alongamento elevado e com uma força coesiva mais baixa, poderia produzir uma junta mais forte em aplicações onde as tensões são distribuídas de forma não uniforme;

- A rigidez dos aderentes e do adesivo influencia a força de uma ligação. No geral, quanto mais rígido é o aderente em relação ao adesivo, mais uniforme é a distribuição de tensões e maior é a resistência da junta;
- Quanto maior é o  $E_t$  (módulo x espessura) do aderente, menor é a probabilidade de existir deformação durante a sollicitação e mais resistente é a junta.

### 2.1.7 Técnica das juntas mistas

Uma junta adesiva ideal é aquela em que a flexibilidade e a propriedade de resistência do adesivo variam ao longo do comprimento de sobreposição. Devido às maiores tensões de corte que ocorrem nas extremidades da sobreposição, deve ser usado um adesivo dúctil e flexível nas extremidades, enquanto no meio, deve ser usado um adesivo rígido. Esta técnica foi investigada no passado, mas apenas alguns estudos relataram qualquer evidência experimental. As juntas mistas foram propostas no passado [14, 20-22] para melhorar a distribuição de tensões e aumentar a resistência da junta em adesivos de módulo elevado. O adesivo rígido deve usado no meio, enquanto o adesivo flexível deve ser usado nas extremidades.

O conceito de juntas mistas foi estudado através do MEF e testado experimentalmente. Pires et al. [15], Fitton e Broughton [16] provaram também, através de MEF e experimentalmente com dois adesivos diferentes que o método de juntas mistas dá um aumento de performance à junta. O último estudo refere-se a aderentes em compósito e vários módulos de adesivo para o adesivo dúctil com uma sobreposição de 50 mm. Temiz [23] usou análise de MEF para estudar a influência de dois adesivos em juntas de sobreposição dupla e descobriu que a técnica diminui significativamente as tensões nas extremidades da sobreposição. Bouiadjra et al. [24] utilizaram a técnica das juntas mistas para reparar uma estrutura de alumínio com um remendo em compósito.

A técnica de juntas mistas foi ampliada para resolver o problema das juntas solicitadas a baixas e altas temperaturas por da Silva e Adams [25, 26]. Utilizaram um adesivo de alta temperatura no meio e um de baixa temperatura nas extremidades. Os autores estudaram várias configurações com o MEF e provaram experimentalmente que o conceito funciona.

No estudo realizado por da Silva e Lopes [18] foram fabricadas juntas de sobreposição simples em que foi utilizado o mesmo adesivo rígido no meio e três adesivos dúcteis de diferentes ductilidades nas extremidades. Em todos os casos as juntas mistas fornecem uma maior resistência do que apenas com o adesivo rígido.

Na Figura 24, pode-se ver a distribuição de tensões para as três situações para uma JSS com um adesivo dúctil, com adesivo rígido, e por fim uma JSS com a combinação de dois adesivos rígido e dúctil, onde se pode verificar uma distribuição de tensões mais otimizada do que nas juntas anteriores.

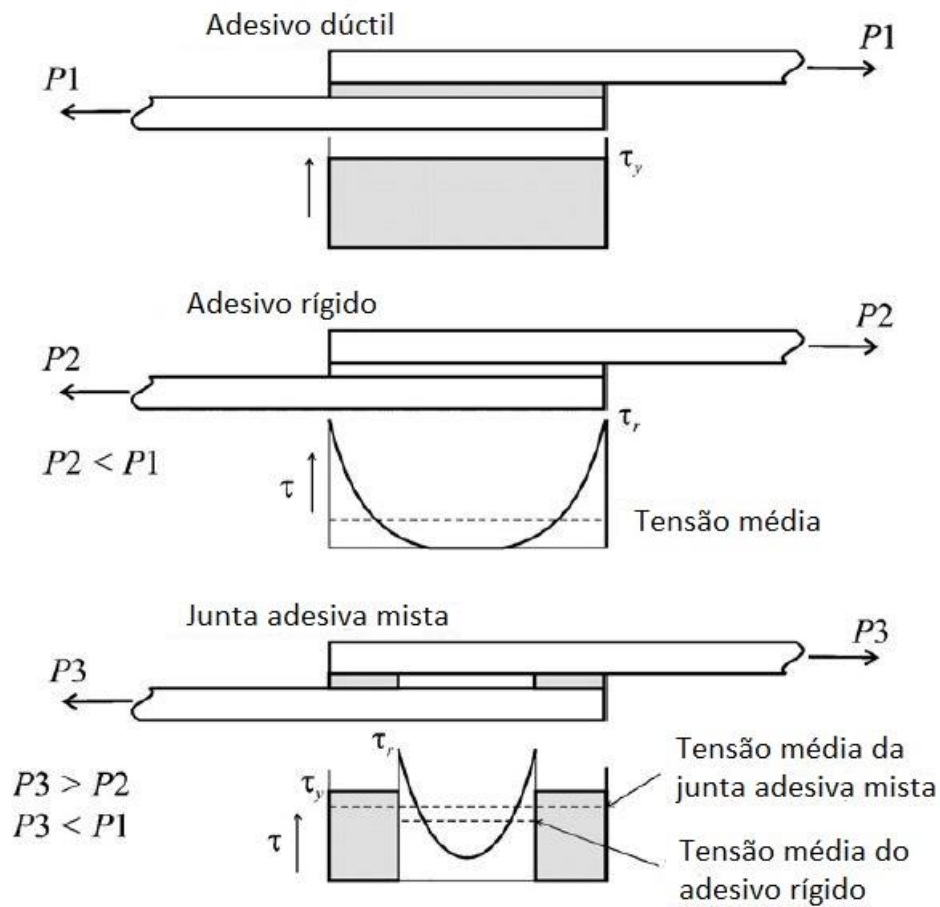


Figura 24. Esquema de distribuição de tensão de corte em juntas com adesivo dúctil, rígido e mistas [18]

Conforme se pode concluir pela análise da Figura 24, a junta com um adesivo dúctil tem uma distribuição de tensões uniforme contrariamente à junta com o adesivo rígido. Com uma JMSS, consegue-se obter um meio-termo em termos de distribuição de tensões.

## 2.2 Ensaio de juntas adesivas

Os ensaios das juntas adesivas são usados para controlo de qualidade e determinação das propriedades adesivas, é um processo complexo pois existem muitos parâmetros que podem afetar os resultados dos testes. A geometria da junta e o tipo de carga aplicada influenciam fortemente a distribuição de tensões, os parâmetros pelos quais os ensaios são conduzidos, tais como taxa de deformação, temperatura e condições ambientais, têm também um forte impacto nos resultados.

Existem normas como a ASTM e a ISO que tornam o processo standard, e que ajudam na realização dos mesmos. Existem duas categorias principais para ensaios de juntas adesivas: ensaios de propriedades fundamentais e testes de uso final. Os testes de uso final servem para simular o tipo de carregamento a que uma junta será submetida ao

longo da sua vida útil. A medição de uma propriedade fundamental como viscosidade ou dureza normalmente é mais simples do que a realização de ensaios de uso final [3].

Um dos tipos mais comuns de testes para determinar as propriedades de resistência dos adesivos é o teste de tração em provetes maciços. As propriedades determinadas são intrínsecas ao material: são obtidas sob um estado de tensão uniforme e uniaxial, sem influência dos aderentes.

### 2.2.1 Testes estáticos

#### 2.2.1.1 Ensaios de tração

O teste consiste em carregar o provete na direção longitudinal até a falha. A velocidade do ensaio normalmente utilizada é de 1 mm/min para a determinação do módulo de Young ( $E$ ), mas podem ser utilizadas velocidades mais elevadas para teste de falhas.

A medição do deslocamento do adesivo é relativamente fácil usando transdutores ou extensómetros, existem também medidores óticos e laser para que a medição possa ser efetuada sem contato.

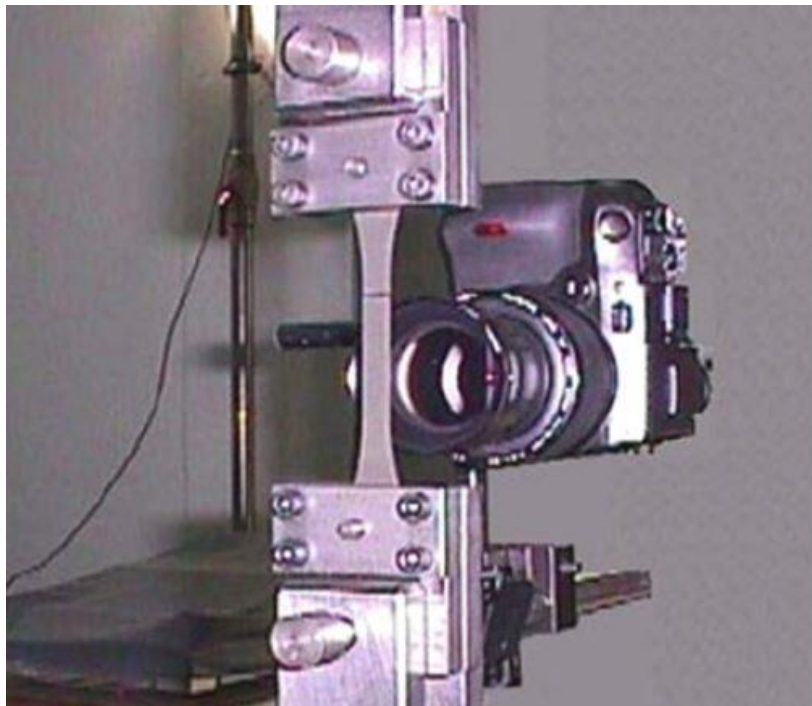


Figura 25. Ensaio de tração com medidor ótico [4]

Na Figura 26, pode-se ver um exemplo de uma curva típica de tensão-deformação, que pode ser usada para determinar  $E$ , a força de tração e a tensão de rutura do adesivo. Existem vários métodos para calcular  $E$ , norma EN ISO 527-2 recomenda a determinação de  $E$  entre pontos em 0,05% e 0,25% de tensão. Uma forma de determinar o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) é deduzindo através de  $E$  e do módulo de corte [1].

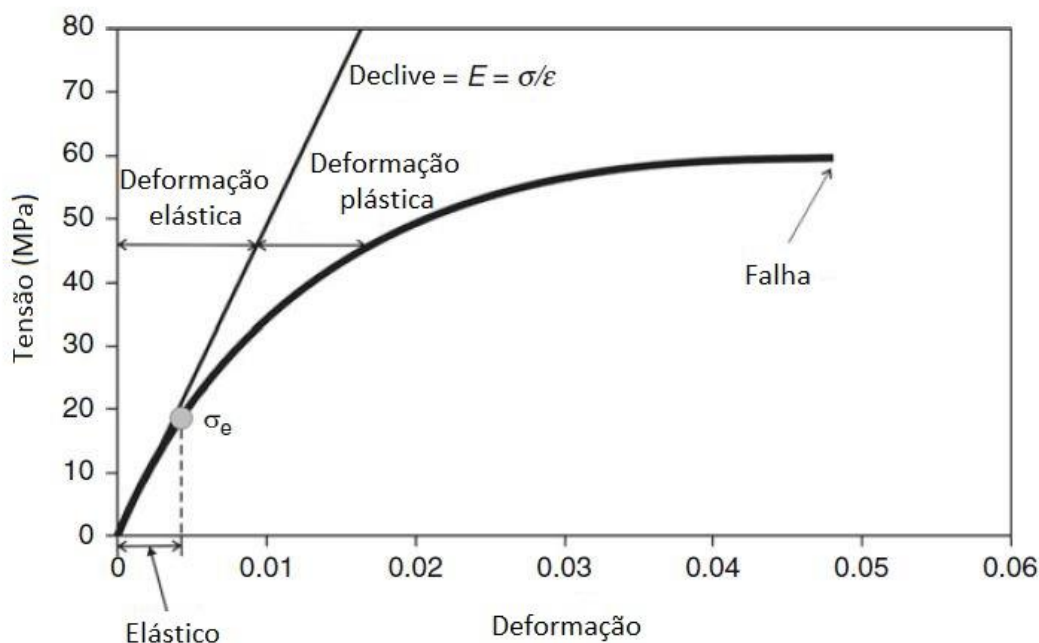


Figura 26. Gráfico típico curva tensão-deformação [4]

### 2.2.1.2 Ensaios de corte

Tal como os ensaios de tração, podem ser divididos em testes de adesivo maciço ou em juntas adesivas. O deslocamento do adesivo em testes de juntas é muito pequeno e, portanto, é mais difícil de medir com precisão. Os provetes maciços dão resultados mais precisos porque o comprimento do útil é maior. No entanto, pode-se argumentar que o tamanho e a espessura dos provetes utilizados não são representativos das propriedades adesivas numa junta. O *National Physical Laboratory* e outros laboratórios britânicos Dean et al. [27] realizaram um extenso estudo teórico e experimental sobre vários métodos de teste de corte.

### 2.2.1.3 Ensaios de compressão

Este tipo de teste é menos utilizado que o de tração e corte. Normalmente, assume-se que o adesivo segue o modelo de von Mises e, portanto, as propriedades de compressão e de tração são as mesmas. No entanto, uma vez que os adesivos dependem da componente tensão hidrostática, as propriedades de resistência à compressão diferem das obtidas em tensão [28]. Existem vários tipos de ensaios de compressão, o mais comum usa provetes maciços paralelepípedicos. A norma francesa NF T 51-101 recomenda uma base quadrada enquanto a norma ASTM D 695 e ISO 604 usam uma base retangular.

## 2.2.2 Testes dinâmicos/impacto

As estruturas estão sujeitas a cargas, sejam elas constantes ou não, no caso dos adesivos pode-se definir dois casos. No primeiro caso, existem as cargas aplicadas que fazem parte das condições de serviço, no segundo caso é o de estruturas que recebem cargas que não estão consideradas nas suas condições de serviço (exemplo: colisão automóvel) De acordo com o caso, as expectativas são diferentes: se os impactos são uma condição de serviço normal, eles devem ser sustentados repetidamente sem danos, caso contrário, se o impacto for um caso excepcional, o objetivo é minimizar suas consequências, tendo em conta que um certo nível de dano (às vezes alto) seja inevitável [1].

### 2.2.2.1 Teste Izod e Charpy

Os testes Izod e Charpy são específicos para materiais metálicos e termoplásticos. Na Tabela 6 encontram-se algumas diferenças entre estes dois testes.

Tabela 6. Diferenças entre os testes Charpy e Izod

Características	Teste Charpy	Teste Izod
Tipo de materiais	Metais	Plásticos e metais
Tipos de entalhe	U e V	V
Posição do provete	Horizontal, entalhe na face oposta à face que sofre impacto	Vertical, entalhe virado para o pendulo
Ponto de embate	Meio do provete	Parte superior do provete
Dimensões comuns do provete	55x10x10 mm	64x12,7x3.2 mm (plásticos), 127x11,43 mm para perfis redondos (metais)
Normas	ASTM E23, ISSO 148 ou EN 10045-1	ASTM D256, ASTM E23 e ISO180

Ambos os testes consistem na aplicação de uma carga de impacto por um pêndulo, libertado de uma altura fixa. O provete é fraturado, e a energia perdida pelo pêndulo é determinada a partir da altura máxima atingida após o impacto. Ambos os testes de impacto de Charpy e Izod são métodos populares para determinar a resistência ao impacto ou a dureza de um material. Em outras palavras, estes testes medem a quantidade total de energia que um material pode absorver. Essa absorção de energia

está diretamente relacionada à fragilidade do material. Materiais frágeis, como cerâmica ou vidro, tendem a ter menores taxas de absorção do que materiais dúcteis como cobre ou alumínio. O teste de impacto Charpy foi desenvolvido por S.B. Russell e Georges Charpy no final do século XX. No teste Charpy, o provete é colocado horizontalmente na máquina com um entalhe numa das faces. Esse entalhe pode ser V ou em forma de U, e fica posicionado na face oposta aquela que sofre o impacto. O teste de impacto de Izod foi nomeado em honra do engenheiro de inglês Edwin Gilbert Izod, que descreveu o método de teste em 1903. O aparelho de teste e o provete são muito semelhantes ao teste de impacto de Charpy, as principais diferenças são: a orientação do provete, que é posicionado verticalmente com o entalhe voltado para o pêndulo.

### 2.2.2.2 Teste Split-Hopkinson

Este teste foi proposto por Bertram Hopkinson em 1914 [29] e é usado para medir tensões e deformações dinâmicas.

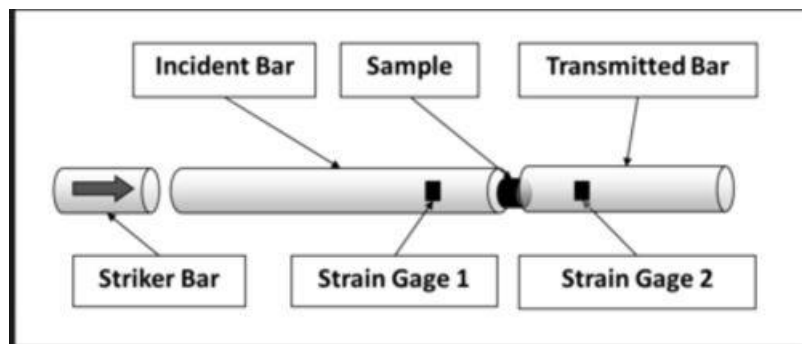


Figura 27. Esquema representativo teste Split Hopkinson [29]

O provete é colocado entre as extremidades de duas barras retas, chamadas de barra incidente e barra transmitida [30]. No final da barra de incidente, é criada uma onda de tensão que se propaga através da barra incidente em direção ao provete. Esta onda é referida como a onda incidente, e ao chegar ao provete, divide-se em duas ondas menores. Uma delas, a onda transmitida, viaja pelo provete e pela barra transmitida, causando deformação plástica no provete. A outra onda, chamada de onda refletida, é refletida para longe do provete e viaja de volta para a barra incidente.

### 2.2.2.3 Teste bloco de impacto

Este teste (Figura 28) é parametrizado pela norma ASTM D950 [1], e consiste num bloco superior (geralmente de aço) que está ligado pelo adesivo a ensaiar a outro bloco maior que é fixado na base do equipamento de teste. O primeiro bloco é atingido por um martelo numa direção paralela (pelo menos no início do impacto) à superfície de ligação. A energia necessária para fratura da amostra é obtida pela energia perdida pelo pêndulo, considerando uma correção para a energia cinética das peças projetadas. Este tipo de ensaio visa criar uma condição de corte puro e constante na camada adesiva.

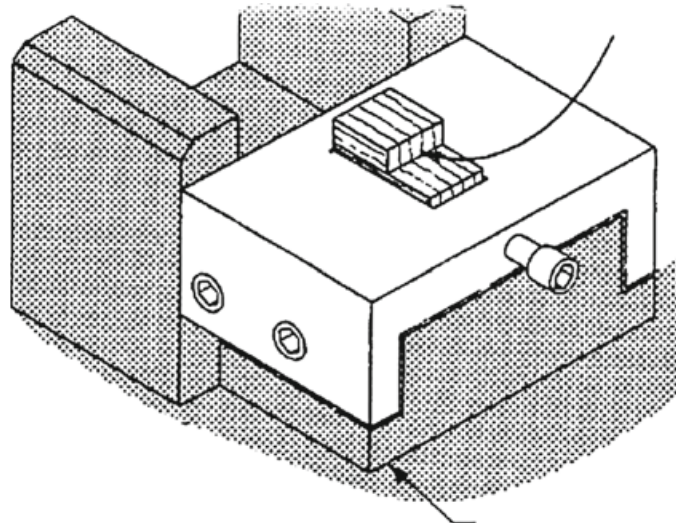


Figura 28. Teste bloco de impacto [4]

Podem ainda ser executados os ensaios criando um ângulo entre o martelo e o bloco, conforme mostra a Figura 29.

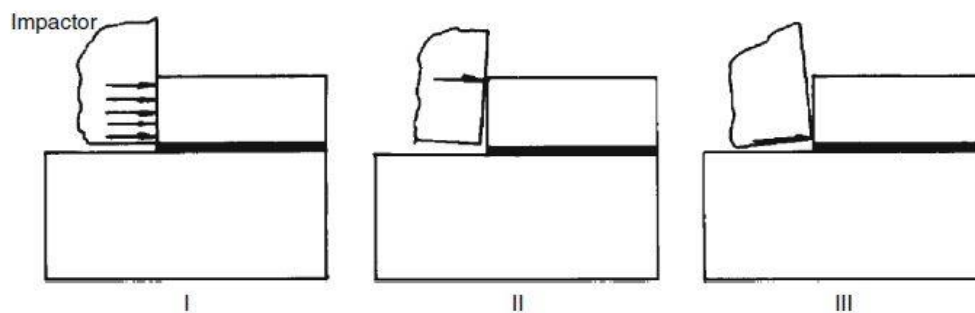


Figura 29. Modos possíveis de impacto [4]

### 2.3 Previsão de resistência de juntas adesivas

No passado, a inexistência de modelos de materiais precisos e critérios de falha adequados levaram ao fabrico de juntas adesivas sobredimensionadas, que invariavelmente resultaram em estruturas mais pesadas e mais caras. Com a melhoria dos métodos de dimensionamento e metodologias preditivas, surgiram novas possibilidades para o uso eficiente das juntas adesivas. Para a análise de juntas adesivas podem ser escolhidas duas alternativas: modelos de forma fechada (métodos analíticos) e métodos numéricos (MEF). O estudo das juntas adesivas remonta à década de 1930 com o modelo de forma fechada de Volkersen [31] que considera materiais totalmente elásticos e deformação adesiva apenas em corte. No entanto, a formulação analítica de juntas adesivas torna-se mais complexa se o adesivo se deformar plasticamente, se forem utilizados aderentes compostos ou se forem utilizados diferentes materiais de aderência. O MEF é a técnica mais popular para juntas adesivas, Adams e colegas de trabalho foram pioneiros nesta técnica [32]. A rotação das juntas, os aderentes e a

plasticidade adesiva e a influência do filete de adesivo foram estudadas em primeira mão por Harris e Adams [33]. A abordagem da mecânica dos meios contínuos para a previsão da resistência das juntas adesivas foi utilizada no início da análise, exigindo a distribuição das tensões e um critério de falha adequado. Uma análise de MEF pode também ser usada em conjunto com critérios de Mecânica da Fratura para previsão da resistência, seja pelo fator de intensidade de tensão ou como abordagens de energia como a técnica de fecho da fenda virtual (TFFV). No entanto, com estas técnicas, a modelação do crescimento do dano torna-se inviável por causa da necessidade de refazer a malha durante a análise e o respetivo custo computacional associado [34]. Foram feitos grandes desenvolvimentos, e um deles é a modelagem de dano por combinação de MEF com elementos de zona coesiva. Esta técnica junta a modelagem de MEF convencional para as regiões que não se espera que sofram danos e uma abordagem de mecânica de fraturas através dos elementos coesivos para simular o crescimento da fenda. Uma alternativa muito recente ao modelo de propagação de fendas dentro dos materiais é o Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX), que usa funções de forma enriquecida para representar um campo de deslocamento descontínuo.

Resumindo, a previsão da resistência das juntas pode ser dividida em modelos analíticos e modelos numéricos. Para os modelos numéricos tem-se as seguintes técnicas:

- Mecânica dos meios contínuos;
- Mecânica da fratura;
- Modelos de dano coesivo;
- Mecânica do dano;
- MEFX.

### 2.3.1 Solicitações estáticas

Pode-se dividir as solicitações estáticas em dois grandes capítulos, modelos analíticos e modelos numéricos. Os modelos analíticos foram a primeira forma de análise das estruturas adesivas, mais tarde com o evoluir das tecnologias começaram a surgir modelos numéricos que trouxeram uma nova forma de analisar as estruturas adesivas.

#### 2.3.1.1 Modelos analíticos

Nas primeiras análises das estruturas adesivas, os métodos preditivos consistiam em formulações analíticas, e nos trabalhos de Volkersen [31], Goland e Reissner [35] que foram precursores de uma série de estudos teóricos que trouxeram simplicidade na forma como se alcançavam os campos de tensão nas estruturas adesivas devido aos pressupostos simplificadores empregados em termos de geometria das estruturas, carregamento e condições de ligação, oferecendo soluções elásticas eficientes em forma

fechada. Assim, cada estrutura ligada poderia ser analisada rapidamente, embora com muitos pressupostos [36]. Com estes modelos pode-se facilmente calcular tensões e deformações, juntamente com a distribuição do momento fletor na estrutura. A força foi tipicamente calculada por critérios de tensão ou baseados em deformação. Até aos dias de hoje, estes estudos foram progressivamente substituídos por análises numéricas, embora os estudos teóricos também tenham sido refinados ao longo dos anos em termos de capacidades de modelação, como não-linearidade material da camada adesiva [37] ou análises geométricas não-lineares [38].

### 2.3.1.2 Métodos numéricos

#### 2.3.1.2.1 Mecânica dos meios contínuos

Na abordagem da mecânica contínua, os valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação, previstos pelas análises por MEF, são normalmente usados em critérios de rotura para prever a resistência das estruturas. Isto é realizado quando os valores previstos, obtidos por critérios de tensão ou baseados em deformação (por exemplo, o Critério de tensão normal máximo (CTNM) ou o Critério máximo de tensão de corte (CMTC), atingem a força dos constituintes da estrutura. Esta abordagem foi prontamente aplicada às juntas de uso geral em aplicações estruturais, logo após o MEF e à programação computacional terem sido disponibilizados (por exemplo, [33]). As vantagens desta técnica incluíram a análise das estruturas adesivas com ou sem um dano inicial, e sob um carregamento arbitrário. No entanto, esses critérios possuem uma limitação intrínseca, uma vez que as estruturas ligadas são propensas a singularidades de tensão no final das regiões sobrepostas devido a cantos afiados. Como resultado, numa análise de MEF para uma estrutura adesiva as tensões aumentam nessa zona com o refinamento da malha e não é obtida convergência, o que resulta em previsões dependentes do tamanho da malha [36]. Ao longo dos anos, foram introduzidas melhorias nesta técnica de modelação como a definição de critérios de falha de tensão ou de deformação mais complexos para diferentes materiais e mecanismos de fratura, ou combinação com modelos de material contínuo mais realistas, mas a dependência da malha ainda não foi resolvida.

#### 2.3.1.2.2 Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos pressupõe que uma dada estrutura e os seus materiais são contínuos. No entanto, a existência de defeitos ou estruturas com mais de um material não se enquadram nesta suposição. Consequentemente, a mecânica dos meios contínuos não tem solução para estes casos, o que resulta em singularidades de tensão ou deformação.

As fendas são os defeitos mais comuns nas estruturas, para os quais a mecânica da fratura foi desenvolvida. Na mecânica da fratura é bem aceite que as tensões calculadas usando a mecânica contínua são singulares (infinitas) na ponta da fissura. As teorias atuais sobre a mecânica, tal singularidade existe quando o ângulo de fissura é inferior a

180°. Este resultado foi encontrado por Williams [39] para singularidades de tensão num entalhe em cunha. Por outro lado, esta suposição também é válida para singularidades de tensões em dois materiais ligados com um canto reentrante, como é o caso das juntas adesivas. A mecânica da fratura foi aplicada com sucesso em muitos problemas de engenharia nos últimos anos. Muitos estudos que tratam de juntas adesivas usam a taxa de libertação de energia de deformação,  $G$ , e o respetivo valor crítico ou resistência à fratura,  $G_c$  [40] em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fissura cresce em ou perto de uma interface. No entanto, a fratura das juntas adesivas ocorre inerentemente em modo misto devido às propriedades variáveis entre diferentes materiais e o complexo sistema de tensões. Os critérios de rotura para a fratura de modo misto podem ser desenvolvidos de forma análoga aos critérios clássicos de falha, embora o conceito de superfície de fratura (ou envelope) seja introduzido.

### 2.3.1.2.3 Modelos de dano coesivo

A implementação dos métodos de Mecânica de Fratura Linear Elástica (MFLE) em computador teve grande sucesso há algumas décadas, mas estas foram limitadas a estruturas com plastificação reduzida na extremidade da fenda. Além disso, os adesivos modernos endurecidos desenvolvem zonas plásticas sob carga que podem ser maiores do que a espessura dos aderentes. Os modelos de dano coesivo (MDC) foram desenvolvidos no final da década de 1950 / início dos anos 1960 [41] para descrever danos sob cargas estáticas na zona de processo coesiva à frente da extremidade da fenda, permitindo obter uma solução eficaz de previsão do dano em estruturas adesivas. Os MDC foram então amplamente testados desde então para simular a iniciação e propagação de fissuras em problemas de rotura coesiva e interfacial ou delaminações em materiais compósitos. Os MDC podem ser formulados em elementos de mola ou mais convencionalmente em elementos coesivos Ferren e Jensen [42] e podem ser facilmente incorporados em análises de MEF convencionais para modelar o comportamento de fratura em vários materiais, incluindo juntas adesivas Ji et al. [43]. O conceito principal dos MDC é que uma ou múltiplas interfaces / regiões de fratura podem ser introduzidas artificialmente em estruturas, nas quais o crescimento de danos é permitido pela introdução de uma possível descontinuidade no campo de deslocamento. Isto é possível graças à definição de leis de tração e separação para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis MDC são aplicadas entre nós emparelhados de elementos coesos, que podem conectar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou diferentes camadas em compósitos ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais que não contactam para simular uma tira fina, isto é, para simular uma ligação adesiva. Os MDC fornecem uma reprodução macroscópica do dano pela resposta de deslocamento-deslocamento relativo entre nós emparelhados ao longo do caminho da fenda, que depende de parâmetros de grande escala que regem o processo de crescimento de fendas, como as energias de fratura. Por este método, são modelados a evolução da resistência e amaciamento até à rutura,

para contabilizar a degradação gradual das propriedades do material. As leis de separação de tração normalmente são construídas por relações lineares em cada uma das etapas de carregamento Yang e Thouless [44], embora uma ou mais etapas possam ser definidas de forma diferente para uma representação mais precisa do comportamento dos materiais.

#### 2.3.1.2.4 Mecânica do dano

Nestas metodologias, um parâmetro de dano é estabelecido para modificar a resposta constitutiva de materiais pela depreciação de rigidez ou força, isto é, para ligações adesivas finas Khoramishad et al. [45], ou delaminações de compósitos ou falha matricial Daudeville e Ladeveze [46], para representar a gravidade do dano material durante o carregamento. Esta variável pode ser usada numa lei de evolução de dano para modelar a absorção de dano antes do início da fenda e o próprio crescimento da fenda. As variáveis de dano podem ser categorizadas em dois grupos principais: variáveis que predizem a quantidade de dano pela redefinição das propriedades constitutivas do material, mas que não se relacionam diretamente com o mecanismo de danos e variáveis ligadas à definição física de um tipo específico de dano, como porosidades ou área relativa das microcavidades [47]. Por ACDM, o crescimento do dano é definido como uma função da carga para modelagem estática ou a contagem cíclica para análises de fadiga. Em comparação com as técnicas de MCD de fadiga, as técnicas de AMCD não fornecem uma distinção clara entre as fases de iniciação à fadiga e de propagação, embora possam fornecer uma base para a análise preditiva Khoramishad et al. [45]. No entanto, pode ser simulada a evolução do dano antes do crescimento da fenda. Por outro lado, a modelação do dano com MDC de fadiga é restrita a caminhos de fenda pré-definidos e, em aplicações específicas, as técnicas da mecânica do dano podem ser recomendadas se o dano for mais generalizado no componente ou o caminho de rotura não for conhecido [48].

#### 2.3.1.2.5 Método de Elementos Finitos eXtendido

O MEFX é uma melhoria recente do MEF para modelar o crescimento de danos nas estruturas. Usando leis de dano para a predição de fratura que se baseia na resistência dos materiais em maciço para o início de dano e tensão para avaliação de falha (definida por  $G_{Ic}$ ), em vez dos valores  $t_n^0/t_s^0$  e  $\delta_n^0/\delta_s^0$  usados para os MDC. O MEFX é superior à modelação por MDC pois não exige que a fenda siga um caminho predefinido. Na verdade, as fendas podem crescer livremente dentro de uma região sólida de um material sem a exigência da malha para combinar a geometria das descontinuidades nem se aproximando perto da fenda [49]. Este método é uma extensão da modelação pelo MEF, cujas características fundamentais foram apresentadas pela primeira vez no final dos anos 90 por Belytschko e Black [50]. O MEFX baseia-se no conceito de partição de unidade e pode ser implementado no MEF tradicional através da introdução de funções locais de enriquecimento para os deslocamentos nodais perto da fenda para permitir o seu crescimento e separação entre as faces da fenda [51]. Devido ao

crescimento da fenda, a extremidade da fenda muda continuamente sua posição e orientação, dependendo das condições de carga e geometria da estrutura, simultaneamente à criação das funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos elementos finitos ao redor do caminho / extremidade da fenda.

### 2.3.2 Solicitações dinâmicas/impacto

Para permitir o uso de adesivos no projeto de estruturas de absorção de energia, é fundamental que os projetistas tenham à sua disposição métodos que permitam a previsão da resistência das juntas sob impacto [52]. Por exemplo, a indústria automível pode usar esses modelos para validar a capacidade de colisão de uma estrutura adesiva sem a necessidade de testes mecânicos caros. Nesta secção, é feita uma revisão do estado da arte da modelação do comportamento do adesivo e das juntas adesivas sob grandes taxas de deformação. Pode-se dividir em duas seções, a primeira discute o trabalho realizado na modelação da resposta mecânica dependente da taxa de deformação de adesivos, enquanto a segunda seção concentra-se nas abordagens usadas para modelar juntas completas.

#### 2.3.2.1 Modelos analíticos

A previsão da resistência dinâmica das juntas adesivas é extremamente importante para os vários utilizadores dessa tecnologia. O uso de um modelo numérico adequado para modelar juntas adesivas permite o cálculo das tensões e deformações presentes no adesivo e nos substratos. Os adesivos podem apresentar comportamento viscoelástico e viscoplástico que podem ser representados usando um modelo constitutivo.

##### 2.3.2.1.1 Modelos Voigt/ Maxwell

A deformação elástica de um adesivo em função do tempo pode ser expressada pelos modelos viscoelásticos de Voigt ou Maxwell, que utilizam a soma das tensões nas molas e amortecedores para modelar o comportamento do adesivo. A complexidade desses modelos pode aumentar adicionando elementos adicionais. Os parâmetros utilizados neste modelo devem ser determinados por observação experimental.

Em 2000, Sato e Ikegami [53] realizaram um estudo sobre as propriedades viscoelásticas de um adesivo estrutural epóxico curado e tentaram modelar a tensão dinâmica das juntas adesivas sujeitas a impacto usando modelos de Voigt de três e cinco elementos. Os autores concluíram que o modelo de Voigt de cinco elementos foi capaz de descrever o comportamento de alta taxa do adesivo e usou este modelo para criar a melhor geometria de juntas. Figura 30 mostra uma representação esquemática dos modelos utilizados neste trabalho.

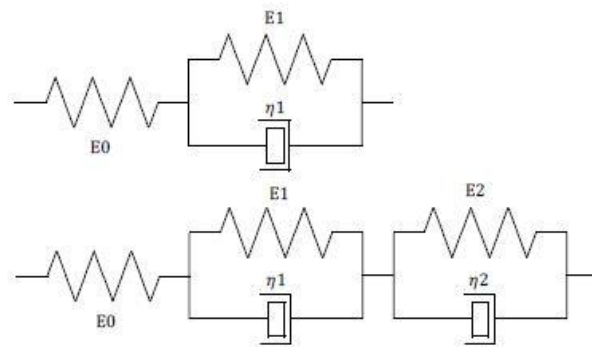


Figura 30. Exemplo de modelo de Voigt de três e cinco elementos [53]

Khan et al. [54] em 2006 seguiram uma abordagem semelhante para modelar o comportamento uniaxial compressivo do polímero em condições de operação quasi-estáticas e dinâmicas. No seu trabalho usaram um modelo de forma diferencial simples baseado numa combinação de molas lineares e não-lineares. Os resultados foram comparados com um princípio de superposição modificado. O novo modelo vai ao encontro com as observações experimentais, numa ampla gama de taxas de deformação acima e abaixo dos regimes de temperatura de transição vítrea. O trabalho Iwamoto et al. [55] em 2010, também empregou esse tipo de modelação, sendo usado o modelo elasto-viscoplástico de quatro elementos para modelar a tensão na articulação. Os autores foram capazes de expressar com sucesso as características básicas dos adesivos estruturais das curvas experimentais, tais como a porção elástica linear, os níveis de amaciamento da deformação e endurecimento da deformação.

#### 2.3.2.1.2 Modelo Cowper – Symonds

Um modelo de uso comum para simular a dependência da taxa de deformação dos materiais é o modelo de Cowper e Symonds [56] que pode ser caracterizado como um simples modelo de endurecimento elasto-plástico e de taxa de deformação que usa a formulação empírica descrita a partir de uma obra de Ludwik [57] de 1909, em que os materiais ganham resistência quando existem deformações plásticas. Goglio et al. [58] usaram esse modelo para se adequarem aos dados experimentais dos testes SHPB de um adesivo epóxico descobrindo que, embora seja razoável para altas taxas de deformação (acima de  $102 \text{ s}^{-1}$ ), o modelo não era adequado para menores taxas de deformação.

#### 2.3.2.1.3 Modelo Johnson – Cook

Enquanto os modelos Voigt / Maxwell e Cowper-Symonds são de natureza viscoelástica, o modelo Johnson e Cook [59] é um modelo viscoplástico que fornece uma descrição da dependência da taxa de deformação da tensão de falha equivalente. Alguns autores empregaram este modelo para criar critérios de falha para materiais adesivos, como Morin et al. [60], Goglio et al. [58] usaram esse modelo para SHPB e descobriram que para altas taxas de deformação não é tão preciso quanto o modelo Cowper-Symonds.

#### 2.3.2.1.4 Modelos de sobretensão

Nestes modelos, o efeito de dependência da taxa de deformação é conseguido permitindo que as tensões aumentem para além da superfície cedência, que é independente da taxa de solicitação, após a aplicação de uma carga e, em seguida, permitindo que elas relaxem de volta à superfície de cedência ao longo do tempo. Em 1989, Kitagawa et al. [61] desenvolveram um modelo para descrever a taxa de dependência de um polipropileno baseado na teoria do excesso de tensão de Krempl [62] para metais. Este modelo mostrou ser capaz de modelar as propriedades viscoelásticas de materiais poliméricos, embora com algumas limitações.

Em 1995, Chiu e Jones [63] desenvolveram um modelo constitutivo unificado para uma construção adesiva de filme sobre o modelo Kitagawa e a teoria unificada de Ramaswamy et al. [64]. O modelo foi comparado com os dados experimentais e mostrou ser capaz de modelar o comportamento da taxa de deformação.

Em 2001, Crocombe [65] implementou com sucesso um modelo baseado em sobretensão num *software* de MEF – ABAQUS® e utilizou um modelo baseado em sobretensão para prever o comportamento da taxa de deformação das juntas JSS e TAST. O modelo de sobretensão foi capaz de modelar corretamente a resposta da junta JSS, embora não tenha conseguido prever o comportamento das juntas TAST.

#### 2.3.2.1.5 Curvas de fluência e curvas de tensão-deformação isócronas

Um estudo realizado por Crocombe [65] em 1995 estudou a modelação e a previsão da resistência dependente da velocidade das juntas adesivas usando leis de penetração e curvas de tensão-deformação isócronas usando *software* adequado. Os autores descobriram que as curvas de fluência não são adequadas para modelar as taxas de deformação em rampas (típicas das cargas de impacto), pois requerem uma quantidade considerável de tempo para chegar a uma solução precisa. Em contraste, uma solução baseada em curvas de tensão-deformação isócronas derivadas de dados experimentais mostrou-se eficaz para o material e a configuração em estudo.

#### 2.3.2.2 Métodos numéricos

A modelação numérica do comportamento de impacto das juntas adesivas é atualmente um tema de pesquisa muito ativo com aplicação industrial direta. A avaliação de novos projetos para estruturas que causam colisões podem ser simplificadas usando o MEF, reduzindo os grandes custos inerentes à construção ou teste de protótipos. A literatura sugere uma variedade de modelos de complexidade diferente para resolver esse problema, que podem incluir efeitos inerciais e propriedades dependentes da taxa de deformação (derivadas de dados experimentais ou modelos constitutivos). Os modelos dinâmicos estão geralmente disponíveis em pacotes de MEF comercial ou personalizado e podem realizar análises de tensão dependentes da taxa de deformação visando

identificar áreas no adesivo onde as concentrações de tensão correspondem a locais de início da falha.

#### 2.3.2.2.1 Configurações do modelo

O processo de modelar o comportamento do impacto nas juntas adesivas geralmente exige o uso de modelos dinâmicos, como para grandes taxas de deformação a influência dos efeitos inerciais torna-se significativa e introduz tensões adicionais na junta. Alguns autores, como Harris e Adams [66] utilizaram modelos sem qualquer tipo de efeitos inerciais, mas com propriedades dependentes da taxa de deformação, que são válidas para menores taxas de carga e pequenas massas. Alternativamente, se os materiais não forem sensíveis à taxa de deformação e as velocidades de impacto forem altas, são usados modelos com descrições de propriedades quase estáticas em conjunto com modelação inercial para melhorar a precisão nas previsões de tensões. Isto também é válido nas juntas onde o rendimento de aderência ocorre sob impacto, pois nessas juntas o adesivo não possui contribuição significativa no comportamento da junta e a maioria dos aderentes metálicos não apresentam dependência da taxa de deformação. Higuchi et al. [67], Higuchi et al. [68], Sawa et al. [69] em 2002 usaram o pacote de *software* DYNA3D para modelar a propagação da distribuição de tensões em SLJ sob diferentes cargas de impacto. Este tipo de modelos dinâmicos são formulados de acordo com a Equação abaixo.

$$[M][A] + [K][U] = [F] \quad (1)$$

Onde [M] é a matriz de massa, [A] é o vetor de aceleração, [K] é a matriz de rigidez, [U] é o vetor de deslocamento e [F] é o vetor de carga externa.

Challita e Othman [70] também empregaram um modelo dinâmico FEA tridimensional para avaliar as tensões presentes no teste SHPB de juntas de sobreposição dupla com substratos metálicos. Para substratos e adesivos, assumiu-se um comportamento elástico. Hazimeh et al. [71] realizaram um trabalho de modelação semelhante em 2015, mas usando substratos de compósito nas juntas de sobreposição dupla.

Modelos mais complexos combinam os efeitos inerciais com as propriedades dependentes da taxa de deformação, tanto para o adesivo, como para os aderentes ou ambos. A fim de obter previsões confiáveis e precisas do comportamento do impacto das juntas adesivas usando modelos numéricos, as propriedades dos materiais utilizadas no modelo devem, de preferência, ser determinadas com valores adequados das taxas de deformação [72-74]. O trabalho de Xia et al. [75] em 2009 visou compreender em profundidade a falha dinâmica das juntas soldadas. Os modelos criados pelos autores utilizaram uma análise totalmente dinâmica que tratou a camada adesiva como uma ligação rígida entre os dois substratos dependentes da taxa de deformação. Yang et al. [76], em 2012, avaliou a aplicação de um MEF simplificado para modelação da junta adesiva endurecida. O modelo numérico utilizou dados dependentes da taxa de deformação para um adesivo epóxico endurecido e para os substratos de aço definindo

curvas dos parâmetros de falha em relação à taxa de deformação efetiva. Isto foi complementado pela adição ao modelo de dados dependentes da taxa de deformação para as propriedades pré-falha.

#### 2.3.2.2.2 Falhas na previsão de carga

Os critérios de falha das juntas adesivas foram historicamente divididos em duas categorias principais: a abordagem da resistência dos materiais e a abordagem da mecânica da fratura. A abordagem da resistência dos materiais baseia-se na avaliação das tensões máximas permitidas [33, 77] ou das deformações [78, 79]. O trabalho de Adams et al. [2] demonstrou que a abordagem da resistência dos materiais não é especialmente adequada para juntas adesivas, fundamentalmente devido à presença de singularidades de tensão que impedem o uso de qualquer critério que limite uma tensão ou deformação máxima para prever o início da falha e faça essa abordagem extremamente dependente da malha. Em contrapartida, a abordagem da mecânica da fratura pode ser aplicada a pontos onde existem as singularidades. No entanto, isto requer conhecimento dos fatores de intensidade da tensão que nem sempre podem estar relacionados às propriedades intrínsecas do material [5]. Outra falha fundamental desta abordagem é o fato de que, para se iniciar uma falha, assume-se de que já deve existir uma fenda no adesivo ou no substrato, o que pode não ser sempre o caso [80].

Dean et al. [81] em 1999 realizaram um estudo com a intenção de comparar o desempenho medido e previsto de JSS em condições de impacto (taxas de deformação variando de  $2 \cdot 10^{-5}$  a  $115 \text{ s}^{-1}$ ), através do uso de um aparelho de queda de peso. Os modelos de von Mises e Drucker-Prager implementados no MEF foram utilizados para prever a falha da junta. Os resultados indicaram que o critério de von Mises não era adequado para adesivos endurecidos, mas indicaram que o modelo linear de Drucker-Prager parecia aplicável. Os autores concluíram que, para os adesivos endurecidos, é necessário um modelo elástico - plástico e que este modelo deve empregar um critério com sensibilidade à componente de tensão hidrostática.

Zgoul e Crocombe [82] empregaram um modelo de von Mises e um de Drucker-Prager para modelar o comportamento numérico dos espécimes JSS e TAST. Todos os modelos foram implementados em análise de elementos finitos e os resultados comparados com dados experimentais. Os resultados não foram muito satisfatórios, já que o modelo de Von Mises revelou-se impreciso, pois não explicava a sensibilidade hidrostática. O modelo de Drucker-Prager foi capaz de acomodar a sensibilidade hidrostática, mas foi relatado como tendo problemas de convergência.

Recentemente, a resistência dos materiais e as abordagens da mecânica da fratura foram combinadas em MDC com o objetivo de minimizar essas falhas [83]. Estes modelos empregam leis de tração-separação, que modelam a rigidez inicial e degradação do elemento. Estas leis podem exibir várias formas diferentes, sendo as mais comuns as leis triangulares e trapezoidais. Uma representação esquemática de

uma lei triangular de separação de tração para o modo I e o modo II é mostrada na Figura 31.

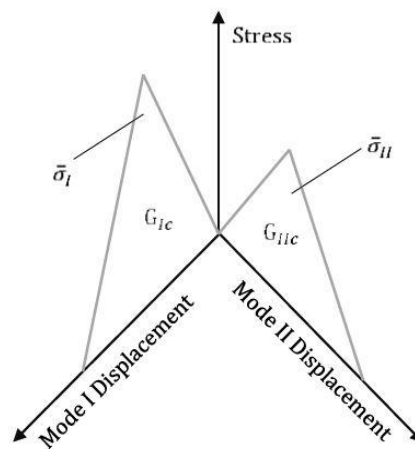


Figura 31. Representação da lei tração-separação para o modo 1 e 2 [83]

O trabalho de Carlberger et al., publicado em 2007 [84] demonstrou a validade de usar este tipo de abordagem para prever a resistência ao impacto. Autores como Haufe et al. [85], May et al. [86], Clarke et al. [87] e Avendaño et al. [88] mostraram que os pacotes de *software* comerciais modernos suportam as previsões precisas de carga de falhas usando modelos coesivos dinâmicos complexos com dados dependentes da taxa de deformação.

## 2.4 Comportamento de juntas adesivas sujeitas a impacto

### 2.4.1 Avaliação experimental

Öz e Özer [89] estudaram o comportamento de juntas adesivas mistas e simples à falha. Para o comprimento de sobreposição selecionado, foram determinadas as cargas de falha das juntas adesivas com os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e 3M DP-8005®. Verificou-se que a maior carga de rotura ocorreu na junta adesiva com Araldite® 2015. De seguida, foram testadas as juntas adesivas mistas. Considerou-se duas combinações adesivas diferentes (AV138+2015 e AV138+DP-8005). Obteve-se um resultado interessante em que as juntas mistas consideradas (AV138+2015, AV138+DP-8005) proporcionam forças adesão superiores às dos adesivos usados individualmente, mesmo que o adesivo dúctil tenha uma resistência maior do que o adesivo rígido. No último passo deste estudo, a investigação experimental foi focada na determinação da relação de comprimento de ligação ideal para a junta mista. A relação ótima de comprimento de ligação para a junta foi então investigada utilizando três razões (0,3, 0,5, 0,7). Conclui-se que o tipo de adesivo e a relação de comprimento de ligação desempenham um papel importante na linha de adesão mista. Foram também

realizadas comparações das cargas de falha demonstradas experimentalmente e forças de corte com soluções disponíveis de forma fechada. As cargas de falha experimental concordaram com as obtidas do método de Volkersen e dos critérios de rendimento global.

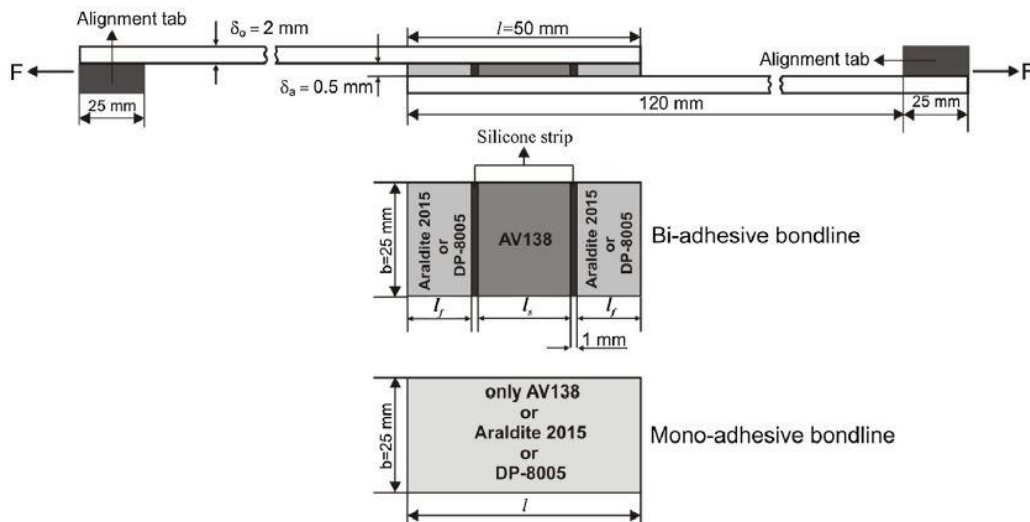


Figura 32. Esquema c/ medidas provetes e adesivos usados [89]

Neste estudo foi possível concluir que as juntas mistas com adesivo dúctil no meio permite que o adesivo rígido atinja a sua resistência máxima ao corte. Sabe-se que o adesivo dúctil é um adesivo intermediário e a sua resistência ao corte está entre as resistências dos adesivos flexíveis e rígidos. O uso deste tipo de adesivo nas extremidades permite que o adesivo rígido atinja a capacidade de resistência ao corte total. Em contraste, o uso de adesivo flexível com baixa resistência nas extremidades não permite que o adesivo rígido atinja a capacidade de resistência ao corte total. Pode-se portanto, afirmar que as juntas mistas têm vantagens face a uma junta com um único adesivo.

da Silva e Lopes [18] também estudaram experimentalmente as juntas adesivas mistas. Selecionaram um adesivo extremamente rígido (Araldite® AV138), um adesivo extremamente flexível e dúctil (DP-8005) e dois adesivos intermédios (Araldite® 2013 e Araldite® 2021), construíram JSS com uma sobreposição de 50 mm, uma largura de 25 mm e uma espessura de adesivo de 2 mm conforme mostra na Figura 33.

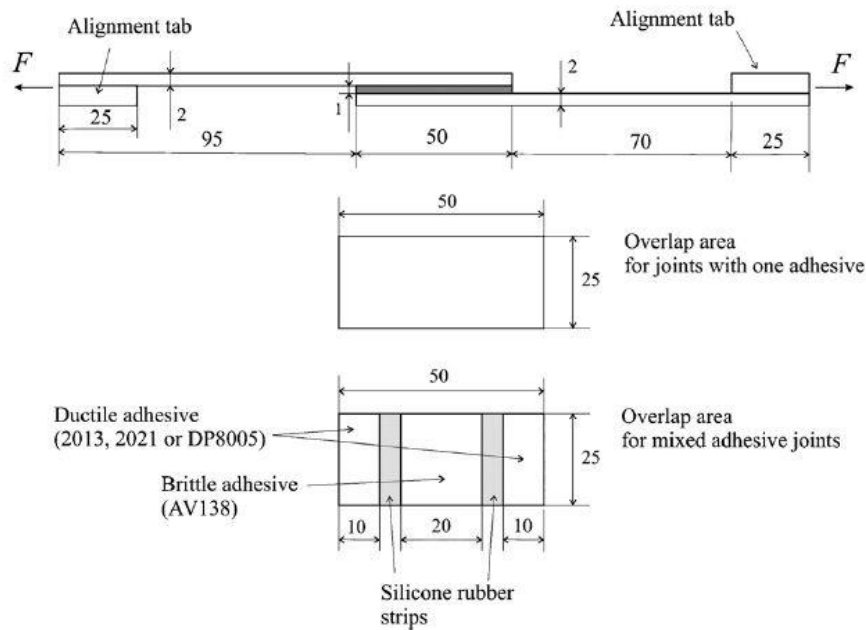


Figura 33. Geometria das juntas (dimensões em mm) [18]

Na Figura 34 podem-se ver os resultados obtidos em que em todos os casos, as juntas mistas oferecem maior resistência que as juntas com apenas o adesivo rígido.

Adhesives(s)	Failure load
	Experimental
AV138 (brittle)	$11.3 \pm 0.3$
2013 (ductile)	$23.4 \pm 1.3$
2021 (ductile)	$28.1 \pm 0.6$
DP8005 (very ductile)	$7.8 \pm 0.9$
AV138+2013	$20.5 \pm 0.7$
AV138+2021	$24.0 \pm 0.8$
AV138+DP8005	$17.2 \pm 0.2$

Figura 34. Resultados obtidos [18]

#### 2.4.2 Previsão numérica

das Neves et al. [17] desenvolveram um modelo analítico para juntas mistas de sobreposição simples com um adesivo para baixas temperaturas e outro para altas temperaturas. Os adesivos de alta temperatura são frágeis a baixas temperaturas e tendem a dar uma fraca resistência à junta. Os autores apresentaram uma solução para juntas sujeitas a temperaturas extremas tais como aviões supersônicos ( $-55^{\circ}\text{C}$  a  $+200^{\circ}\text{C}$ ). Foi desenvolvido um modelo através do MEF para avaliar a distribuição de tensões. Ao longo do desenvolvimento do modelo, consideraram espaços vazios entre os adesivos para evitar a mistura de ambos. Na Figura 35 é ilustrado a JMSS dividida em

cinco regiões, três adesivas (regiões K=2, 4, 6) e duas regiões de intervalo (regiões K=3, 5).

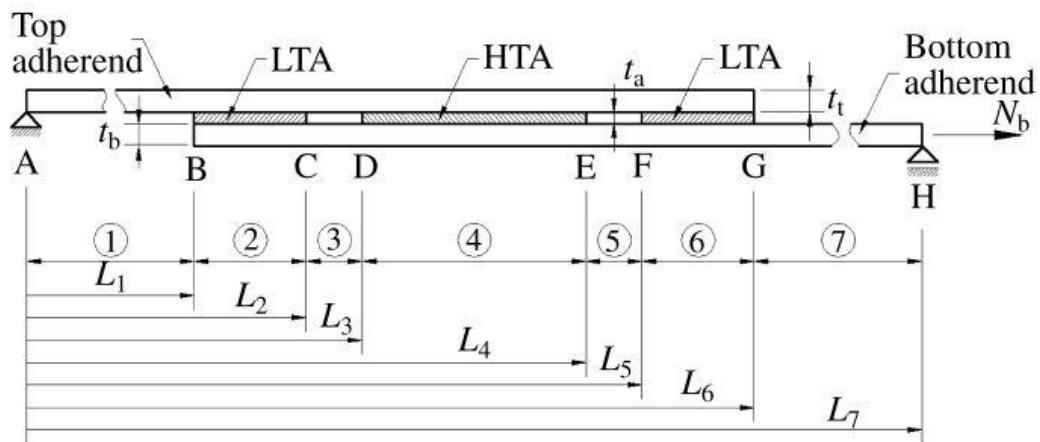


Figura 35. Geometria de uma JMSS [17]

Cada região adesiva foi modelada como a região de sobreposição numa JSS com apenas um adesivo e nas regiões vazias, os aderentes não são ligados de forma adesiva. Desta forma essas regiões são semelhantes às regiões externas, mas em vez de um aderente, existem dois aderentes tratados de forma independente.

**DESENVOLVIMENTO**



## 3 DESENVOLVIMENTO

### 3.1 Técnica numérica para previsão do comportamento ao impacto

Neste capítulo será estudada a resistência de JMSS com MDC. A análise numérica realizada tem por base o *software* ABAQUS® que se baseia no MEF. Na fase inicial deste trabalho será feita uma abordagem à construção dos modelos numéricos e a respetiva validação, comparando os resultados obtidos com os resultados obtidos experimentalmente e numericamente por outro autor [90].

Após a validação dos modelos terá início o estudo numérico onde serão testadas alterações geométricas tais como a espessura dos aderentes, comprimento de sobreposição, chanfros e filetes. Estas alterações vão ser analisadas através das curvas  $P-\delta$  respetivas, a partir das quais se obtém a resistência da junta, e das tensões de arrancamento e corte, sendo desta forma possível verificar quais são os parâmetros que maior influência têm no comportamento da junta.

#### 3.1.1 Condições da análise numérica

As condições de análise numérica utilizadas para o modelo de validação, de seguida apresentadas, foram as descritas por Silva [90]. Foi construído um modelo 2D para simplificar o modelo e reduzir o número de elementos de malha.

O modelo foi dividido em 4 secções conforme é apresentado na Figura 36. Considerou-se os substratos e a massa com elementos sólidos homogéneos. Os adesivos (flexível e rígido) foram modelados como elementos coesivos. Para o efeito, na atribuição de propriedades, considerou-se um comportamento elástico do tipo *traction separation*, um critério de início de dano em modo misto *quads damage*.

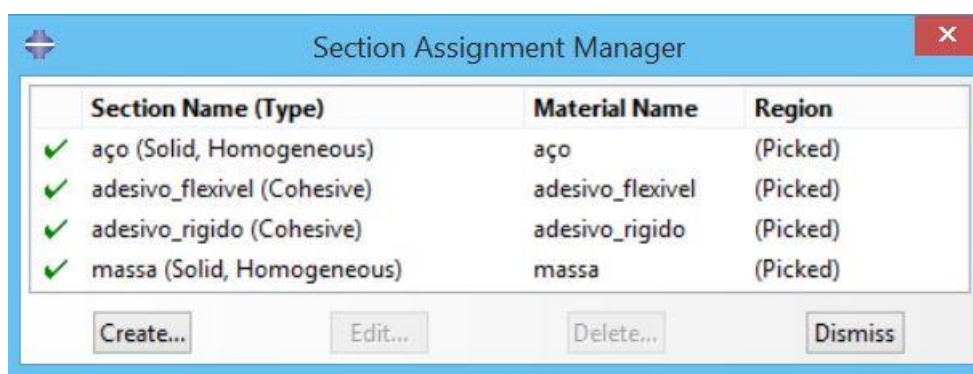


Figura 36. Definição das secções para os constituintes das juntas em estudo

Em *field outputs* foram selecionados alguns parâmetros para a análise de resultados. O parâmetro RF regista a força de reação aplicada em cada instante. O parâmetro U regista o deslocamento que combinando com RF permite obter a curva P- $\delta$ . O parâmetro SDEG permite analisar visualmente o dano na camada adesiva. O parâmetro STATUS faz com que os elementos coesivos sejam eliminados individualmente a partir do momento em que as suas propriedades mecânicas são anuladas. Por fim, o parâmetro PEEQ permite identificar a deformação plástica equivalente nos aderentes.

Foram aplicadas condições fronteira à junta (Figura 37) que permitem reproduzir as condições do ensaio experimental. Foi aplicado um encastramento na aresta vertical livre de um dos aderentes de forma a impedir os movimentos de translação nos eixos X e Y e para impedir a rotação em torno do eixo Z. No aderente superior foi criada uma restrição de movimento no eixo Y garantindo uma correta aplicação da força de impacto na camada adesiva.

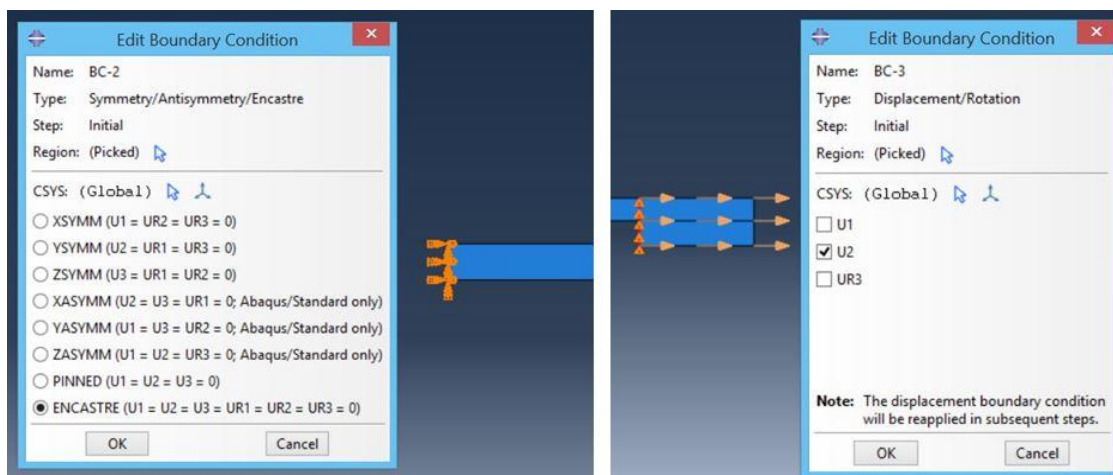


Figura 37. Condições fronteira do modelo 2D da JMSS

A simulação do impacto foi realizada com a criação de uma secção que retrata a massa utilizada no ensaio experimental. Foi atribuída a essa secção uma velocidade de 1,75 m/s conforme é apresentado na Figura 38, o que corresponde a uma energia de impacto de 40 J na junta.

O modelo numérico tem um tempo de ensaio de 5 ms. Os *field outputs* foram configurados de forma a que a evolução temporal representada graficamente seja feita em períodos de 50  $\mu$ s. Configurou-se o *history outputs* para que o registo do deslocamento e das forças de reação fossem registadas a cada 100 incrementos. Com a redução em 100 vezes do número de pontos conseguiu-se fazer o tratamento de dados com uma boa resolução para identificação de picos de carga.

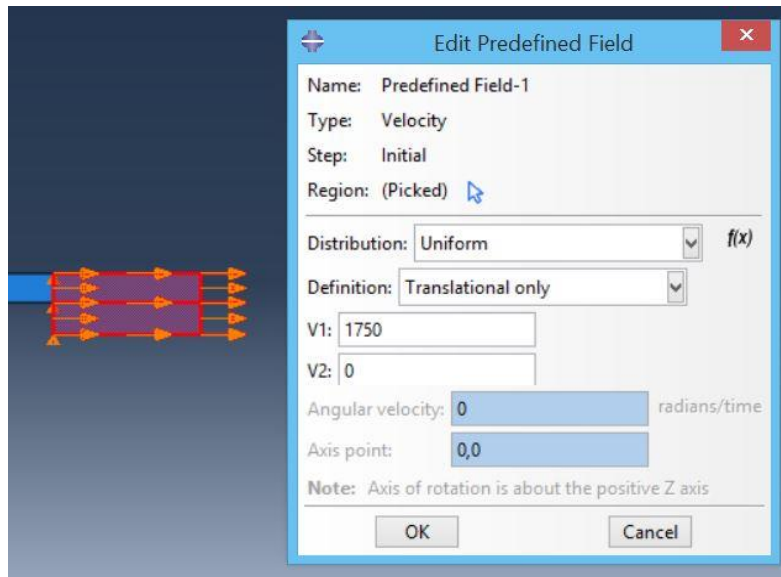


Figura 38. Velocidade aplicada à massa

Foi criada uma malha uniforme com elementos quadriláteros com dimensão de 0,2 mm. Foram utilizados dois tipos de elementos, para os substratos e massa foram selecionados elementos CPE4R com deformação plana resultando em 13050 elementos. Foi utilizado um controlo de malha do tipo estruturados. Para os adesivos foram definidos elementos coesivos COH2D4, bidimensionais de 4 nós resultando em 125 elementos com um controlo de malha do tipo *sweep*. No total obteve-se uma malha com 13175 elementos (ver Figura 39).

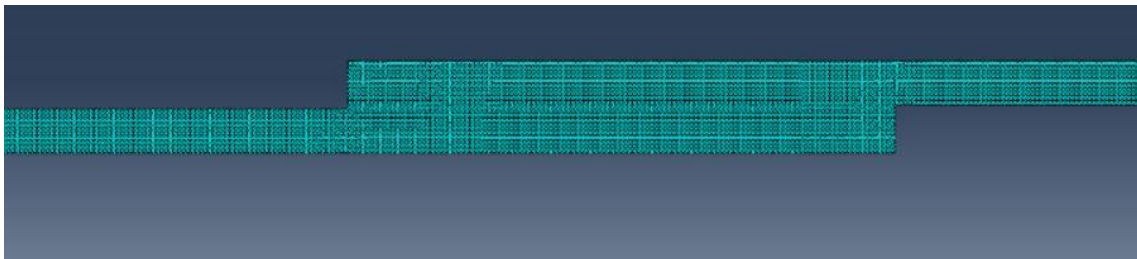


Figura 39. Malha aplicada ao modelo de validação

Esta malha será utilizada na validação da técnica numérica. No capítulo do estudo numérico, para além destes elementos, serão também utilizados elementos triangulares CPE3, com um refinamento da malha maior nas zonas de maior importância. No entanto, estas alterações serão descritas com maior pormenor no capítulo respetivo

### 3.1.2 Modelos de dano coesivo

Como referido no capítulo anterior, os MDC têm sido bastante utilizados nos últimos anos para o estudo da resistência das juntas adesivas. Estes apresentam como vantagem o facto de aliarem metodologias de resistência dos materiais e da mecânica da fratura permitindo, dessa forma, prever a resistência das juntas adesivas e a propagação do

dano até à rotura. Estes modelos têm por base o pressuposto que é possível introduzir defeitos artificialmente nos modelos a simular através da inclusão de descontinuidades no campo de deslocamentos. A técnica consiste em induzir a degradação progressiva através do efeito do amaciamento das tensões, em função dos deslocamentos relativos entre faces da fenda. Este efeito é conhecido por lei coesiva ou lei tração-separação ( $t$ - $\delta$ ). Existem diferentes tipos leis coesivas: Triangular [91], Linear-Parabólica [92], Exponencial [93], Polinomial [94] e Trapezoidal [95]. Para a simulação numérica deste trabalho foi escolhida a lei coesiva triangular, pela sua simplicidade e facilidade na introdução dos parâmetros [96] e por estar integrada no programa de MEF usado (ABAQUS®). O modelo triangular está representado na Figura 40 onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro e a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto.

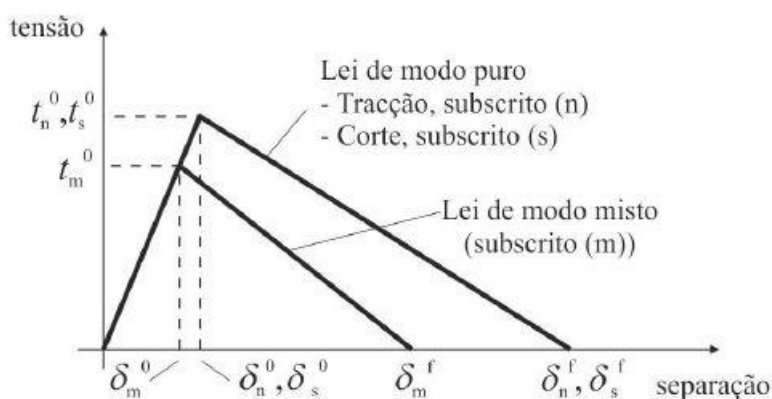


Figura 40. Lei triangular do MDC

Nesta lei, distinguem-se dois modos. O modo puro caracteriza-se por a propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo forem anuladas na lei coesiva respetiva. Em modo misto, são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar a tensão e corte [97]. Através da cinemática dos elementos coesivos, são determinadas as componentes de deformação em tração ( $\varepsilon_n$ ) e corte ( $\varepsilon_s$ ). Em camadas finas de adesivo, entre aderentes rígidos, as tensões de membrana são desprezadas. Antes da ocorrência do dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz  $\mathbf{K}_{COH}$ , que relaciona as tensões e deformações em tração e corte através dos elementos coesivos. Esta matriz é definida da seguinte forma:

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{ns} & K_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{COH} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2)$$

Esta matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição depende da formulação utilizada. Caso seja usada uma formulação local, esta é usada para simular fraturas de espessura nula, em que os parâmetros da matriz possuem valores extremamente elevados, com a finalidade de não haver deformações na estrutura

induzidas pela presença dos elementos coesivos [98]. Na formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, adquire-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que:

$$K_{nn} = E, K_{ss} = G, K_{ns=0}, \quad (3)$$

onde  $E$  corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e  $G$  ao módulo de elasticidade transversal. Considerando esses parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [97]. Em modo misto, o início do dano pode ser definido por diferentes critérios, como o critério de tensão nominal quadrática, expresso pela seguinte expressão:

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1. \quad (4)$$

$\langle \rangle$  são os parêntesis de Macaulay, que indicam que uma tensão de compressão não induz dano. Este critério distingue-se pela sua precisão, já testada em trabalhos anteriores [99]. Quando a resistência coesiva em modo misto ( $t_m^0$ ) é atingida, a rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de nós homólogos  $\delta_m^f$  é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$ :

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1 \quad (5)$$

### 3.1.3 Validação da técnica numérica

A validação da técnica numérica foi realizada com base no trabalho realizado por Silva [90] ao longo da sua tese de mestrado. As juntas fabricadas para os seus ensaios experimentais seguem as normas ASTM D1002 e ISO 4587. As dimensões utilizadas na validação do modelo serão as utilizadas por Silva.

#### 3.1.3.1 Geometria da junta

Na Figura 41 é representada a geometria da JMSS constituída por dois aderentes de dimensões iguais, com um comprimento de sobreposição de 25 mm onde são aplicados os adesivos com uma espessura de 0,2 mm.

O adesivo rígido ocupa o centro da zona ligada com 2/3 do comprimento de sobreposição, e o adesivo flexível ocupa as extremidades com 1/6 do comprimento de sobreposição em cada.

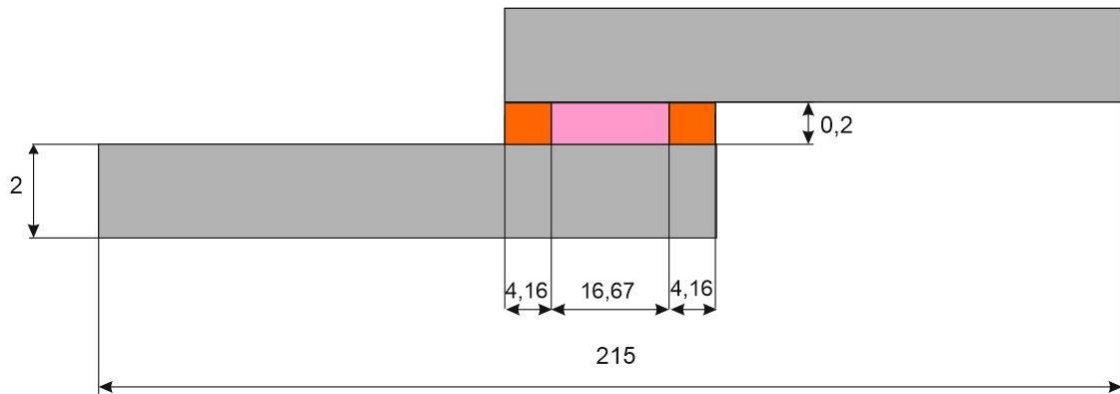


Figura 41. Geometria e dimensões da junta JMSS

### 3.1.3.2 Materiais utilizados

#### 3.1.3.2.1 Substratos

Os substratos são constituídos por aço de alta resistência DIN 55 Si7 e as suas propriedades são apresentadas na Tabela 7, onde  $E$  representa o módulo de elasticidade longitudinal,  $\sigma_y$  representa a tensão de cedência à tração,  $\sigma_f$  representa a tensão de rotura à tração,  $\epsilon_f$  é a deformação de rotura à tração e por fim  $\rho$  é a densidade. A escolha deste aço garante que não existe deformação plástica nos aderentes durante os ensaios. Desta forma a resistência das juntas dependerá apenas dos adesivos.

Tabela 7. Propriedades dos aderentes [90]

Propriedades	Aço DIN 55 Si7
$E$ [GPa]	210
$\sigma_y$ [MPa]	1078
$\sigma_f$ [MPa]	1600
$\epsilon_f$ [%]	6
$\nu$	0,3
$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	7,8

#### 3.1.3.2.2 Adesivos

Para a validação da técnica numérica, foram utilizados três adesivos, dois dúcteis e flexíveis e o terceiro rígido. O adesivo rígido é o Araldite® AV138/HV998. Este adesivo

foi desenvolvido pela empresa Huntsman, e é um adesivo epóxico de dois componentes que cura à temperatura ambiente o que resulta num material com elevada rigidez e excelente resistência mecânica, resistência à temperatura elevada e a ambientes agressivos. É um adesivo muito usado em aplicações ligadas nas áreas da eletrónica e indústria aeroespacial [100].

Os adesivos dúcteis são o Momentive® RTV106 e o 3M® DP-8005. O RTV106 é um silicone mono componente em forma de pasta, é extremamente dúctil e tem uma boa resistência a altas temperaturas. Este adesivo é utilizado principalmente como vedante ou como isolante elétrico [101].

O adesivo DP-8005 foi desenvolvido pela 3M e é um adesivo acrílico estrutural de cura rápida, ideal para superfícies com baixa energia superficial. Este adesivo foi desenvolvido para ligar materiais como PVS, PVE ou PP e tem uma boa resistência a produtos químicos, água, humidade e corrosão [102].

Na Tabela 8 são apresentadas as propriedades mecânicas dos adesivos para condições de ensaio estático. Os valores de  $E$  e  $t_n$  foram determinados experimentalmente através de ensaios de tração e  $G$  e  $t_s$  através de ensaios de corte (TAST). As energias de fratura  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  foram determinadas através de ensaios DCB e ENF.

Tabela 8. Propriedades dos adesivos [90]

Adesivo	RTV106	DP-8005	AV138
$E$ [MPa]	1,6	590	4890
$G$ [MPa]	0,86	159	1560
$t_n^0$ [MPa]	2,3	6,3	41
$t_s^0$ [MPa]	1,97	8,4	30,2
$G_{IC}$ [N/mm]	2,73	1,1	0,35
$G_{IIC}$ [N/mm]	5	6	4,91
$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,07	1,06	1,7
N	-	0,3 <sup>a</sup>	0,35 <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Valor estimado [4]; <sup>b</sup> valor do fabricante; <sup>c</sup> valor típico para adesivos epóxicos

As propriedades a diferentes velocidades de ensaio foram determinadas na tese de Silva [90] e são apresentadas na Tabela 9. As propriedades foram obtidas a diferentes velocidades de ensaio, sendo que a 1 mm/min e 100 mm/min foram determinadas por ensaios experimentais. Para a velocidade de 105000 mm/min, as propriedades foram obtidas através de extrapolação logarítmica [82]. De realçar que as propriedades entre parênteses para o adesivo AV138 a uma velocidade de 105000 mm/min referem-se a um ajuste feito devido a diferenças obtidas entre as simulações numéricas e os valores experimentais de referência. Este ajuste será melhor explicado no capítulo 3.1.3.5.

Tabela 9. Parâmetros coesivos [90]

Adesivo	Velocidade [mm/min]	$t_n^0$ [MPa]	$t_s^0$ [MPa]	$G_{IC}$ [N/mm]	$G_{IIC}$ [N/mm]
DP-8005	1	6,3	8,4	1,1	6
	100	13	17,4	-	-
	105000	27,5	36,7	1,1	6
AV138	1	41	30,2	0,35	4,9
	100	49,9	36,2	-	-
	105000	70,2 (30)	51,7 (22,1)	0,35	4,9
RTV106	1	2,3	1,97	2,73	5
	100	-	-	-	-
	105000	-	-	-	-

### 3.1.3.3 Ensaios de impacto

Os ensaios de impacto realizados por Silva [90] foram realizados no equipamento Rosand® Instrumented Falling Weight Impact Tester type 5 HV, e consistiram na queda de uma massa a uma determinada altura que embate no provete a ensaiar, o que promove a transferência de energia para quebrar a ligação adesiva.



Figura 42. Sistema de fixação das JSS [104]

Nos ensaios experimentais realizados no trabalho de Silva [90], definiu-se como objetivo a solitação com uma energia de 40 J aplicadas através de uma massa de 26 kg ao longo do ensaio.

Desta forma, aplicando a equação (6) pode-se obter uma altura de queda de 15,7 cm.

$$E_p = m \times g \times h_0. \quad (6)$$

$E$  representa a energia de impacto,  $m$  a massa do peso,  $g$  a aceleração da gravidade e  $h_0$  representa a altura da queda do peso.

Devido ao facto de na modelação numérica não ser considerada a altura da queda, utilizou-se a equação (7) para se obter a velocidade da massa no momento do impacto sendo igual a 1,75m/s.

$$E_C = \frac{1}{2} \times m \times v^2. \quad (7)$$

De forma a simular o impacto desta massa foi criada uma secção definindo-se as suas dimensões e calculando a sua densidade por forma a igualar a massa real. Desta forma recorrendo à seguinte expressão foi calculada a densidade:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (8)$$

onde  $\rho$  representa a densidade,  $m$  a massa e  $V$  o volume. Efetuando este cálculo obtém-se uma densidade de  $2,476 \times 10^7 \text{ kg/m}^3$ .

#### 3.1.3.4 Resultados obtidos

Para a validação do modelo numérico foram considerados como valores de referência os resultados obtidos por Silva [90].

A Figura 43 representa a curva P- $\delta$  com o resultado numérico obtido para a combinação de adesivos DP8005+AV138.

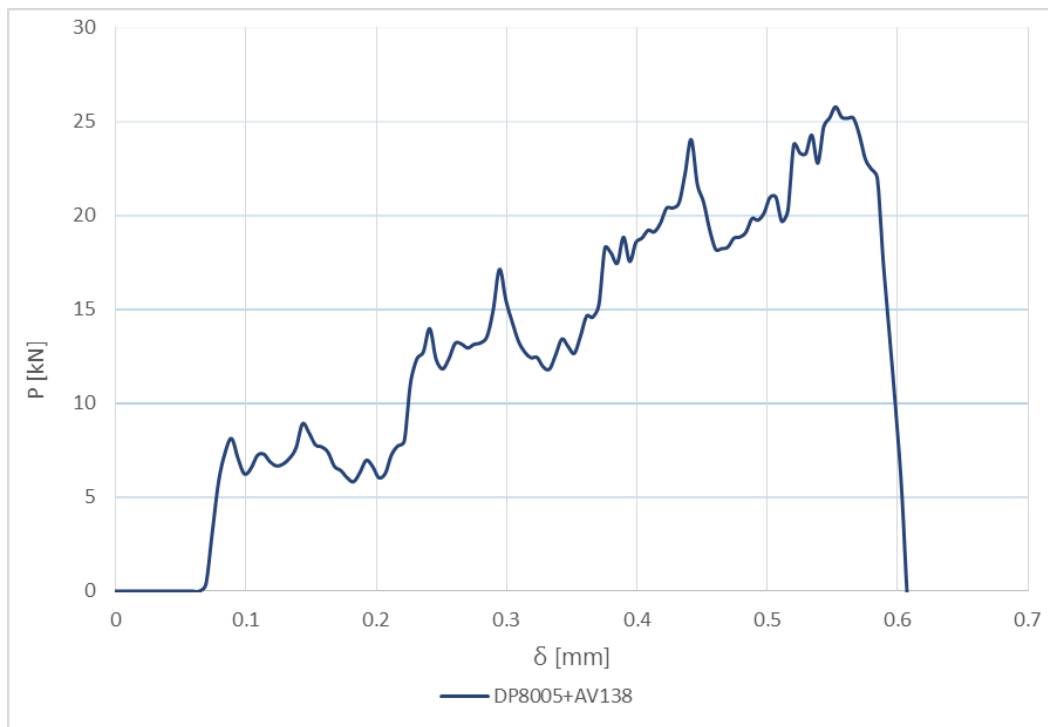


Figura 43. Curva P- $\delta$  de validação da JMSS DP8005+AV138

O resultado numérico obtido (a cinzento) com esta combinação de adesivos apresenta um valor bastante superior ao da referência experimental (a azul) de aproximadamente 36%, conforme se pode ver na Figura 44. No entanto, em termos percentuais, existe uma diferença de apenas 6% entre o resultado numérico e a referência numérica (a laranja). As referências numéricas e experimentais são os resultados obtidos no trabalho de Silva [90].

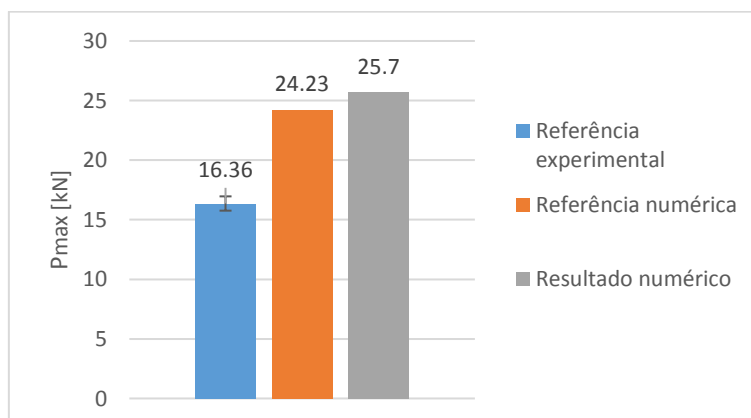


Figura 44. Comparação de resultado obtido com os valores de referência

Devido a estas diferenças, as propriedades de referência do adesivo AV138 foram revistas, nomeadamente os valores da tensão coesiva à tração ( $t_n^0$ ) e da tensão coesiva ao corte ( $t_s^0$ ). Os valores estimados estão representados na Tabela 9 entre parênteses.

Na Figura 45 e Figura 46 pode-se ver a comparação de resultados entre as propriedades de referência e as estimadas.

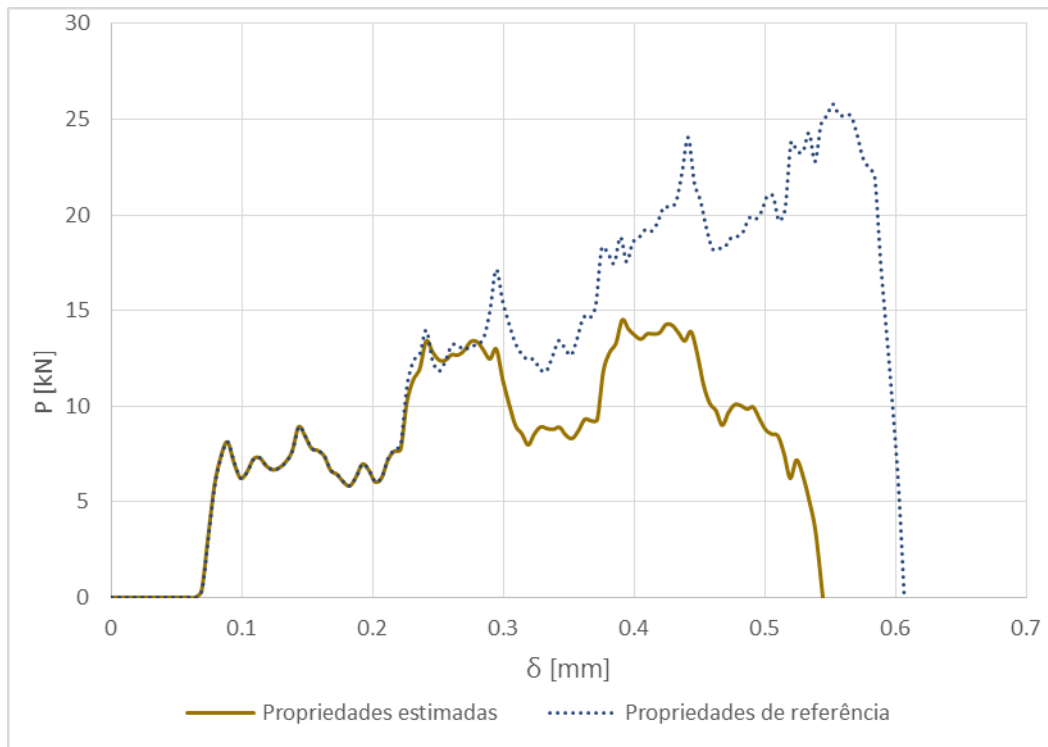


Figura 45. Curvas P- $\delta$  de validação dos adesivos DP8005+AV138 com propriedades de referência e estimadas

Os resultados obtidos com as propriedades estimadas diferem apenas dos experimentais de referência em 11%, muito abaixo dos 36% apresentados em cima.

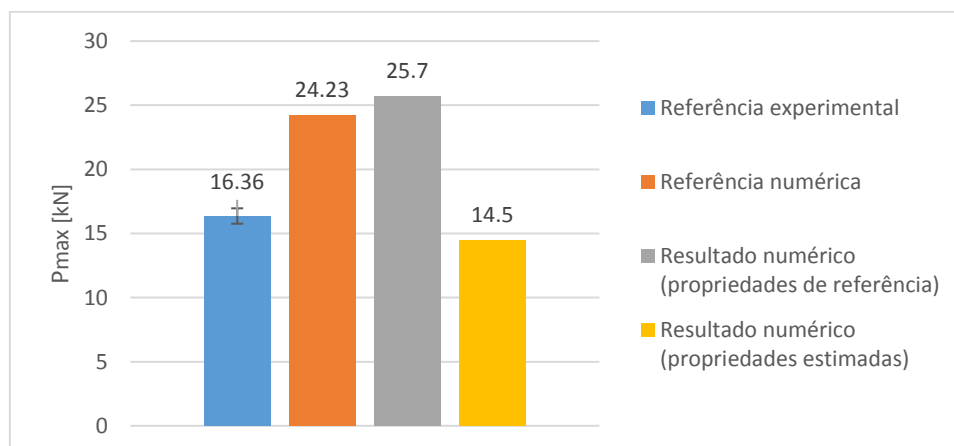


Figura 46. Comparação de resultados obtidos com valores de referência para os adesivos DP8005+AV138

Na Figura 47 é apresentada a curva P- $\delta$  para os adesivos RTV106+AV138.

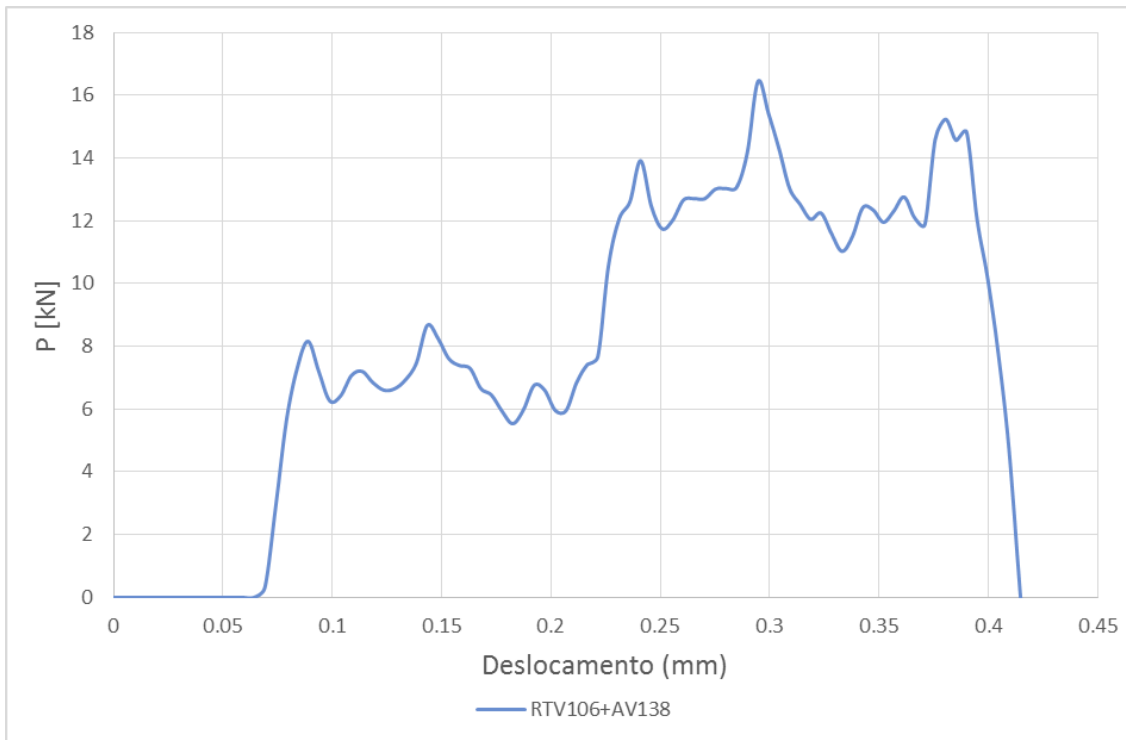


Figura 47. Curva P- $\delta$  de validação dos adesivos RTV106+AV138

A análise dos valores de carga máxima (Figura 48) permite constatar que, tal como na combinação DP8005+AV138, as discrepâncias entre resultados são bastante acentuadas. Mais concretamente, registou-se uma diferença de 39% entre o resultado numérico e a referência experimental, e de 15% entre o resultado numérico e a referência numérica.

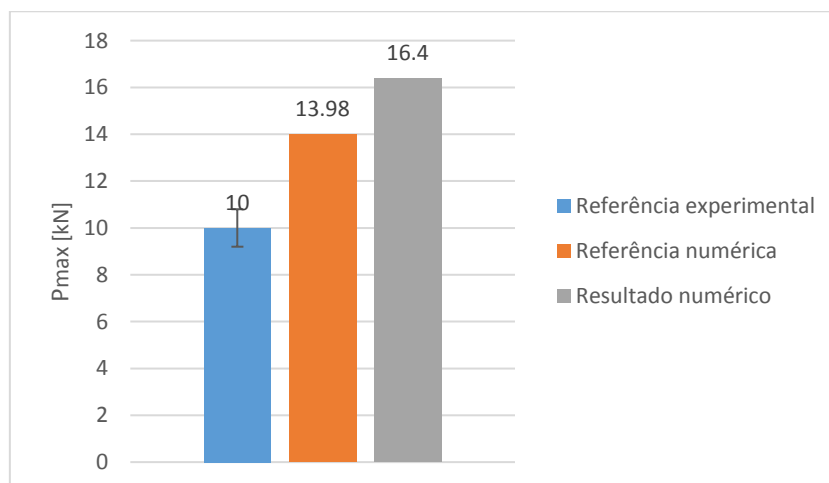


Figura 48. Comparação do resultado obtido com valores de referência para JMSS RTV+AV138

Procedeu-se da mesma forma que para a combinação DP8005+AV138 e foram aplicadas as propriedades estimadas. Desta forma, obtiveram-se resultados mais coerentes conforme é apresentado na Figura 49 e Figura 50.

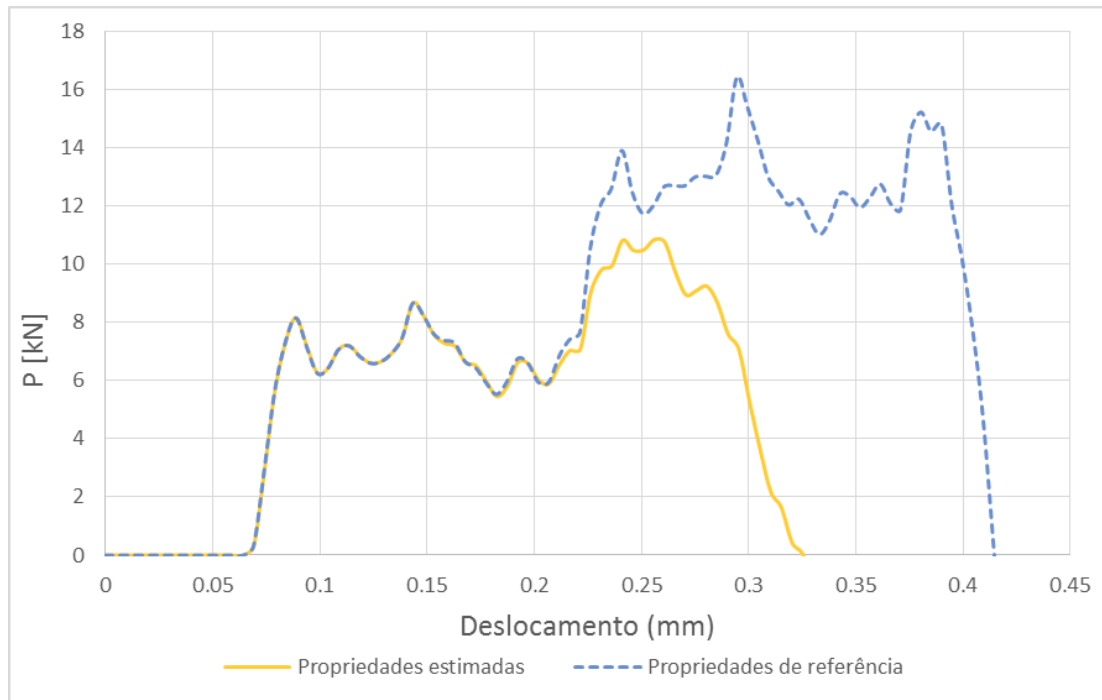


Figura 49. Curva P- $\delta$  de validação dos adesivos RTV106+AV138

Com a introdução das propriedades estimadas para o adesivo AV138 conseguiu-se obter valores mais próximos dos obtidos experimentalmente, sendo a carga máxima obtida superior em 7,7% ao valor experimental em vez dos 39% obtidos com as propriedades de referência.

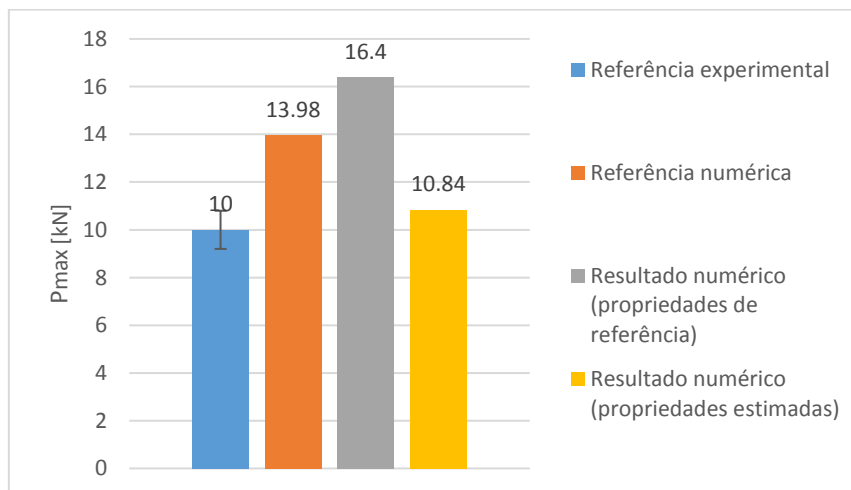


Figura 50. Comparação de resultados com valores de referência para os adesivos RTV106+AV138

### 3.1.3.5 Discussão dos resultados

As propriedades do adesivo AV138 consideradas inicialmente verificaram-se não ir ao encontro com o esperado. Foram obtidas com uma velocidade de 1 mm/min (caso

estático) e extrapoladas para uma velocidade de 105000 mm/min. Sendo seguro concluir que o método de extrapolação logarítmica não é adequada para este adesivo.

As propriedades do adesivo RTV106 utilizadas não são as mais corretas por serem propriedades estáticas e, mesmo quando combinadas com as do adesivo AV138, que foram estimadas, conseguiu-se obter valores que diferem apenas em 7,7% dos resultados experimentais de referência. Os resultados experimentais estão dependentes de uma série de fatores que influenciam a resistência da junta tais como as imperfeições no adesivo - espessura do adesivo inconstante, bolhas de ar e má preparação de superfície dos aderentes. Estas questões não se aplicam nos ensaios numéricos pois são parâmetros bem definidos. Por outro lado, existem também nas simulações numéricas fatores que podem influenciar os resultados tais como a utilização de uma malha adequada, a escolha da frequência de registos de dados no *history output* de forma a obter dados fiáveis.

Foram considerados válidos os dois modelos criados para o capítulo de validação da técnica numérica, pois se obtiveram resultados muito próximos dos obtidos experimentalmente na tese de Silva [90].

## 3.2 Estudo numérico

Após a validação do modelo numérico partiu-se para o estudo do comportamento das JMSS considerando algumas variações geométricas. Para que uma junta seja capaz de resistir às solicitações a que estará sujeita ao longo da sua vida útil, esta fase é de extrema importância. Uma junta construída com os mesmos materiais poderá apresentar resultados diferentes derivado a inúmeros fatores, desde a espessura do aderente ao comprimento de sobreposição. A influência destes parâmetros na resistência da junta será determinada com a comparação dos valores de carga máxima e das respetivas distribuições de tensão e arrancamento, bem como a energia absorvida pela mesma.

### 3.2.1 Geometria da junta

As alterações geométricas consideradas neste estudo numérico são as enumeradas abaixo:

- Variação do comprimento de sobreposição mantendo a espessura dos aderentes;
- Variação da espessura dos aderentes mantendo o comprimento de sobreposição;
- Chanfro exterior dos aderentes com a variação dos ângulos;
- Chanfro interior dos aderentes com a variação dos ângulos;
- Filete de adesivo.

### 3.2.2 Materiais utilizados

#### 3.2.2.1 Aderentes

O material dos aderentes é o mesmo utilizado na validação do modelo numérico, cujas propriedades estão descritas na Tabela 7.

Neste capítulo será considerada a deformação plástica do material dos aderentes de forma a se poder identificar possíveis concentrações de tensões que reduzam a capacidade de absorção de energia da junta adesiva. Isto foi conseguido com a introdução da curva tensão-deformação.

#### 3.2.2.2 Adesivos

Para além dos materiais utilizados na validação da técnica numérica (capítulo 3.1.3), será utilizado também o adesivo XNR6852E-2. Trata-se de uma resina epóxida resistente ao impacto. Foi desenvolvido pela empresa japonesa Nagase Chemtex®, é aplicado na indústria aeroespacial na ligação de metal/ fibra de carbono e fibra/metal, possui um alto alongamento e uma boa resistência em juntas T. Este adesivo foi produzido de forma a atender às necessidades deste tipo de indústrias, sendo capaz de absorver elevadas quantidades de energia quando solicitado ao impacto [90, 105]. As propriedades estáticas do adesivo são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10. Propriedades estáticas do adesivo XNR6852E-2 [90]

Adesivo	XNR6852E-2
E [MPa]	1742
G [MPa]	645.2
$t_n$ [MPa]	42.9
$t_s$ [MPa]	28.7
$G_{IC}$ [N/mm]	-
$G_{IIC}$ [N/mm]	18
$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1.5
$\nu$	0,4 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Valor típico para adesivos epóxidos [103]

Tal como referido no capítulo 3.1.3.2.2, as propriedades a diferentes velocidades de ensaio foram determinadas no decorrer do trabalho de Silva [90] e são apresentadas na Tabela 11. As propriedades a 1 mm/min e a 100 mm/min foram determinadas por ensaios experimentais. Os resultados a 105000 mm/min resultam de extrapolação logarítmica [82] calculadas a partir das propriedades de menor velocidade de ensaio.

Tabela 11. Parâmetros coesivos XNR6852E-2 em função da velocidade [90]

Adesivo	Velocidade [mm/min]	$t_n$ [MPa]	$t_s$ [MPa]	$G_{IC}$ [N/mm]	$G_{IIC}$ [N/mm]
XNR6852E-2	1	42,9	28,7	1,68	18
	100	46	33,6	-	-
	105000	53,7	45,8	1,68	18

### 3.2.3 Estudo dos parâmetros geométricos principais

#### 3.2.3.1 Comprimento de sobreposição

Neste capítulo será estudada a influência do comprimento de sobreposição na resistência da junta. Os comprimentos de sobreposição considerados são: 12,5; 25, 37,5 e 50 mm. A proporção de adesivo flexível e rígido na junta será mantida tanto neste capítulo como nos posteriores, nomeadamente 1/6 para cada secção de adesivo flexível (zonas A) e 2/3 para o adesivo rígido (zona B). A geometria e dimensões da JMSS está representada na Figura 51.

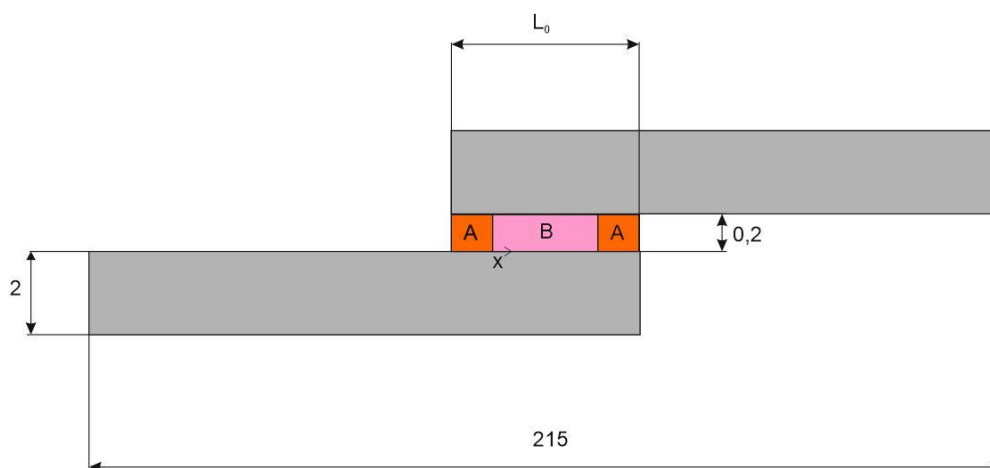


Figura 51. Geometria e dimensões da JMSS para o estudo do efeito da variação de  $L_0$  (A representa o adesivo flexível e B representa o adesivo rígido)

A malha utilizada para o estudo da variação do comprimento de sobreposição é semelhante à utilizada na validação da técnica numérica. É constituída apenas por elementos quadriláteros com dimensão constante de 0,2 mm, a zona adesiva é constituída por elementos *sweep* do tipo COH2D4 e os aderentes por elementos estruturados do tipo CPE4R. As malhas para os vários modelos podem ser visualizadas da Figura 52 à Figura 55.

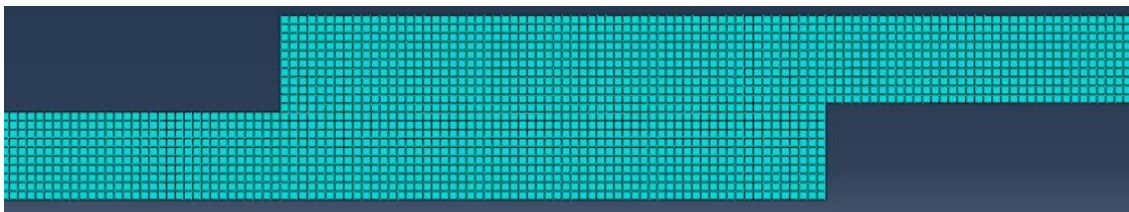


Figura 52. Malha do modelo com  $L_0=12,5$  mm

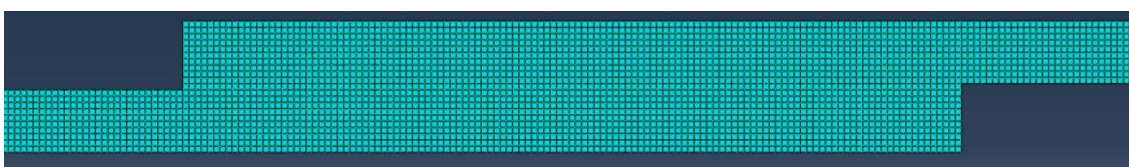


Figura 53. Malha do modelo com  $L_0=25$  mm

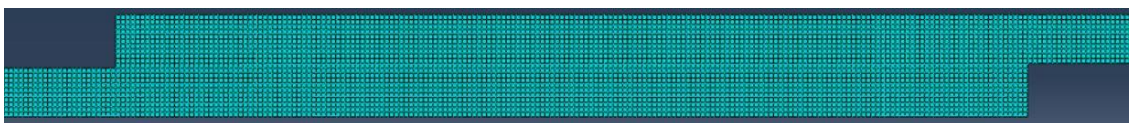


Figura 54. Malha do modelo com  $L_0=37,5$  mm

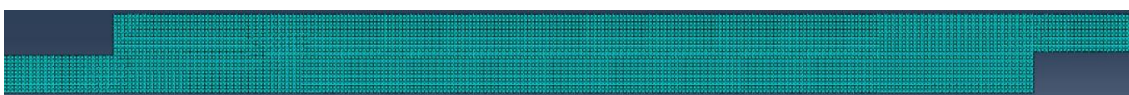


Figura 55. Malha do modelo com  $L_0=50$  mm

Na Tabela 12 são apresentados o número de elementos em função de  $L_0$ .

Tabela 12. Número de elementos em função de  $L_0$

Elementos	$L_0$ [mm]			
	12,5	25	37,5	50
CPE4R	12410	13050	13670	14331
COH2D4	62	125	187	250
Total	12472	13175	13857	14581

### 3.2.3.1.1 Distribuições de tensões

As distribuições de tensão (corte ou arrancamento) foram obtidas fazendo o quociente entre o valor de tensão efetiva sobre o valor da tensão de corte média. Para ser possível comparar os resultados obtidos para os diferentes comprimentos de sobreposição, foi dividido o valor da coordenada  $x$  pelo comprimento total de sobreposição (Figura 51). As coordenadas em  $x$  tomam valores entre 0 e 1, o que corresponde a 0% e a 100% do comprimento de sobreposição. Desta forma, como a proporção de adesivo rígido e flexível se mantêm, os resultados obtidos entre os valores de 0 e 0,166, e 0,834 e 1 (coordenadas no eixo das abcissas) correspondem ao adesivo flexível. Os resultados obtidos entre as coordenadas 0,166 e 0,834 correspondem ao adesivo rígido.

Na Figura 56 é apresentada a distribuição de tensões de corte para a combinação DP8005+AV138 para os vários  $L_0$ . Como se pode observar na Figura 56, as maiores concentrações de tensão ocorrem nas fronteiras dos adesivos. Em termos de desempenho, é visível que, quanto maior é o  $L_0$ , maiores são as tensões, sendo a junta de 12,5 mm a que apresenta melhores resultados e a de 50 mm a que apresenta os piores.

Ao contrário do que acontece nos casos estáticos, não se verifica simetria na distribuição de tensões de corte [106]. A distribuição de tensões sofre uma degradação com o aumento de  $L_0$  verificada também nos casos estáticos apesar de nos casos dinâmicos esta relação não é simétrica devido às ondas de tensão de impacto.

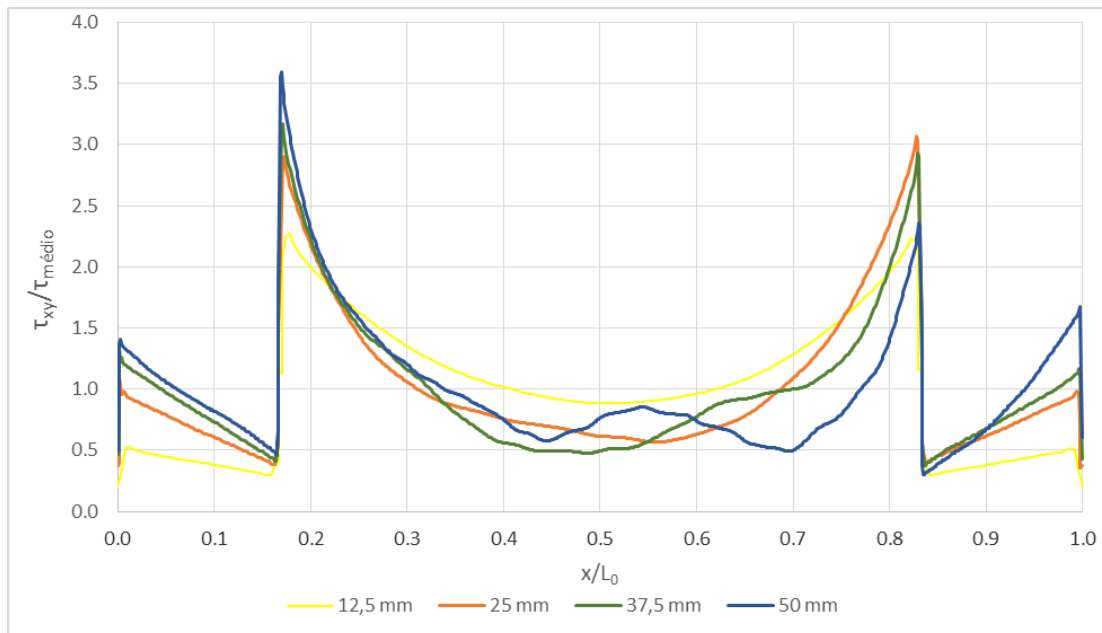


Figura 56. Distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  para os adesivos DP8005+AV138

Na Figura 57 são apresentadas as tensões de arrancamento para os adesivos DP8005+AV138. Não é visível uma tendência em função do aumento do comprimento de sobreposição, no entanto, as juntas de 25 e 12,5 mm são as que apresentam piores

resultados. A junta de 25 mm apresenta os maiores valores de tensão nas extremidades da junta, enquanto a junta de 12,5 mm apresenta os maiores valores de pico nas fronteiras entre adesivos. Tal como acontece na distribuição de tensões de corte, na distribuição de tensões de arrancamento verifica-se a ausência de simetria ao contrário do que acontece nos casos estáticos [107].

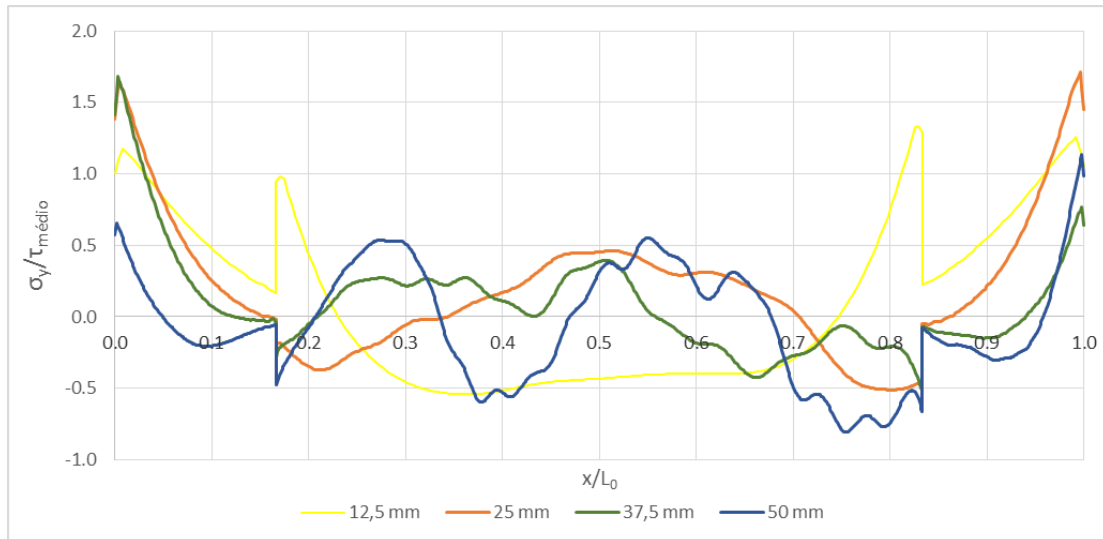


Figura 57. Distribuição de tensões  $\sigma_y$  para os adesivos DP8005+AV138

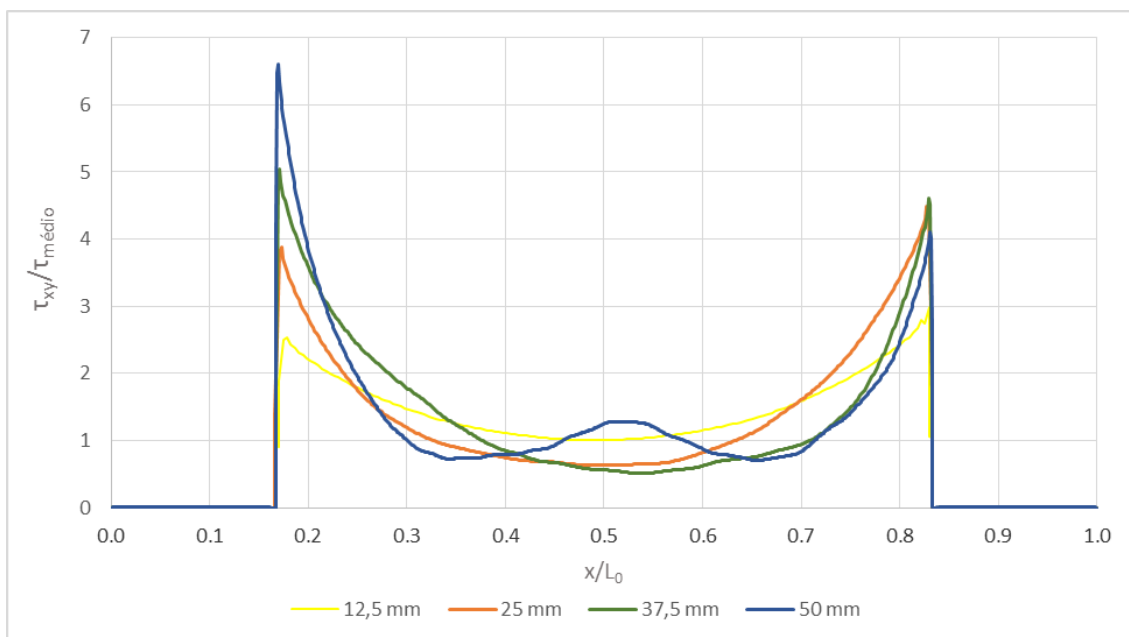


Figura 58. Distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  para os adesivos RTV106+AV138

As tensões de corte para os adesivos RTV106+AV138, são apresentadas na Figura 58, tal como no caso anterior, verifica-se que com o aumento do comprimento de sobreposição, as tensões de corte também aumentam. Nos extremos desta junta é utilizado o adesivo RTV106 que, devido às suas propriedades elásticas bastante

inferiores quando comparadas com o adesivo AV138, não apresenta qualquer valor de tensão. Como tal, os resultados obtidos correspondem somente ao efeito do adesivo rígido.

As tensões de arrancamento para a combinação de adesivos RTV106+AV138 são apresentadas na Figura 59. Tal como nas tensões de corte, também se verifica a assimetria na distribuição de tensões [106]. O adesivo RTV106, devido à sua baixa rigidez, tal como aconteceu nas tensões de corte, não apresenta quaisquer valor de tensão de arrancamento. Isto é possível verificar nas extremidades do gráfico. O adesivo AV138, quando combinado com o RTV106 apresenta picos de tensão tanto de corte como de arrancamento maiores que quando combinado com o adesivo DP8005. Para o caso em questão, não é visível uma tendência em função do aumento do comprimento de sobreposição, sendo a junta de 50 mm a que apresenta o maior pico e a junta de 37,5 mm a junta que maior simetria apresenta na distribuição e de tensões e a que apresenta os valores mais baixos. Em todos os casos, ao longo da camada adesiva, existem zonas onde as tensões passam de arrancamento para compressão.

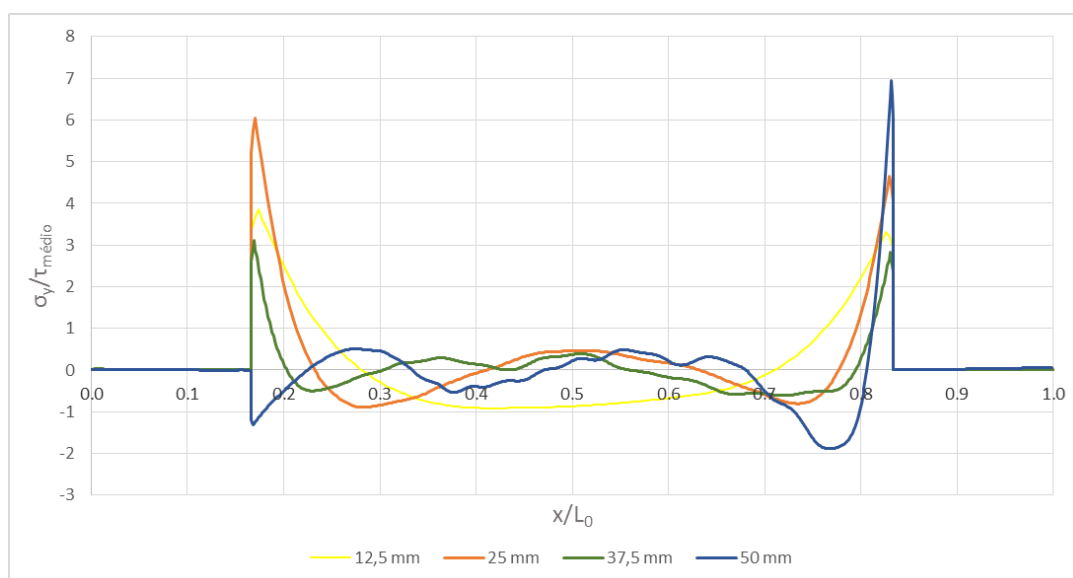


Figura 59. Distribuição de tensões  $\sigma_y$  para os adesivos RTV106+AV138

As tensões de corte para a combinação DP8005+XNR6852E-2 são apresentadas na Figura 60, sendo esta a combinação de adesivos que apresenta picos de tensão mais baixos. Isto deve-se ao facto de serem os adesivos com rigidez intermédia, o XNR6852E-2 tem rigidez inferior ao AV138, e o DP8005, tem uma rigidez superior ao RTV106 que, quando combinados resultam numa melhor distribuição de tensões quando comparados com as combinações anteriores. Esta combinação apresenta resultados mais irregulares quando comparados com as combinações anteriores. Nesta combinação os resultados para a sobreposição de 50 mm apresentam resultados abaixo do esperado, no entanto é possível no extremo direito da junta (Figura 60) que as tensões são maiores quanto maior é o comprimento de sobreposição. Na junta com

$L_0=50$  mm, é possível verificar que a zona central é pouco uniforme. Este resultado deve-se ao efeito de deformação longitudinal dos aderentes, que resulta na variação da deformação longitudinal dos mesmos ao longo da camada de adesivo [108].

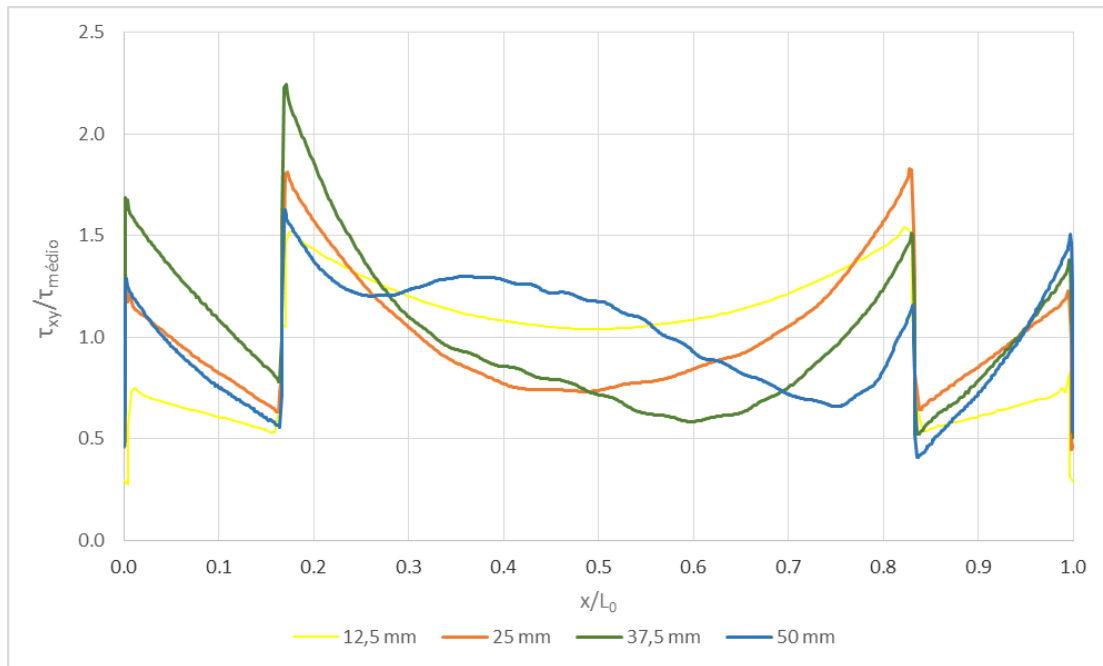


Figura 60. Distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  para os adesivos DP8005+XNR6852E-2

Na Figura 61 estão representadas as tensões de arrancamento para os adesivos DP8005+XNR6852E-2. A junta que apresenta os piores resultados é a de  $L_0=25$  mm. Verifica-se uma vez mais que não existe simetria na distribuição de tensões de arrancamento ao contrário dos ensaios estáticos.

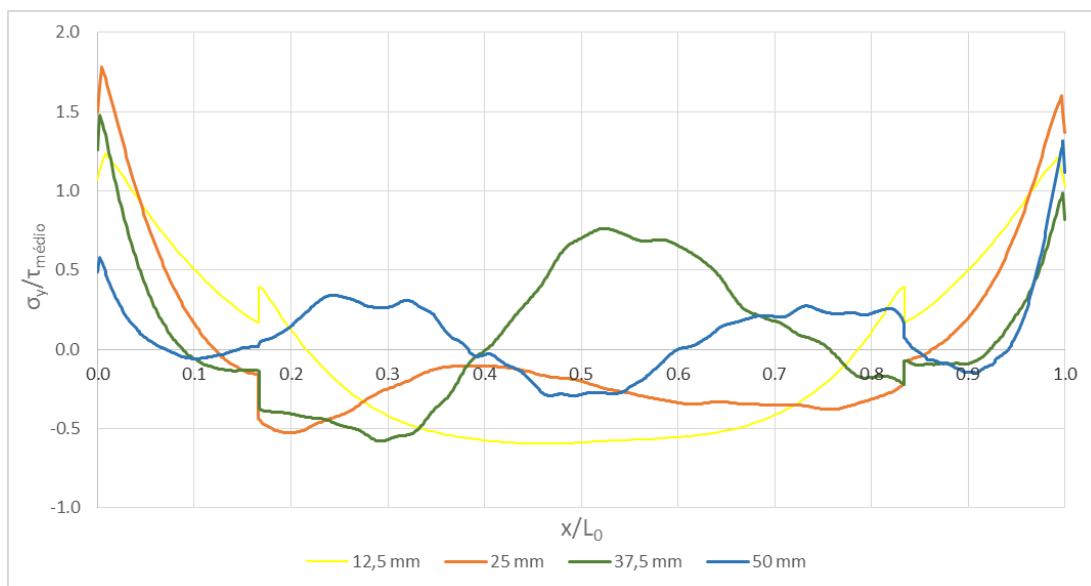


Figura 61. Distribuição de tensões  $\sigma_y$  para os adesivos DP8005+XNR6852E-2

### 3.2.3.1.2 Resistência das juntas

Na Figura 62 são apresentadas as curvas  $P-\delta$  para a combinação DP8005+AV138 para os vários comprimentos de sobreposição. Analisando as curvas  $P-\delta$ , pode-se verificar que o valor da carga máxima aumenta com o aumento de  $L_0$ . Paralelamente com o aumento da resistência da junta, verifica-se também um aumento do deslocamento máximo até à rotura.

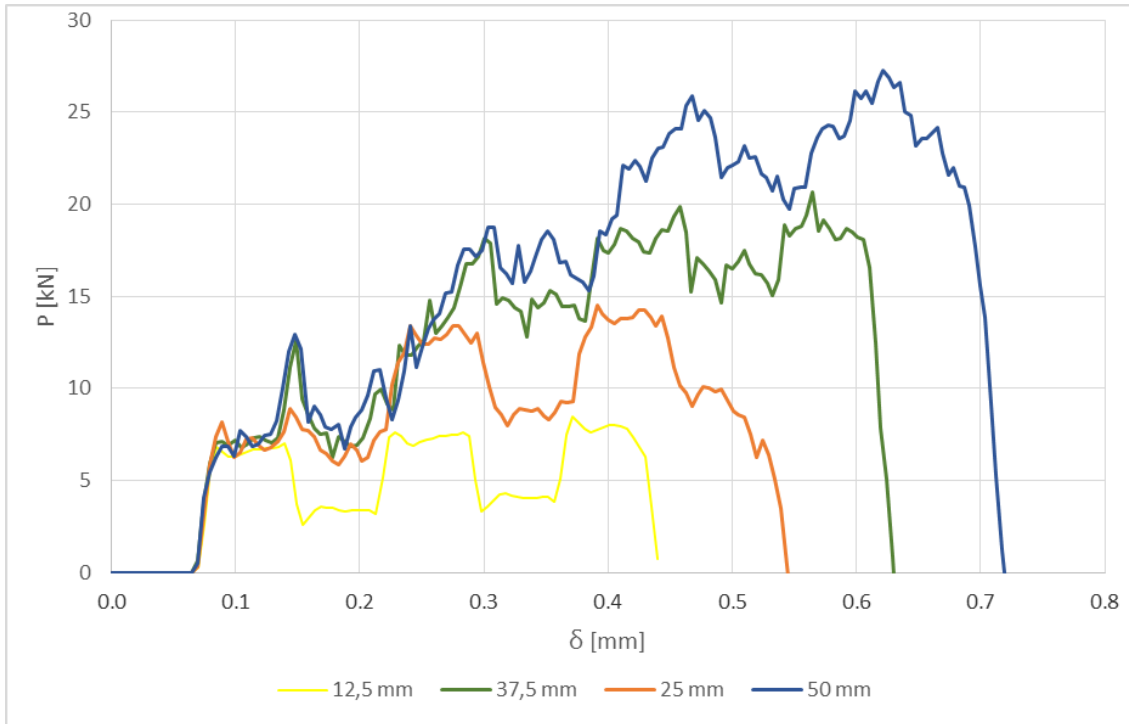


Figura 62. Curvas  $P-\delta$  dos adesivos DP8005+AV138 para os vários comprimentos de sobreposição

A variação da carga máxima pode ser analisada com maior detalhe na Tabela 13 onde são apresentados os valores máximos de carga e deslocamento para cada  $L_0$ . Para esta combinação de adesivos tendo por base os  $L_0$  em estudo, verifica-se uma certa linearidade no aumento da carga e deslocamento máximo com o aumento do  $L_0$ .

Tabela 13. Influência de  $L_0$  na carga máxima para a JMSS DP8005+AV138

$L_0$ [mm]	$P_{m\acute{a}x}$ [kN]	Diferença	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	Diferença
12,5	8,48	-	0,445	-
25	14,51	+71%	0,545	22,5%
37,5	20,66	+144%	0,630	41,6%
50	27,28	+222%	0,719	61,6%

Na Tabela 14 é apresentada a energia absorvida transferida pelo impacto para esta combinação de adesivos. O cálculo da energia absorvida pelas JMSS é determinada através do cálculo da área abaixo da curva  $P-\delta$ . O cálculo foi realizado no *software* R® [109] juntamente com o RStudio® [110] para visualização gráfica e para facilitar a importação dos dados. Foi utilizada a função *trapz* da biblioteca *pracma* para cálculo da área por integração trapezoidal.

O aumento de  $L_0$  significa um aumento da área adesiva. Verifica-se um aumento da energia absorvida numa proporção superior ao aumento de  $L_0$  devido à maior quantidade de adesivo para absorção de impacto o que por sua vez resulta num maior tempo de impacto e deslocamento até à rotura.

Tabela 14. Energia absorvida JMSS DP8005+AV138 em função de  $L_0$

$L_0$ [mm]	$E$ [J]	Diferença
12,5	2,09	-
25	4,47	+113,9%
37,5	7,62	+264,6%
50	11,09	+430,6%

Para esta combinação de adesivos (DP8005+AV138), foram ultrapassados os limites de elasticidade dos aderentes para o modelo com  $L_0=50$  mm conforme é apresentado na Figura 63.

A simulação deste modelo resultou numa deformação plástica de 0,051%. Quando é aplicada uma tensão superior à tensão limite elástica, os materiais passam da fase elástica para a fase plástica. Quando este limite é ultrapassado o material não volta à sua posição inicial resultando em deformação plástica. Esta deformação reduz a resistência dos aderentes podendo resultar em rutura dos mesmos. Este fenómeno, ao nível dos adesivos, traduz-se numa rutura prematura, devido às deformações excessivas a que estes estão sujeitos. Para este caso, não se verifica interferência deste efeito na distribuição de tensões e na carga máxima obtida devido ao baixo valor de plasticidade obtido.

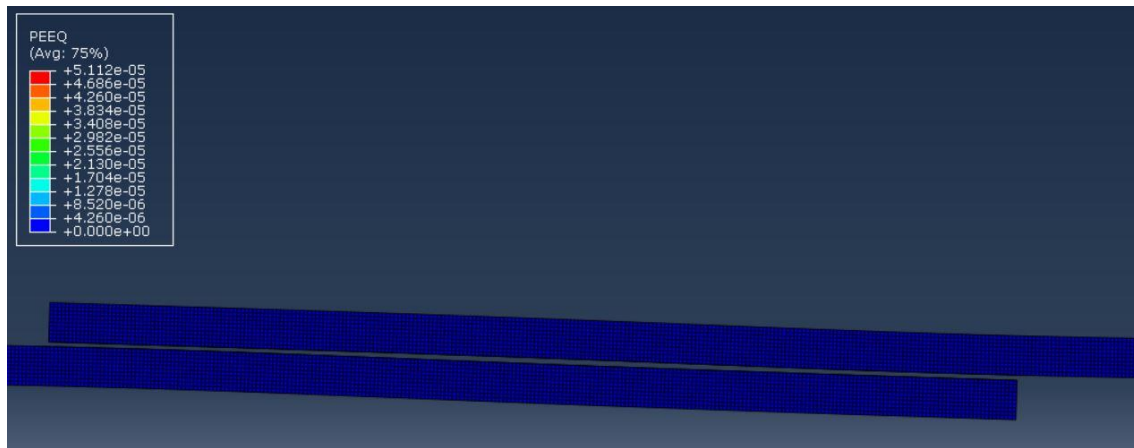


Figura 63. Deformação plástica para a combinação DP8005+AV138 para  $L_0=50$  mm

Na Figura 64 são apresentadas as curvas  $P-\delta$  para a combinação de adesivos RTV106+AV138. Tal como no caso anterior, a carga máxima e o deslocamento aumentam em função do aumento de  $L_0$ . Nesta combinação os resultados das curvas 12,5 e 25 mm são relativamente próximos e existe um aumento bastante significativo na junta de 37,5 mm face às anteriores. A junta de 50 mm apresenta resultados superiores, mas próximos da junta de 37,5 mm. Nesta combinação de adesivos para  $L_0=12,5$  mm foi obtido um valor de deslocamento máximo acima da junta de 25 mm de comprimento de sobreposição, no entanto não se verifica o mesmo para a carga máxima.

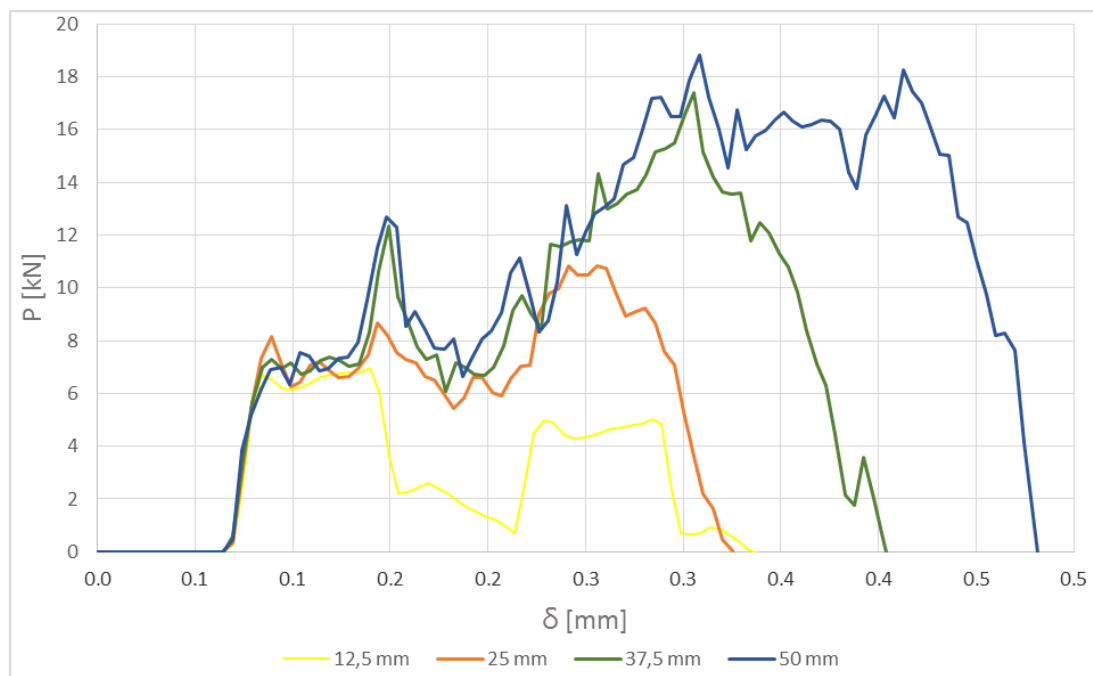


Figura 64. Curvas  $P-\delta$  dos adesivos RTV106+AV138 para os vários comprimentos de sobreposição

Na Tabela 15 é apresentada a influência de  $L_0$  na JMSS com a carga máxima e a variação percentual de cada  $L_0$ . Não se verifica a linearidade constatada no caso anterior, o  $L_0$  de 50 mm fica abaixo do esperado e apenas se verifica um ligeiro incremento no valor de carga máxima quando comparado com a junta de 37,5 mm. O deslocamento até à rotura para o comprimento de 12,5 mm excede o de 25 mm apesar de se verificar o valor inferior de carga máxima. Comparando estes valores com os da combinação apresentada anteriormente, é possível concluir que o adesivo RTV106 tem uma contribuição muito inferior ao DP8005 para a resistência da junta.

A energia absorvida pela JMSS para os adesivos RTV106+AV138 é apresentada na Tabela 16. O adesivo RTV106 é extremamente flexível e a sua rigidez muito baixa, por outro lado, o adesivo DP8005 para além de flexível, tem uma capacidade de absorção de energia superior. Tal facto pode ser verificado comparando os valores obtidos na combinação apresentada acima na Tabela 14 com os apresentados na Tabela 16. Para esta combinação de adesivos, os limites de elasticidade não foram ultrapassados, e, por esta razão, não houve deformação plástica.

Tabela 15. Influência de  $L_0$  na carga máxima para a JMSS RTV106+AV138

$L_0$ [mm]	$P_{m\acute{a}x}$ [kN]	Diferença	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	Diferença
12,5	6,95	-	0,338	-
25	10,84	+56%	0,325	-3,8%
37,5	17,41	+150,5%	0,403	+19,2%
50	18,84	+171,1%	0,482	+42,6%

Tabela 16. Energia absorvida JMSS RTV106+AV138 em função de  $L_0$

$L_0$ [mm]	$E$ [J]	Diferença
12,5	0,98	-
25	1,79	+82,7%
37,5	3,13	+219,4%
50	4,89	+399%

As curvas  $P$ - $\delta$  para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2 são apresentadas na Figura 65. A tendência que se obteve nos resultados anteriores também se verifica nesta combinação. Esta combinação de adesivos é a que apresenta melhores resultados em

termos de carga e deslocamento máximos até à rotura. O adesivo XNR6852E-2 é o que apresenta maior tenacidade que se traduz num aproveitamento superior da totalidade da camada adesiva.

Na Tabela 17 é apresentada a influência de  $L_0$  na carga máxima. Verifica-se um aumento da carga máxima de forma quase linear quando comparado com as outras configurações.

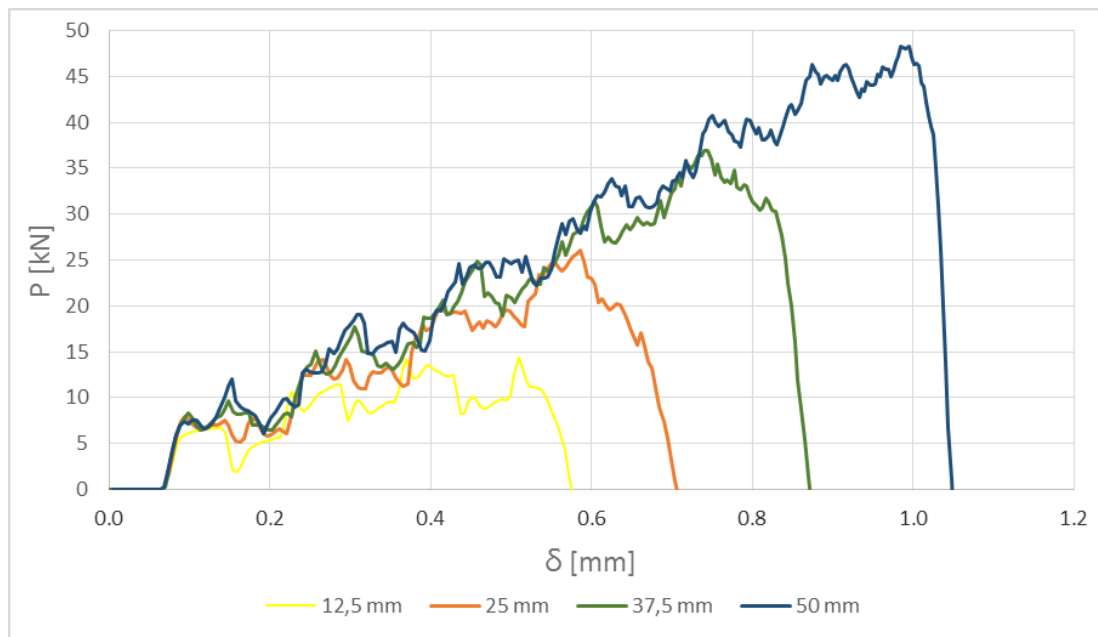


Figura 65. Curvas  $P$ - $\delta$  dos adesivos DP8005+XNR6852E-2 para os vários comprimentos de sobreposição

Tabela 17. Influência de  $L_0$  na carga máxima para a JMSS DP8005+XNR6852E-2

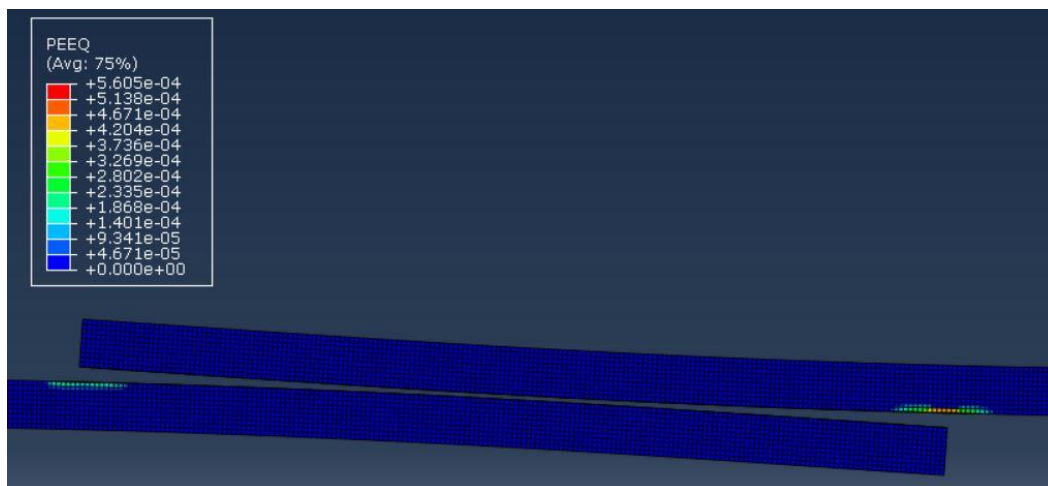
$L_0$ [mm]	$P_{m\acute{a}x}$ [kN]	Diferença	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	Diferença
12,5	14,48	-	0,570	-
25	26,05	+82,4%	0,708	+24,2%
37,5	36,94	+158,7%	0,872	+53%
50	48,22	+237,7%	1,050	+84,2%

Na Tabela 18 é apresentada a energia absorvida pela combinação DP8005+XNR6852E-2. É de todas as combinações aquela com maior capacidade de absorção de energia de impacto, o que era de esperar pois o adesivo XNR6852E-2 foi desenvolvido para aplicações sujeitas ao impacto e, conseqüentemente, é aquele que tem maiores valores de tenacidade.

Tabela 18. Energia absorvida JMSS DP8005+XNR6852E-2 em função de  $L_0$ 

$L_0$ [mm]	$E$ [J]	Diferença
12,5	4,35	-
25	8,99	+107%
37,5	16,19	+272%
50	26	+498%

Para esta combinação de adesivos verificou-se deformação plástica dos aderentes para os  $L_0$  de 37,5 e 50 mm. Foram obtidos os valores de 0,056% e 0,2% respetivamente (Figura 66 e Figura 67). Devido aos valores reduzidos, tal como acontece na combinação DP8005+AV138, não se poderá considerar que a deformação plástica tenha influencia nas resistências das juntas obtidas.

Figura 66. Deformação plástica com a combinação DP8005+XNR6852E-2 para  $L_0=37,5$  mmFigura 67. Deformação plástica com a combinação DP8005+XNR6852E-2 para  $L_0=50$  mm

Na Figura 68 é apresentado um resumo das cargas máximas obtidas para as várias combinações em função de  $L_0$ . A configuração de JMSS com melhor performance são o

DP8005+XNR6852E-2, em seguida a combinação DP8005+AV138 que apresenta resultados ligeiramente superiores que o RTV106+AV138. Todos os adesivos apresentaram cargas máximas mais elevadas em função do aumento de  $L_0$ .

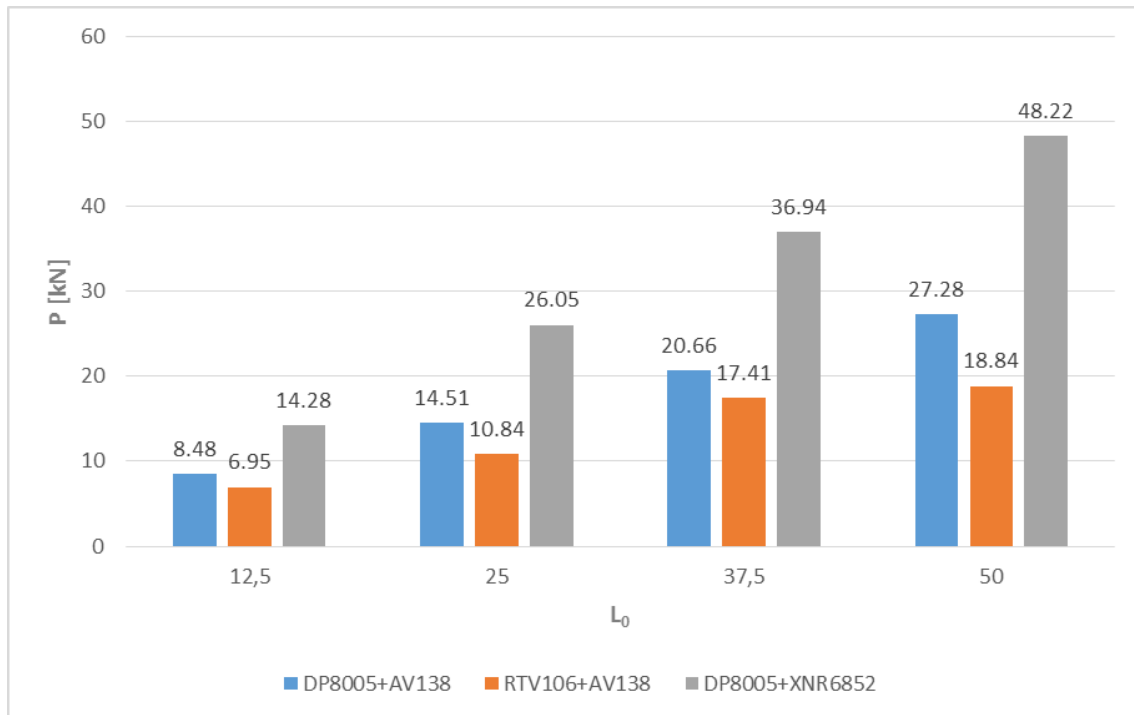


Figura 68. Resumo cargas máximas para as várias combinações de adesivos em função de  $L_0$

### 3.2.3.2 Espessura dos aderentes

O segundo estudo geométrico realizado é a variação de espessura dos aderentes ( $e$ ) cujos valores são 1, 2, 3 e 4 mm. A Figura 69 representa a geometria e dimensões da JMSS utilizadas para o estudo do efeito de  $e$ .

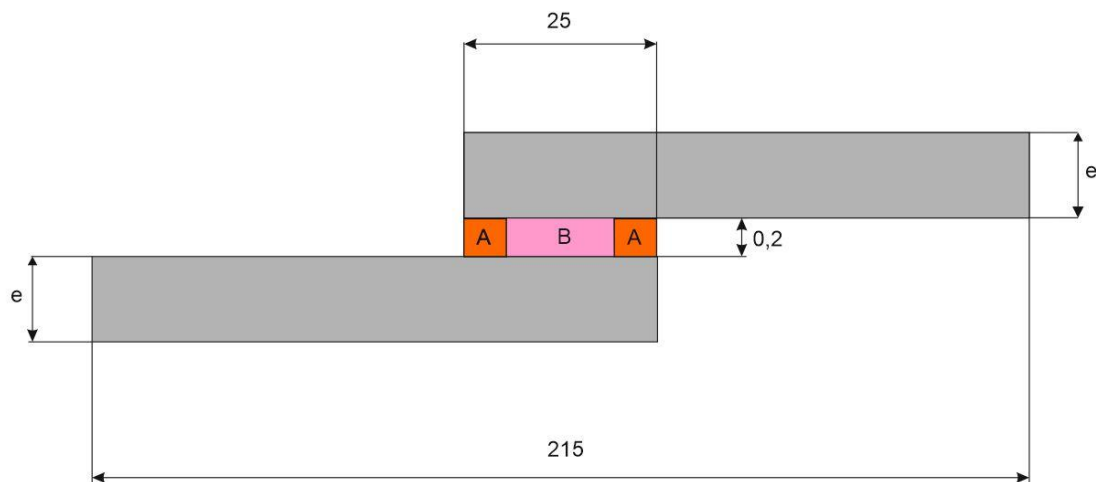


Figura 69. Dimensões da JMSS para o estudo do efeito de  $e$  (A representa o adesivo flexível e B representa o adesivo rígido)

A atribuição dos materiais pode-se ver na Figura 70, esta distribuição é a mesma do caso anterior. A branco apresentam-se as secções correspondentes ao adesivo flexível, a vermelho a secção correspondente ao adesivo rígido e, por fim, a verde as secções correspondentes aos aderentes em aço.



Figura 70. Atribuição de materiais para o modelo com  $e=4$  mm

A malha utilizada para estes modelos é idêntica à utilizada nos modelos anteriores, composta apenas por quadriláteros. A malha para a zona adesiva é constituída por elementos *sweep* do tipo COH2D4 representados a amarelo na Figura 71, e os aderentes por elementos estruturados do tipo CPE4R representados a verde.



Figura 71. Controlo de malha para o modelo com  $e=4$  mm

As malhas utilizadas para os vários modelos estão representadas da Figura 72 à Figura 75.

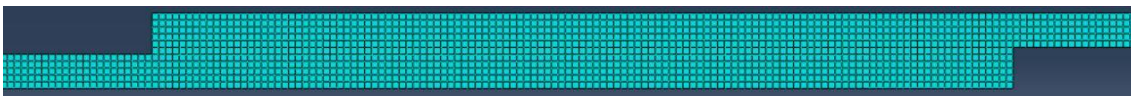


Figura 72. Malha do modelo com  $e=1$  mm

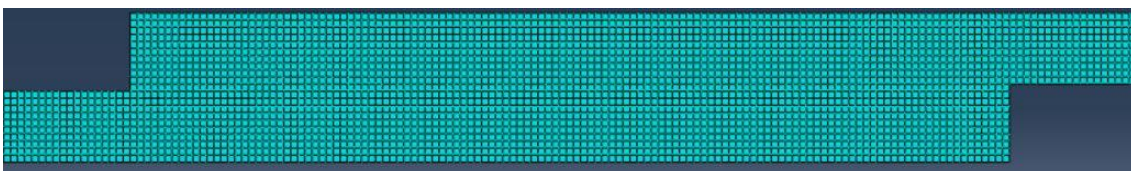
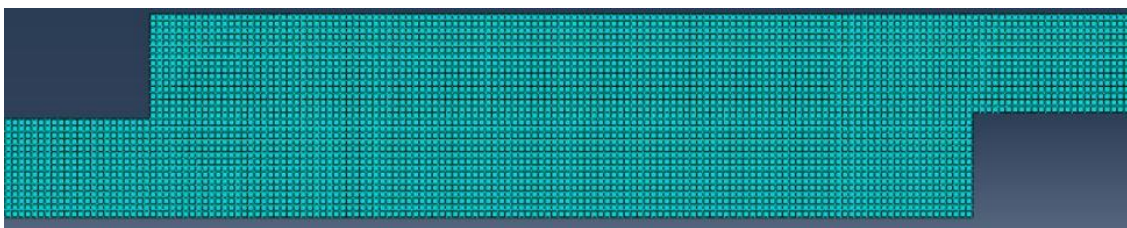
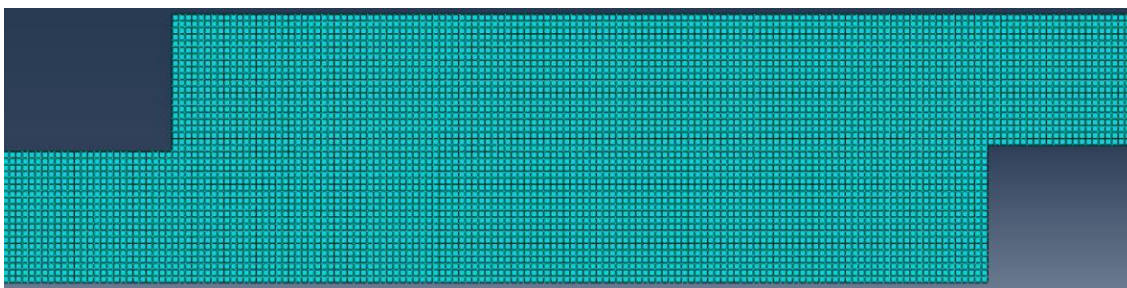


Figura 73. Malha do modelo com  $e=2$  mm

Figura 74. Malha do modelo com  $e=3$  mmFigura 75. Malha utilizada no modelo com  $e=4$  mm

Na Tabela 19 é apresentado o número de elementos para cada modelo. Como a área adesiva vai ser constante em todos os modelos, o número de elementos COH2D4 mantém-se. Por outro lado, com a variação da espessura dos aderentes, quanto maior for a espessura, maior será o número de elementos CPE4R devido ao aumento da área.

Tabela 19. Número de elementos em função de  $e$ 

Elementos	$e$ [mm]			
	1	2	3	4
CPE4R	6550	13050	19550	26050
COH2D4	125	125	125	125
Total	6675	13175	19675	26175

### 3.2.3.2.1 Distribuições de tensões

Na Figura 76 é apresentada a distribuição de tensões de corte para a combinação de adesivos DP8005+AV138 para as diferentes espessuras dos aderentes. Os resultados obtidos são muito próximos, no entanto é possível observar que as tensões tendencialmente aumentam em função da diminuição de  $e$ . Nos extremos da camada adesiva é possível visualizar picos de tensão que se apresentam maiores quanto menor a espessura do aderente, desta forma, a junta com  $e=4$  mm apresenta os menores

valores e a junta de  $e=1$  mm apresenta os maiores valores de tensão. Nas fronteiras entre adesivos, a constatação anterior não é tão visível, a junta com espessura de 4 mm apresenta picos idênticos à junta de 3 mm.

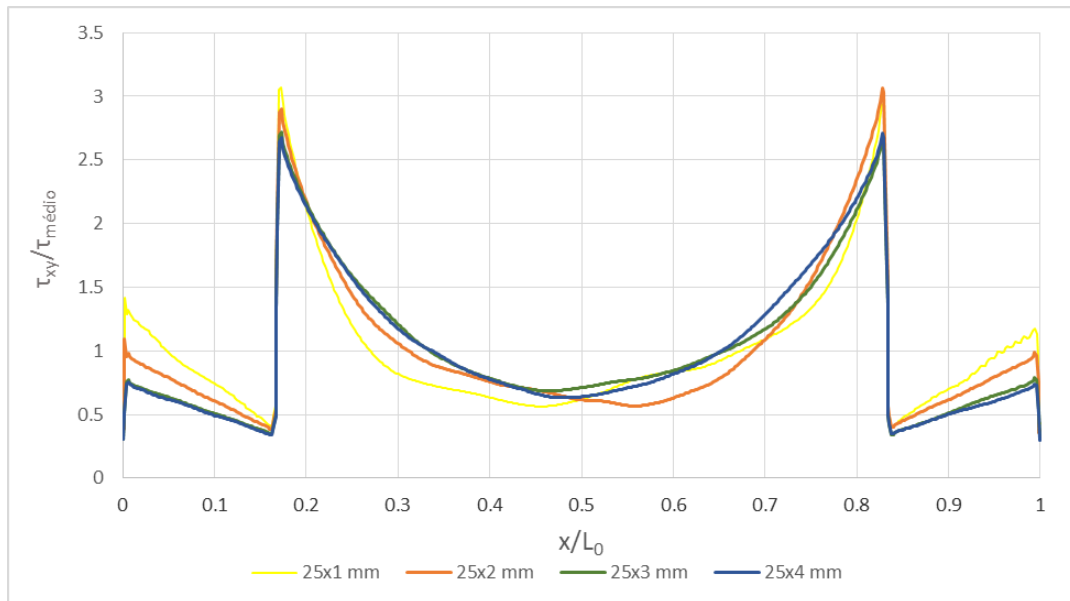


Figura 76. Distribuição de tensões de corte para os adesivos DP8005+AV138 em função de  $e$

As tensões de arrancamento para a combinação dos adesivos DP8005+AV138 são apresentadas na Figura 77. Para os modelos de 3 e 4 mm, a zona central que corresponde ao adesivo rígido, é quase toda constituída por tensões de compressão. Este fenómeno é explicado pela maior rigidez dos aderentes que força os adesivos a um estado compressivo. O modelo de 4 mm é o que apresenta os piores resultados, tendo os maiores picos de tensão. Nesta configuração, é visível uma tendência na distribuição de tensões de arrancamento, quanto maior é a espessura dos aderentes, maiores são os valores dos picos de tensão.

Na Figura 78 é apresentada a distribuição de tensões de corte para a combinação dos adesivos RTV106+AV138. Tal como referido anteriormente, devido à baixa rigidez do adesivo RTV106, as tensões de corte na zona são zero ou muito próximas. Nos extremos do adesivo AV138 verifica-se que, tal como na combinação anterior, as maiores espessuras têm menores concentrações de tensão. A espessura de 3 e 4 mm têm resultados semelhantes, já a espessura de 1 mm é a que apresenta maiores picos de concentração. No entanto, na zona central verifica-se uma ligeira inversão destes resultados onde as espessuras de 3 e 4 mm têm valores de tensão maiores, ainda que a diferença seja muito pequena.

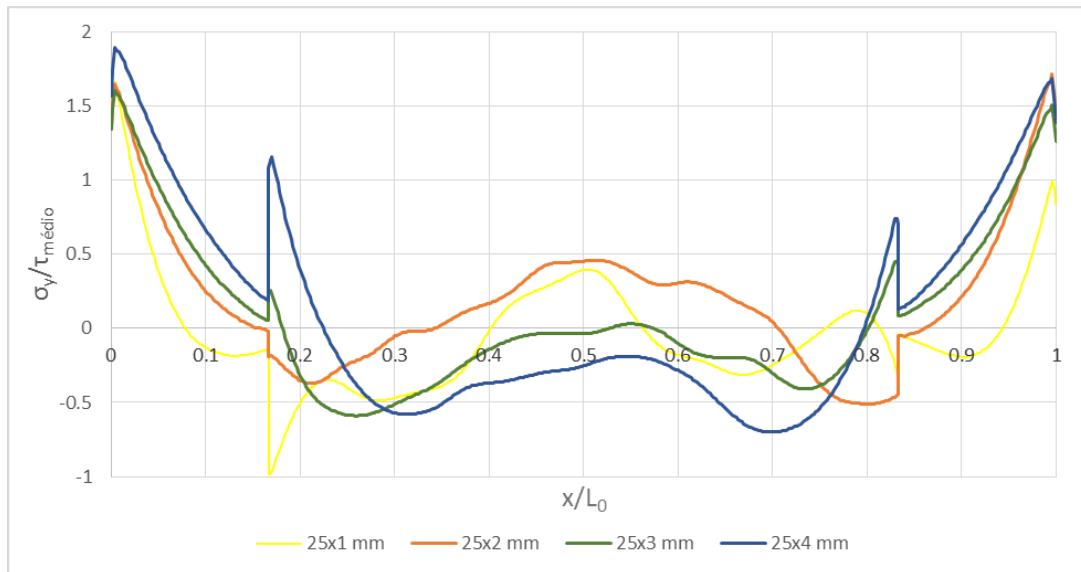


Figura 77. Distribuição de tensões de arrancamento para os adesivos DP8005+AV138 em função de  $e$

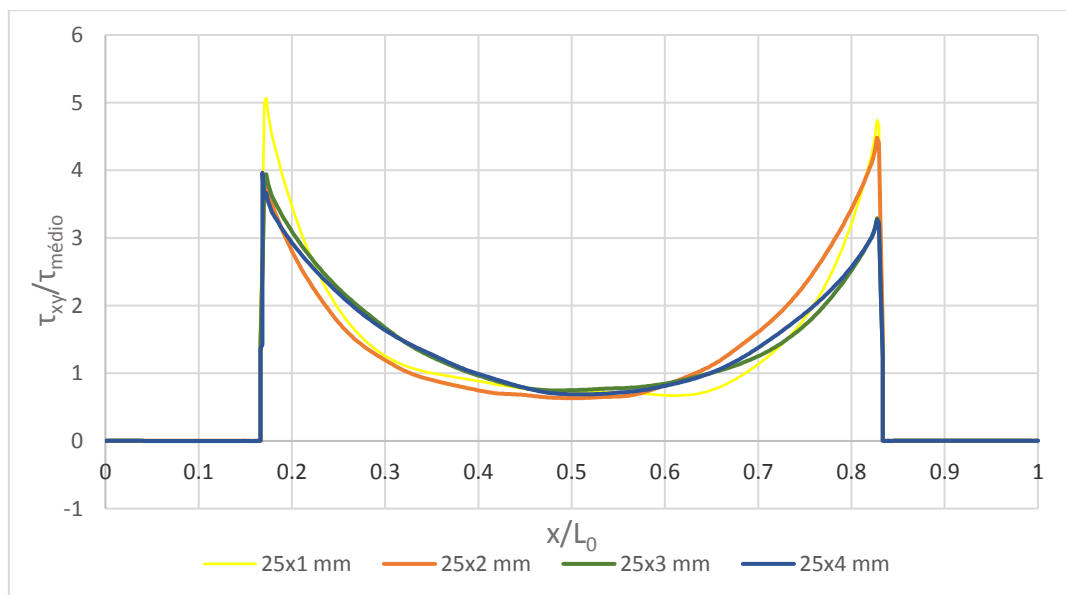


Figura 78. Distribuição de tensões de corte para a combinação de adesivos RTV106+AV138 em função de  $e$

As tensões de arrancamento para a combinação dos adesivos RTV106+AV138 é apresentada na Figura 79. Tal como nas tensões de corte, o adesivo RTV106 devido à sua rigidez muito baixa, apresenta tensões de arrancamento muito próximas de zero, já o adesivo AV138, nas suas fronteiras apresenta picos de tensão bastante elevados. Na fronteira entre adesivos do lado direito, é possível constatar a tendência apontada em cima, sendo que o modelo com 1 mm de espessura apresenta o menor valor de tensão, seguindo-se do modelo de 2 mm. O modelo de 3 mm apresenta um pico superior ao modelo de 4 mm. Tal como na configuração anterior, é possível ver em todos os modelos, na zona central, correspondente ao adesivo rígido, zonas às quais as tensões

deixam de ser de arrancamento e passam a ser de compressão. O adesivo AV138, devido à sua elevada rigidez, tem uma distribuição de tensões mais fraca que os restantes.

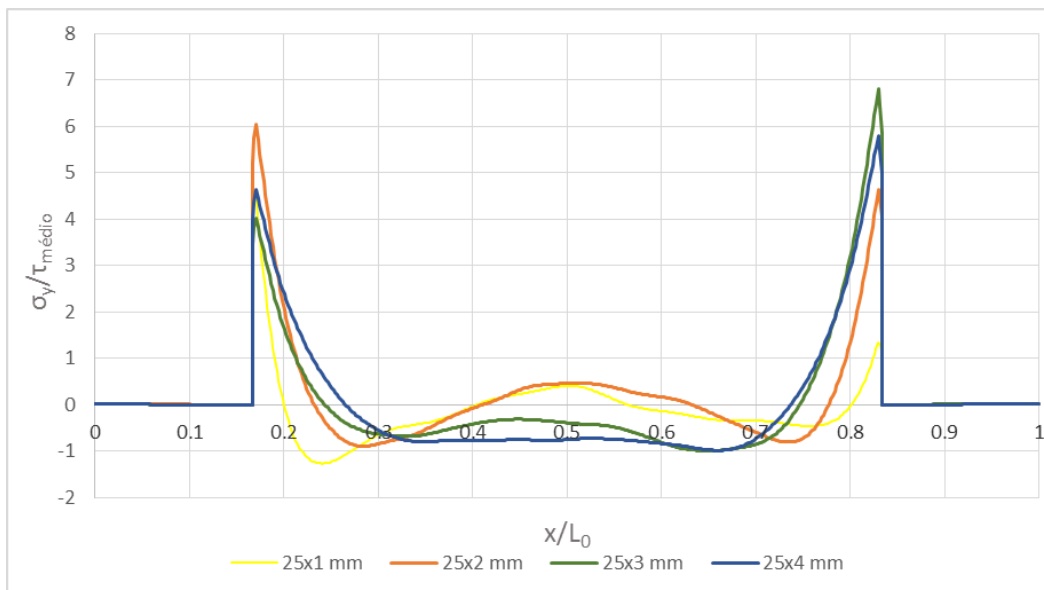


Figura 79. Distribuição de tensões de arrancamento para a combinação de adesivos RTV106+AV138 em função de  $e$

Na Figura 80 é apresentada a distribuição de tensões de corte para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2. Os aderentes com espessuras de 3 e 4 mm apresentam resultados idênticos e são os que apresentam melhores resultados. O modelo com  $e=2$  mm, nos extremos da camada adesiva apresenta resultados significativamente melhores que o modelo com  $e=1$  mm, no entanto, nas fronteiras entre adesivos, os valores de pico são idênticos. Mais uma vez, verifica-se a tendência encontrada nos modelos anteriores de que, quanto maior a espessura dos aderentes, menor são as concentrações de tensão de corte. Comparativamente com as combinações anteriores, esta combinação apresenta valores de pico menores e uma melhor distribuição de tensões. Tal como já foi referido anteriormente, isto deve-se ao facto de serem os adesivos com rigidez intermédia, o XNR6852E-2 tem rigidez inferior ao AV138, e o DP8005, tem uma rigidez superior ao RTV106 que, quando combinados resultam numa melhor distribuição de tensões.

As tensões de arrancamento são apresentadas na Figura 81. Apesar da distribuição de tensões ser semelhante para os vários modelos, o modelo de  $e=2$  mm foge à tendência de resultados e é o modelo que apresenta maiores concentrações de tensão. Estes resultados podem ser explicados pelo efeito dinâmico das ondas de propagação de tensões que fazem com que as distribuições de tensões não sejam lineares.

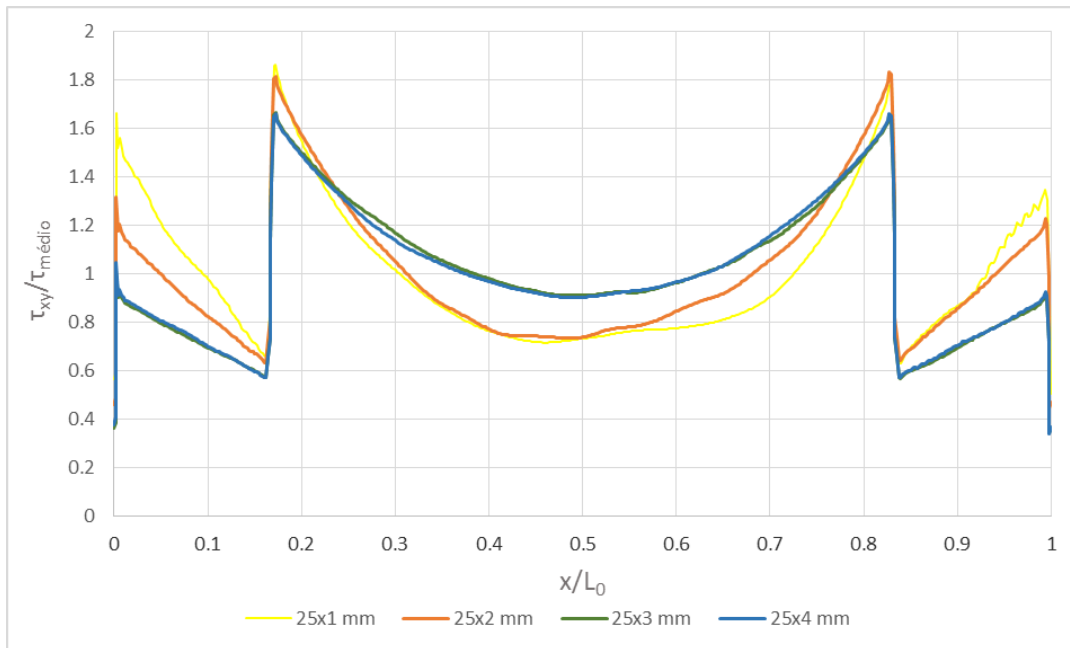


Figura 80. Distribuição de tensões de corte para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2 em função de  $e$

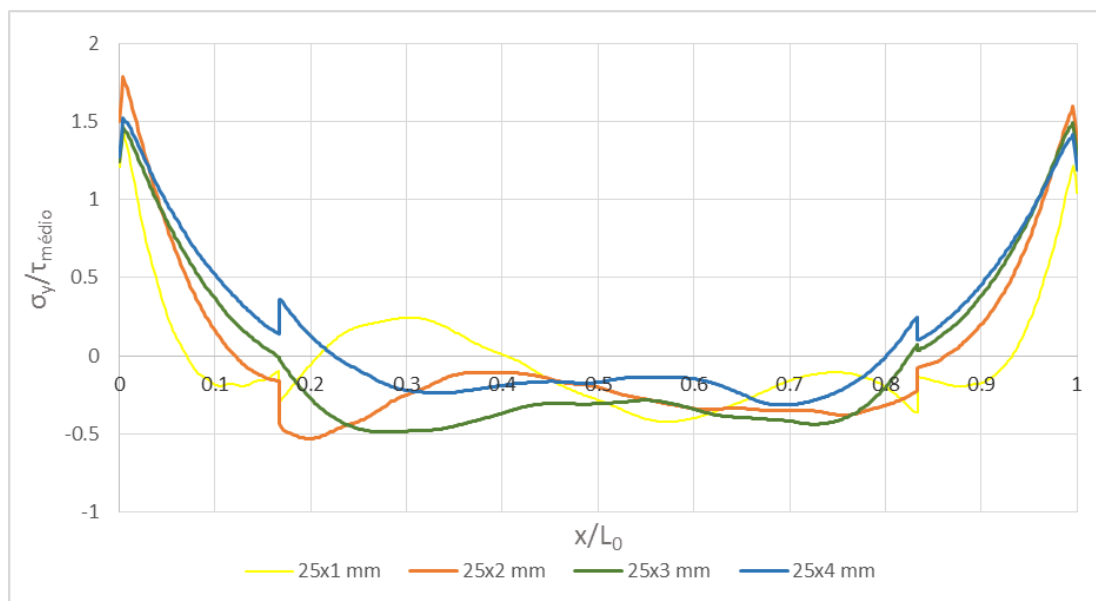


Figura 81. Distribuição de tensões de arrancamento para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2 em função de  $e$

### 3.2.3.2.2 Resist\u00eancia das juntas

Na Figura 82 s\u00e3o apresentadas as curvas  $P-\delta$  para a combina\u00e7\u00e3o de adesivos DP8005+AV138. Os valores de carga m\u00e1xima aumentam com o aumento da espessura, por outro lado, o aumento da espessura dos aderentes resulta numa diminui\u00e7\u00e3o do deslocamento m\u00e1ximo. Este fen\u00f3meno \u00e9 justificado pela diminui\u00e7\u00e3o da deforma\u00e7\u00e3o dos substratos com o aumento da sua espessura, aumentando a solicita\u00e7\u00e3o dos adesivos ao corte que \u00e9 o par\u00e2metro de maior resist\u00eancia.

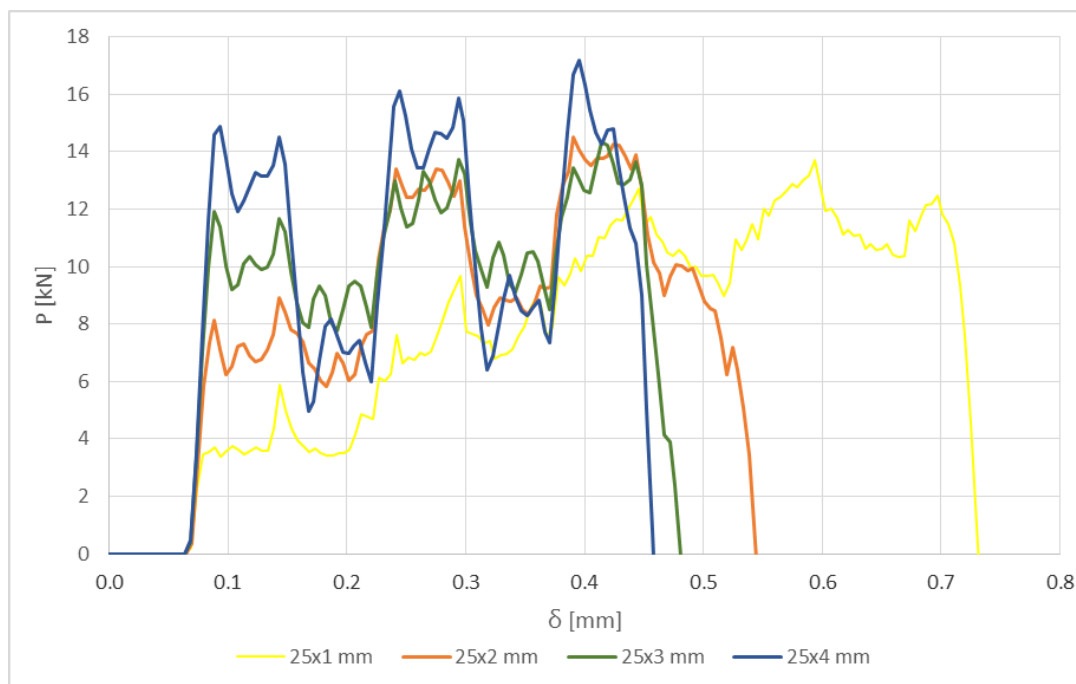


Figura 82. Curva P- $\delta$  para a combinação de adesivos DP8005+AV138 em função de e

Na Tabela 20 é apresentada a variação da carga e deslocamento máximos em função da variação de e. O aumento da carga máxima não é muito significativo, quando comparado com a variação do comprimento de sobreposição. Para as espessuras de 2 e 3 mm, não se verifica a tendência constatada em termos de carga máxima, no entanto, a diferença de valores é muito reduzida. Os valores de deslocamento para os modelos de 2, 3 e 4 mm são muito próximos, no entanto, para o caso do modelo de 1 mm, verifica-se um aumento bastante significativo no deslocamento máximo.

Tabela 20. Influência de e na carga máxima para a JMSS DP8005+AV138

e [mm]	$P_{m\acute{a}x}$ [kN]	Diferença	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	Diferença
1	13,71	-	0,732	-
2	14,51	+5,8%	0,545	-25,5%
3	14,35	+4,7%	0,481	-34,3%
4	17,19	25,4%	0,459	-37,3%

Na Tabela 21 são apresentados os valores da energia absorvida para a combinação DP8005+AV138 para as espessuras de aderentes em estudo. Verifica-se que a espessura dos aderentes influencia a absorção de energia. Para o caso apresentado, o aumento de e de 1 para 2 mm traduz-se numa redução em 20% na capacidade de absorção de

energia, nas outras espessuras a diferença fica próxima deste valor. A redução da energia absorvida deve-se ao facto de que, com o aumento do volume dos aderentes, a transmissão da energia de impacto para a camada adesiva é menor. Para esta combinação de adesivos não foram ultrapassados os limites de elasticidade e, desta forma, não houve deformação plástica.

Tabela 21. Energia absorvida JMSS DP8005+AV138 em função de  $e$

$e$ [mm]	$E$ [J]	Diferença
1	5,59	-
2	4,47	-20%
3	4,24	-24,2%
4	4,28	-23,4%

As curvas  $P$ - $\delta$  para a combinação de adesivos RTV106+AV138 são apresentadas na Figura 83. Tal como na combinação anterior, verifica-se que, com o aumento da espessura dos aderentes aumenta a carga máxima. No deslocamento máximo não se verifica a tendência salientada anteriormente para os modelos com as espessuras de 2 e 3 mm.

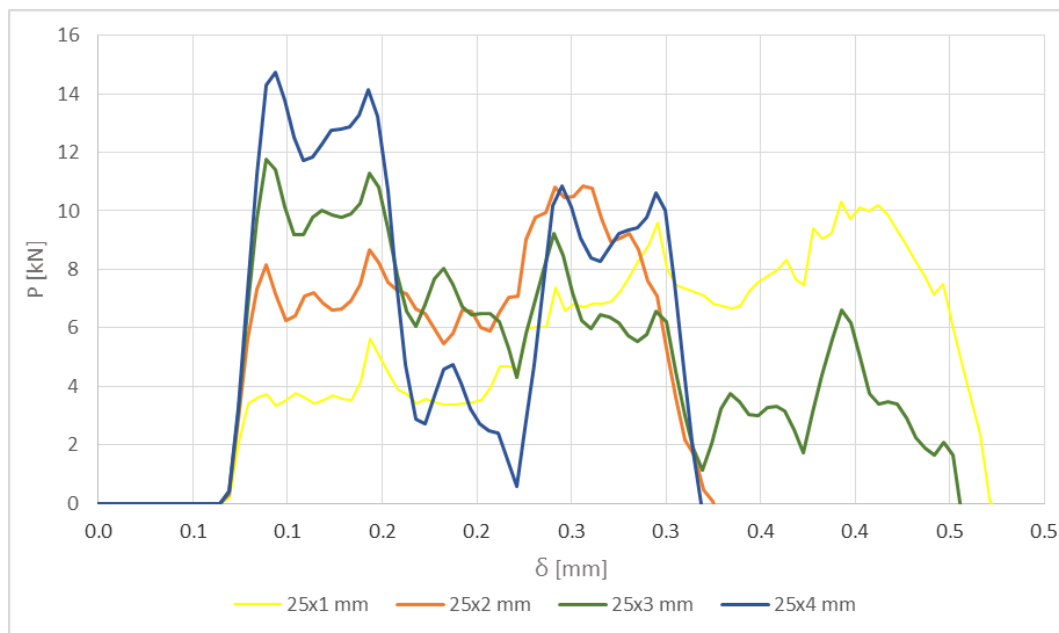


Figura 83. Curva  $P$ - $\delta$  para a combinação de adesivos RTV106+AV138 em função de  $e$

Os valores de carga máxima para esta combinação são apresentados na Tabela 22. Nos aderentes com espessura de 4 mm é onde se verifica o maior aumento de carga máxima.

Tabela 22. Influência de  $e$  na carga máxima para a JMSS RTV106+AV138

$e$ [mm]	$P_{m\acute{a}x}$ [kN]	Diferença	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	Diferença
1	10,33	-	0,476	-
2	10,84	+4,9%	0,325	-31,7%
3	11,78	+14%	0,457	-4%
4	14,76	+42,9%	0,319	-33%

Na Tabela 23 é apresentada a energia absorvida para a combinação de adesivos RTV106+AV138. O modelo com 3 mm de espessura apresenta um valor de energia superior aos outros modelos de 2 e 4 mm devido ao deslocamento máximo, que se aproxima muito do modelo de 1 mm. Devido ao deslocamento máximo do aderente de 2 mm ser abaixo do esperado, a energia absorvida ficou também abaixo do esperado, isto é explicado pelo facto de, como este modelo teve a rotura mais cedo, o tempo de transição do impacto para os adesivos foi menor, e, a absorção de energia foi também menor. Tal como na combinação anterior, os limites de elasticidade dos aderentes não foram ultrapassados e assim, não ocorreu deformação plástica.

Tabela 23. Energia absorvida JMSS RTV106+AV138 em função de  $e$ 

$e$ [mm]	$E$ [J]	Diferença
1	2,43	-
2	1,79	-26,3%
3	2,27	-6,6%
4	1,99	-18,1%

As curvas  $P$ - $\delta$  para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2 são apresentadas na Figura 84. O deslocamento máximo nas JMSS de 3 e 4 mm e os valores de carga máxima para as JMSS de 2 e 3 mm são muito semelhantes. A JMSS de 1 mm de espessura obteve um deslocamento máximo muito superior às outras espessuras. A diferença de deslocamento máximo entre a JMSS de 1 mm de espessura e as restantes é justificada pela deformação plástica que ocorre conforme é apresentado na Figura 85. As relações entre o aumento de carga máxima e a diminuição do deslocamento máximo são verificadas como aconteceu nos casos anteriores.

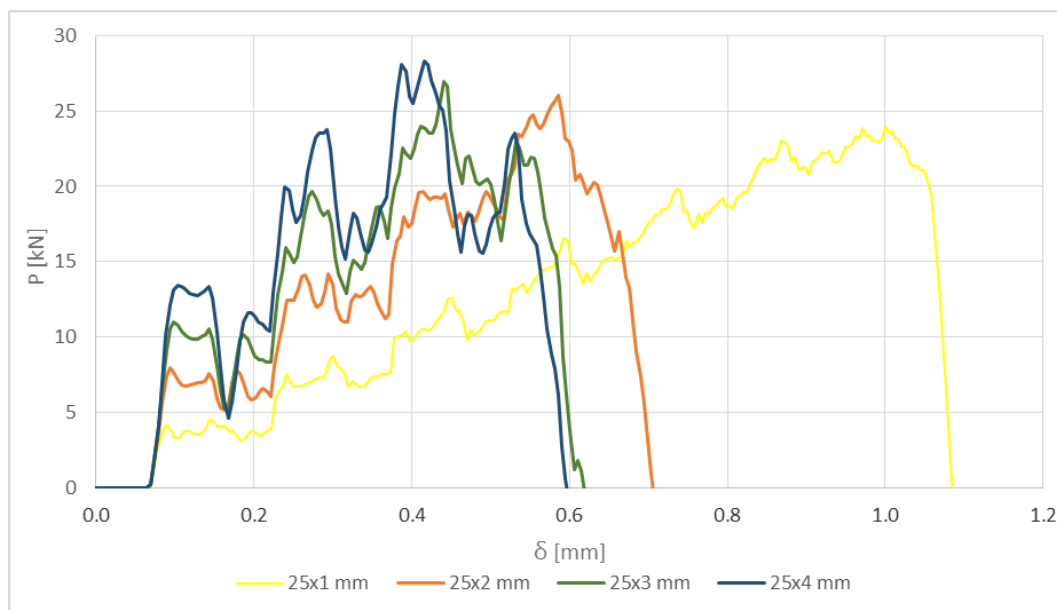


Figura 84. Curva P- $\delta$  para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2 em função de  $e$

A variação da carga e deslocamento máximos para esta combinação de adesivos é apresentada na Tabela 24. O maior aumento de carga verifica-se entre as espessuras de 1 e 2 mm com uma evolução de 8,7%. Os resultados seguintes mantêm a tendência, mas, com uma variação mais reduzida. Por outro lado, o deslocamento máximo decresce consoante se aumenta a espessura, a maior diferença é obtida entre os modelos de 1 e 2 mm.

Tabela 24. Influência de  $e$  na carga máxima para a JMSS DP8005+XNR6852E-2

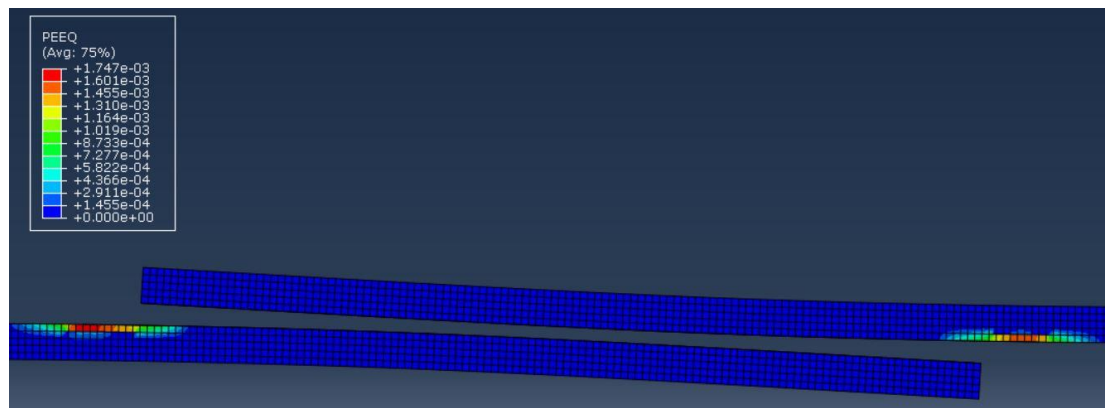
$e$ [mm]	$P_{\text{máx}}$ [kN]	Diferença	$\delta_{\text{máx}}$ [mm]	Diferença
1	23,97	-	1,08	-
2	26,05	+8,7%	0,708	-34,4%
3	26,94	+12,4%	0,618	-42,8%
4	28,29	+18%	0,598	-44,6%

Na Tabela 25 é apresentada a energia absorvida para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2. Os resultados das espessuras 2, 3 e 4 mm são muito próximos quando comparados com a espessura de 1 mm que é justificado pelo elevado deslocamento máximo.

Tabela 25. Energia absorvida JMSS DP8005+XNR6852E-2 em função de  $e$ 

$e$ [mm]	$E$ [J]	Diferença
1	12,57	-
2	8,99	-28,5%
3	8,38	-33,3%
4	8,68	-30,9%

Nesta combinação de adesivos ocorreu deformação plástica para o modelo com  $e=1$  mm conforme se pode ver na Figura 85, resultando num valor de 0,17%, que por ser um valor reduzido não se poderá considerar que a deformação plástica tenha influência na resistência da junta obtida.

Figura 85. Deformação plástica combinação DP8005+XNR6852E-2 para  $e=1$  mm

Na Figura 86 é apresentado um resumo das cargas máximas para as várias combinações de adesivos com as várias espessuras consideradas. É possível verificar para as várias combinações de adesivos uma tendência de aumento de carga máxima com o aumento de  $e$ .

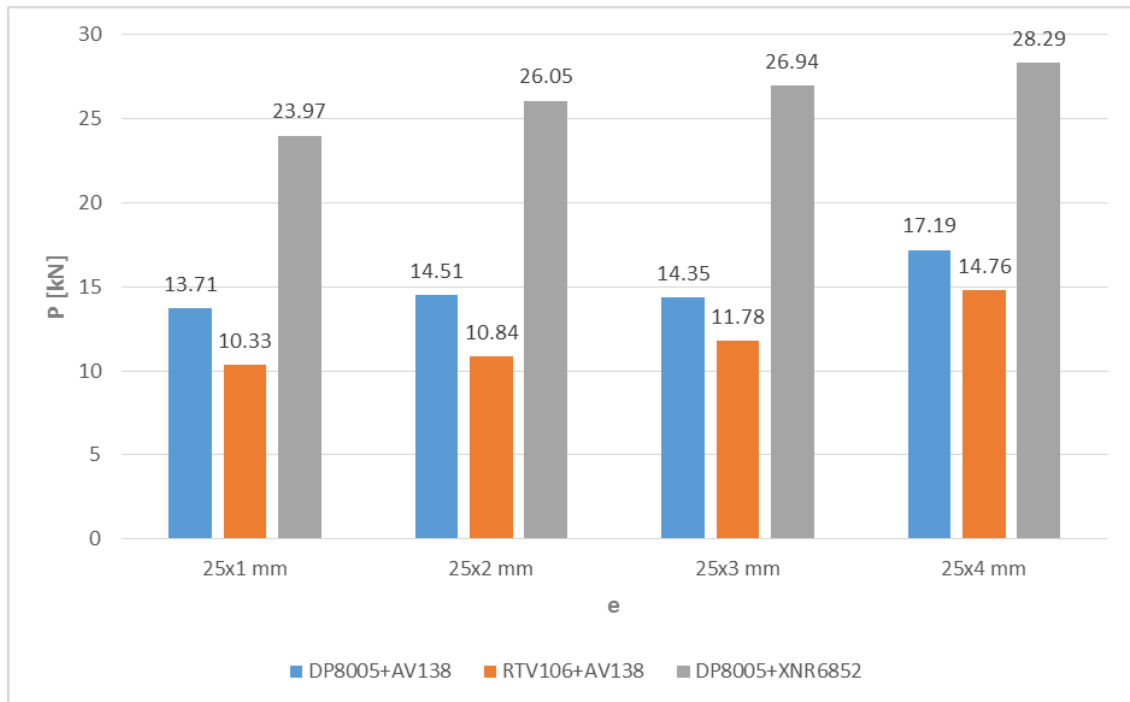


Figura 86. Resumo cargas máximas para as várias combinações de adesivos em função de  $e$

### 3.2.4 Estudo de alterações geométricas

#### 3.2.4.1 Chanfro exterior dos aderentes

Neste capítulo a alteração geométrica em estudo será a variação do ângulo de chanfro exterior dos aderentes ( $\alpha$ ) de acordo com a geometria de junta representada na Figura 87. Os valores considerados são:  $7,5^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ .

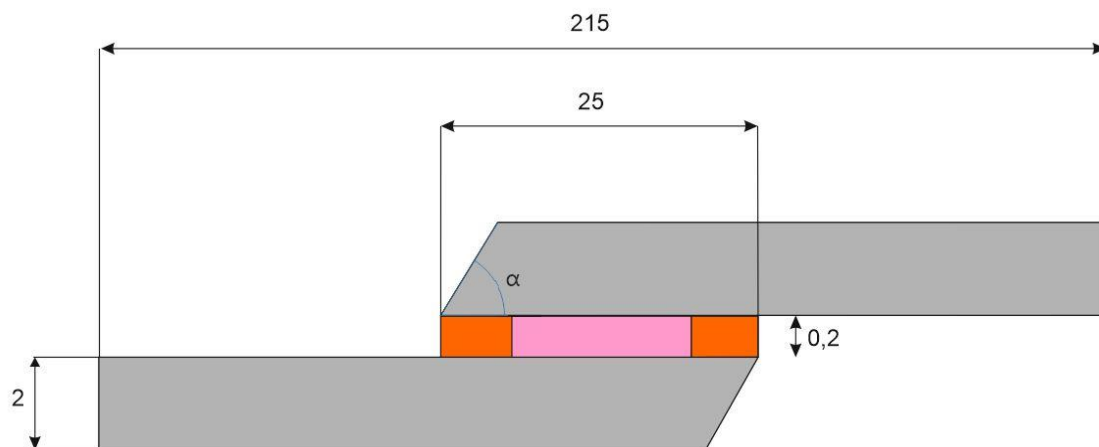


Figura 87. Geometria da JMSS para o estudo da variação de  $\alpha$

Nos modelos numéricos utilizados para o estudo da variação de  $\alpha$ , foi necessário alterar alguns parâmetros de malha para a obtenção de melhores resultados pois com a

introdução do chanfro na junta, passaram a existir divisões triangulares. Foi efetuado um controlo de malha conforme é apresentado na Figura 88, que consiste na criação de linhas horizontais espaçadas em 0,2 mm entre si, e linhas verticais com um espaçamento variável em função do  $\alpha$  em questão. No caso apresentado a baixo, na Figura 88, as linhas verticais e horizontais estão espaçadas em 0,2 mm. O controlo de malha tem como objetivo a redução do número de elementos triangulares utilizados. A zona adesiva manteve-se igual, constituída por elementos *sweep* do tipo COH2D4 a amarelo na Figura 88. Os aderentes são constituídos por elementos estruturados, nas zonas triangulares foram usados elementos CPE3 e no restante modelo foram usados os elementos CPE4R.



Figura 88. Controlo de malha para a JMSS para  $\alpha=45^\circ$

Da Figura 89 à Figura 93 são apresentadas as malhas utilizadas nos modelos em estudo. O modelo com  $\alpha=90^\circ$  é o mesmo utilizado anteriormente na validação, no estudo do comprimento de sobreposição e na variação de espessura.

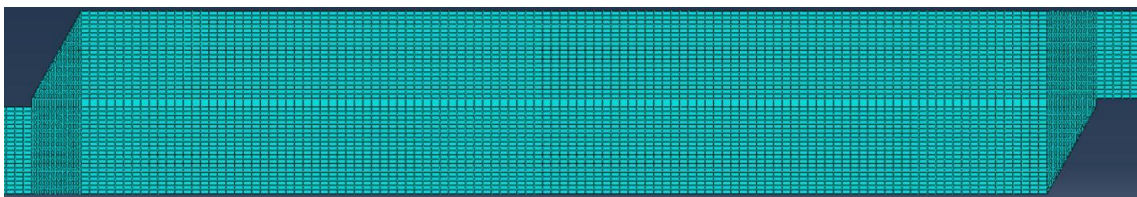


Figura 89. Malha do modelo com  $\alpha=60^\circ$

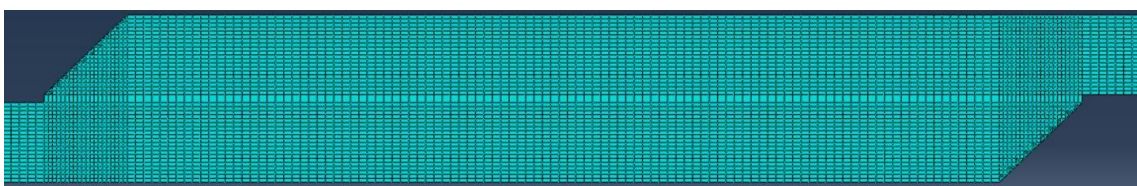


Figura 90. Malha do modelo com  $\alpha=45^\circ$

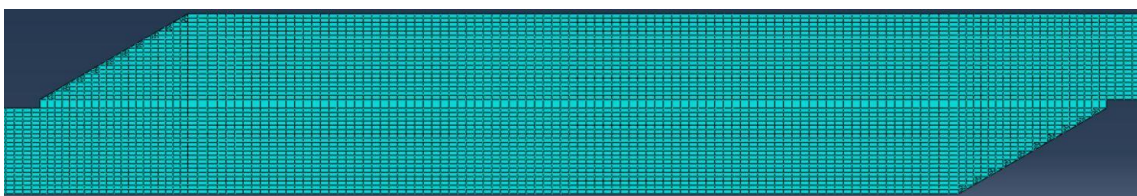
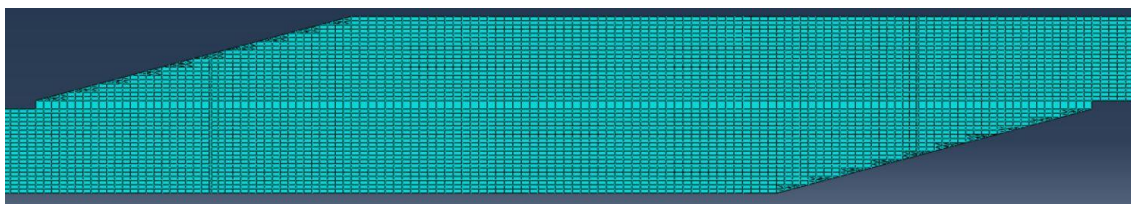
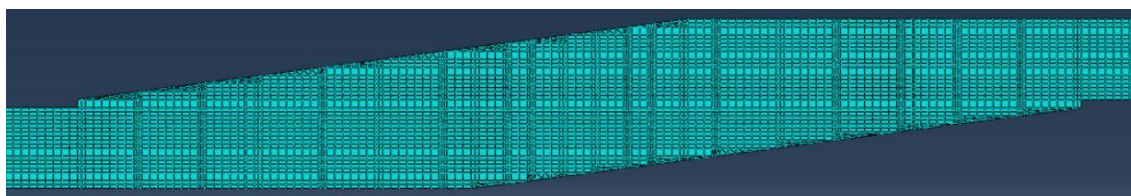


Figura 91. Malha do modelo com  $\alpha=30^\circ$

Figura 92. Malha do modelo com  $\alpha=15^\circ$ Figura 93 Malha do modelo com  $\alpha=7,5^\circ$ 

Na Tabela 26 são apresentados o número de elementos de malha em função de  $\alpha$

Tabela 26. Número de elementos em função de  $\alpha$ 

Elemento	$\alpha [^\circ]$					
	7,5	15	30	45	60	90
CPE4R	21833	24930	25270	25916	26230	13050
COH2D4	162	132	129	145	153	125
CPE3	779	288	120	114	120	0
Total	22774	25350	25519	26175	26503	13175

#### 3.2.4.1.1 Distribuições de tensões

A Figura 94 apresenta a distribuição de tensões de corte para a combinação de adesivos DP8005+AV138. Os resultados obtidos são muito próximos para os vários  $\alpha$  considerados. Nas extremidades e nas fronteiras entre os adesivos, os melhores resultados são obtidos para os  $\alpha=45$  e  $60^\circ$ , para os modelos restantes, a distribuição de tensões de corte é muito próxima.

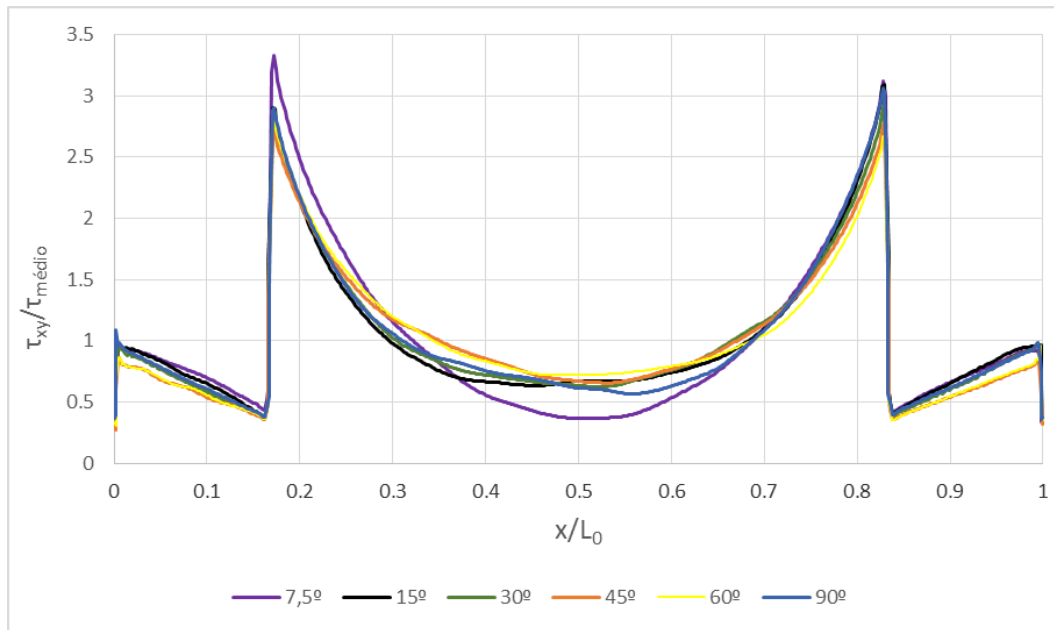


Figura 94. Distribuição de tensões de corte para a combinação DP8005+AV138 em função de  $\alpha$

As tensões de arrancamento para a combinação referida acima podem ser vistas na Figura 95. Nos extremos da camada adesiva é verificada uma redução das tensões de arrancamento em função da diminuição de  $\alpha$ . Desta forma, é visível que, o modelo sem chanfro é o que apresenta maiores picos de tensão e que estes vão diminuindo sendo que os melhores resultados são obtidos pelo modelo de 7,5°. Nas fronteiras entre adesivos verifica-se que, para os modelos de 90°, 60°, 45° e 30°, estes encontram-se à compressão e os restantes modelos se encontram com tensões de arrancamento.

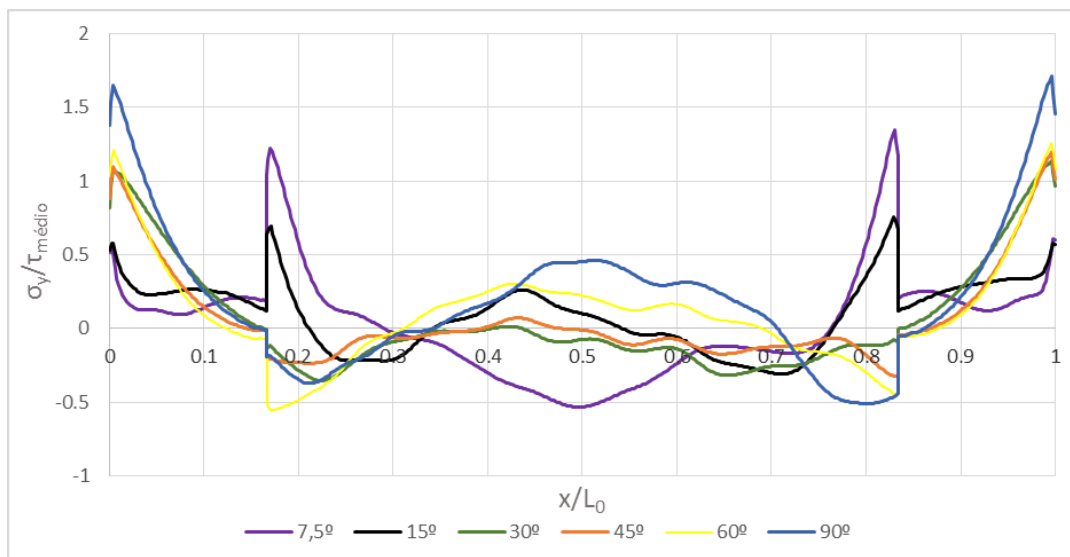


Figura 95. Distribuição de tensões de arrancamento para a combinação DP8005+AV138 em função de  $\alpha$

Os picos de concentração de tensões obtidos anteriormente, podem também ser visualizados nas Figura 96 e Figura 97. No modelo de  $60^\circ$  a concentração de tensões encontra-se nos extremos da camada adesiva (Figura 96), enquanto para o modelo de  $7,5^\circ$  as maiores concentrações de tensão encontram-se nas fronteiras entre os adesivos rígido e flexível (Figura 97).

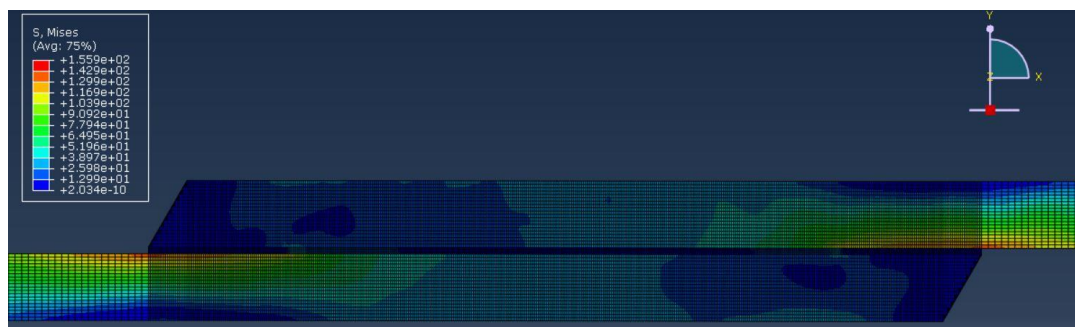


Figura 96. Concentração de tensões para o modelo com  $\alpha=60^\circ$

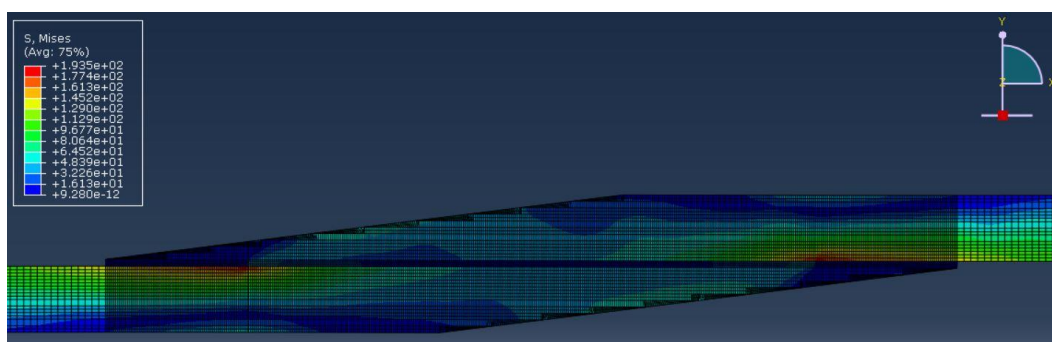


Figura 97. Concentração de tensões para o modelo com  $\alpha=7,5^\circ$

As tensões de corte para a combinação de adesivos RTV106+AV138 para os vários  $\alpha$ , resultam em diferenças muito pouco significativas conforme se pode ver na Figura 98. Tal como nos casos anteriores em que o adesivo RTV106 é utilizado, as secções correspondentes à sua utilização, não apresentam quaisquer valores de tensões de corte devido à sua elevada flexibilidade.

Para a combinação de adesivos RTV106+AV138, as tensões de arrancamento (Figura 99) são as que apresentam os maiores picos de concentração de tensões comparativamente com as restantes combinações. Que, tal como referido anteriormente, deve-se à diferença de propriedades, de salientar a diferença de rigidez entre os dois adesivos. Observando os resultados obtidos na Figura 99, o melhor resultado é obtido para o chanfro de  $7,5^\circ$ . Para os outros modelos verificam-se algumas diferenças, nomeadamente, na fronteira entre adesivos do lado direito, a seguir ao modelo de  $7,5^\circ$ , os melhores resultados são obtidos para os modelos de  $90^\circ$  e  $15^\circ$ , sendo o maior pico de tensões obtido para o modelo de  $60^\circ$ . No entanto na fronteira entre adesivos do lado esquerdo, verificam-se algumas alterações. Os melhores resultados são obtidos com

diferenças pequenas entre eles para os modelos de 7,5°, 30°, 45° e 60°, seguindo-se do modelo de 15° e por fim o modelo sem chanfro (90°).

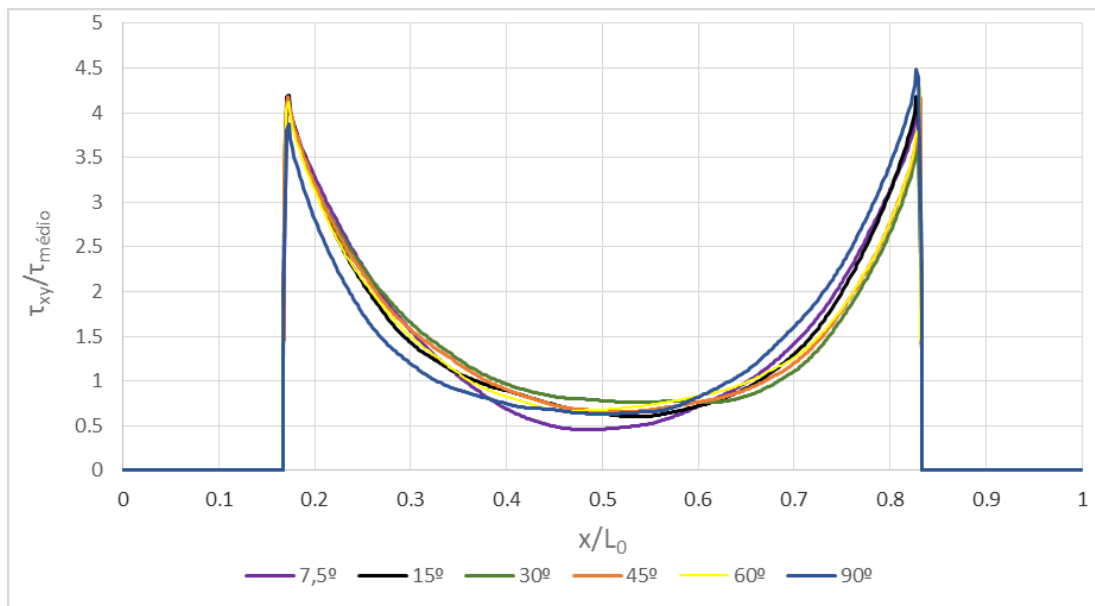


Figura 98. Distribuição de tensões de corte para a combinação RTV106+AV138 em função de  $\alpha$

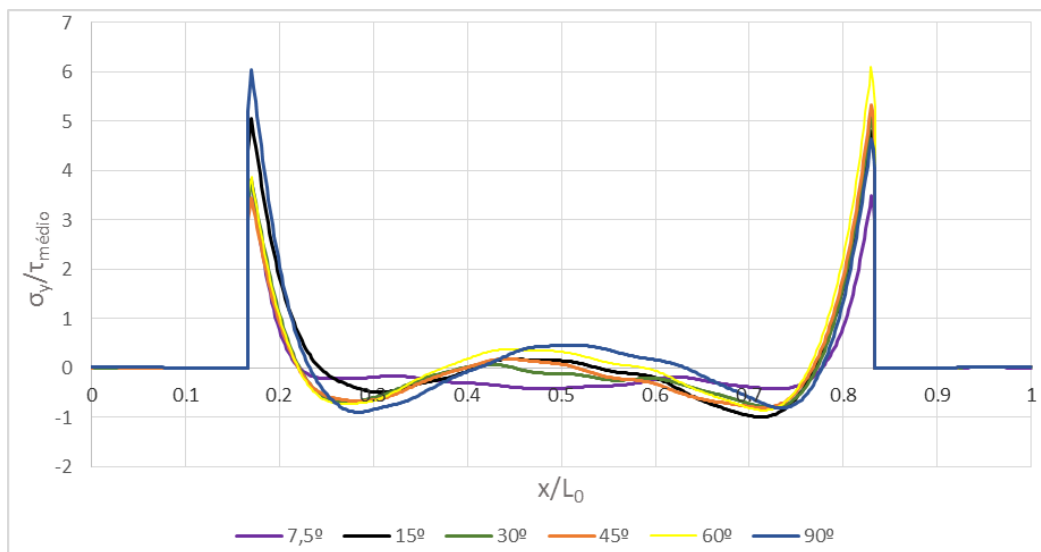


Figura 99. Distribuição de tensões de arrancamento para a combinação RTV106+AV138 em função de  $\alpha$

Na Figura 100 são apresentadas as tensões de corte para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2. Entre as extremidades da camada adesiva e as fronteiras entre adesivos, é possível verificar o efeito que o chanfro exterior causa na junta. Os melhores resultados são obtidos para as juntas de 7,5° e 15°. No entanto, na fronteira entre adesivos, o modelo de 7,5° é o que apresenta maiores picos de concentração de tensões e o modelo de 15° o que apresenta melhores resultados. Os restantes modelos

apresentam algumas diferenças entre si, no entanto têm uma distribuição de tensões que se destacam pela negativa.

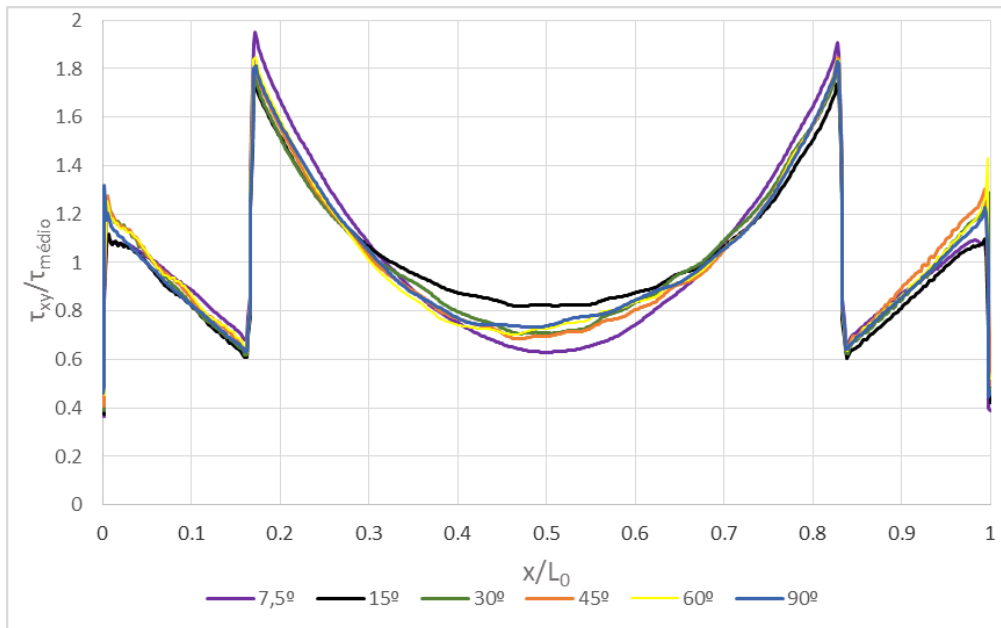


Figura 100. Distribuição de tensões de corte para a combinação DP8005+XNR6852E-2 em função de  $\alpha$

A distribuição de tensões de arrancamento para a combinação DP8005+XNR6852E-2 é apresentada na Figura 101. Os melhores resultados são obtidos para os modelos com chanfro de 15° e 7,5° seguindo-se do modelo de 30°. Para os restantes modelos os resultados obtidos são semelhantes apresentando piores curvas de distribuição de tensões.

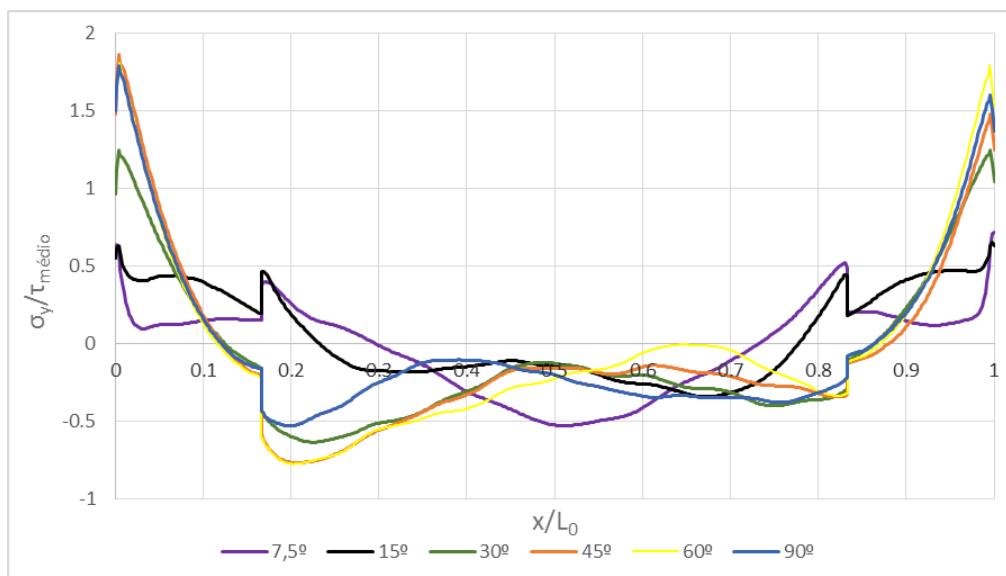


Figura 101. Distribuição de tensões de arrancamento para a combinação DP8005+XNR6852E-2 em função de  $\alpha$

### 3.2.4.1.2 Resistência das juntas

Na Figura 102 são apresentadas as curvas  $P-\delta$  para a combinação de adesivos DP8005+AV138. As curvas para  $\alpha=30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$  apresentam resultados semelhantes, sendo a junta com um chanfro de  $7,5^\circ$  a que apresenta maior valor de carga. O deslocamento até rutura é semelhante para os vários modelos destacando-se o modelo de  $7,5^\circ$ .

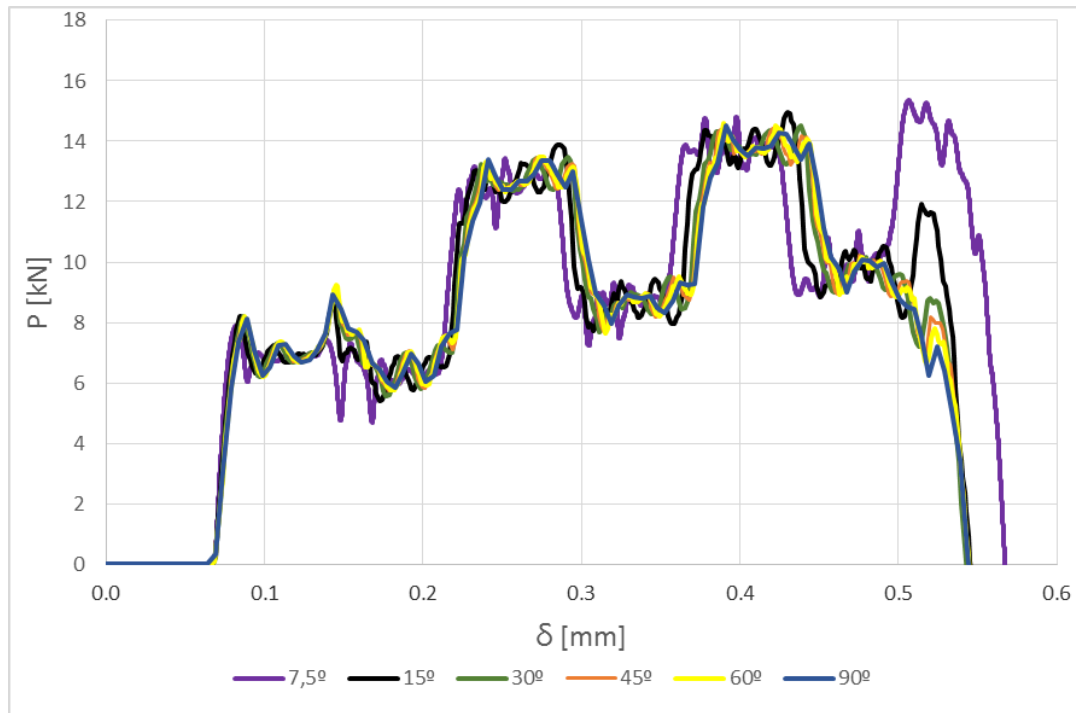


Figura 102. Curva  $P-\delta$  para a combinação de adesivos DP8005+AV138 em função de  $\alpha$

Na Tabela 27 é possível ver com mais detalhe a variação da carga máxima e deslocamento máximos para os vários modelos. Tal como referido em cima, as juntas de  $7,5^\circ$  e  $15^\circ$  sobressaem-se das restantes.

A energia absorvida é apresentada na Tabela 28, como os deslocamentos máximos obtidos são muito próximos à exceção do modelo com  $7,5^\circ$ , as diferenças de energia absorvida são pequenas.

Tabela 27. Influência de  $\alpha$  na carga máxima para a JMSS DP8005+AV138

$\alpha$ [°]	$P_{\text{máx}}$ [kN]	Diferença	$\delta_{\text{máx}}$ [mm]	Diferença
90	14,51	-	0,545	-
60	14,58	+0,5%	0,563	+3,3%
45	14,47	-0,3%	0,544	-0,2%
30	14,52	+0,1%	0,543	-0,4%
15	14,97	+3,2%	0,546	+0,2%
7,5	15,36	+5,9%	0,560	+2,8%

Tabela 28. Energia absorvida JMSS DP8005+AV138 em função de  $\alpha$ 

$\alpha$ [°]	$E$ [J]	Diferença
90	4,47	-
60	4,48	+0,2%
45	4,48	+0,2%
30	4,47	0,0%
15	4,54	+1,6%
7,5	4,93	+10,3%

Na Figura 103 são apresentadas as curvas  $P$ - $\delta$  para a combinação de adesivos RTV106+AV138. É visível que, tal como no caso anterior, os modelos de 7,5° e 15°, sobressaem-se dos restantes. O modelo sem chanfro (90°) é o que apresenta pior desempenho. Os modelos de 60° e 45° apresentam resultados semelhantes entre si, ainda que ligeiramente superiores ao modelo sem chanfro. Verifica-se um aumento da carga máxima com a redução de  $\alpha$  (ver Tabela 29).

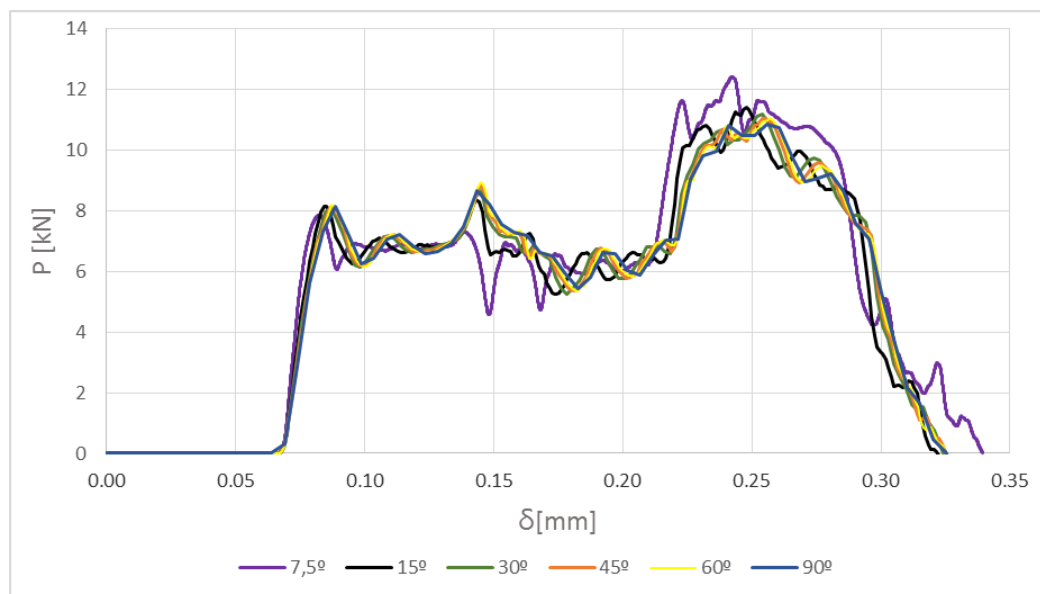


Figura 103. Curva  $P$ - $\delta$  para a combinação de adesivos RTV106+AV138 em função de  $\alpha$

Tabela 29. Influência de  $\alpha$  na carga máxima para a JMSS RTV106+AV138

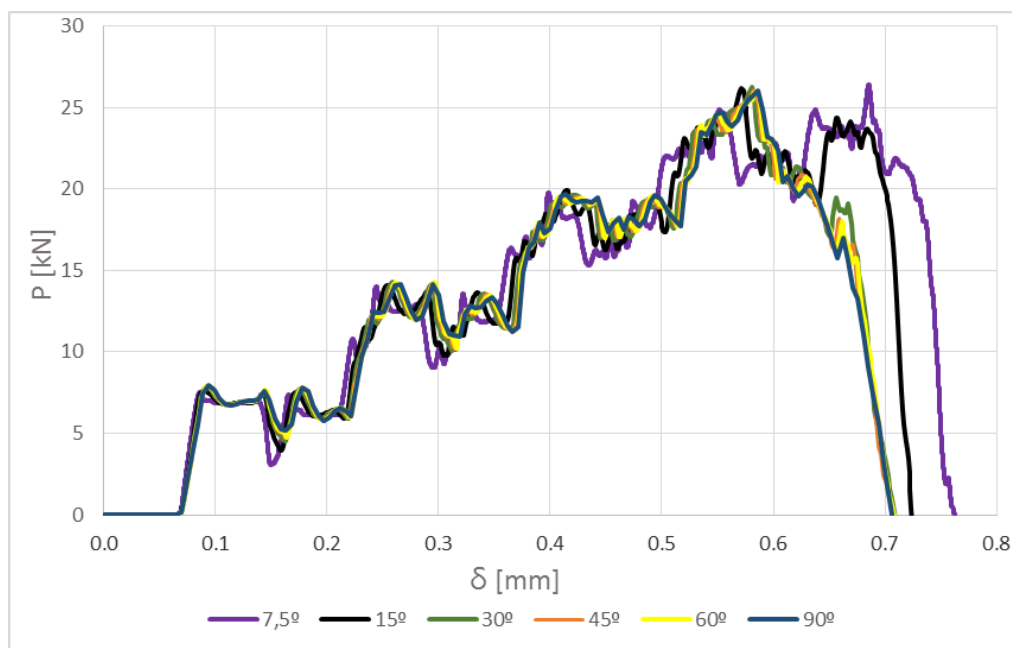
$\alpha$ [°]	$P_{m\acute{a}x}$ [kN]	Diferença	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	Diferença
90	10,84	-	0,325	-
60	11,05	+1,9%	0,326	+0,3%
45	11,05	+1,8%	0,325	-0,0%
30	11,19	+3,2%	0,325	0,0%
15	11,42	+5,4%	0,323	-0,6%
7,5	12,42	-14,6%	0,339	+4,3%

Apenas o modelo com  $\alpha=7,5^\circ$  mostra um aumento significativo na sua capacidade de absorção de energia. Estes resultados podem ser justificados por ser um modelo menos suscetível às tensões de arrancamento (Figura 99). Os restantes modelos apresentam resultados semelhantes conforme é apresentado na Tabela 30.

Tabela 30. Energia absorvida JMSS RTV106+AV138 em função de  $\alpha$ 

$\alpha$ [°]	$E$ [J]	Diferença
90	1,79	-
60	1,79	0,0%
45	1,78	-0,6%
30	1,78	-0,6%
15	1,77	-1,1%
7,5	1,87	+4,5%

Na Figura 104 são apresentadas as curvas  $P$ - $\delta$  para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2. As juntas de 7,5° e 15° destacam-se pelo deslocamento máximo obtido. Relativamente ao valor de carga máxima, verifica-se um ligeiro aumento com a diminuição de  $\alpha$ .

Figura 104. Curva  $P$ - $\delta$  para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2 em função de  $\alpha$ 

Na Tabela 31 são apresentados os valores de carga e deslocamento máximos para esta combinação de adesivos para os vários valores de  $\alpha$ .

Tabela 31. Influência de  $\alpha$  na carga máxima para a JMSS DP8005+XNR6852E-2 em função de  $\alpha$ 

$\alpha$ [°]	$P_{MÁX}$ [kN]	Diferença	$\delta_{máx}$ [mm]	Diferença
90	26,05	-	0,708	-
60	25,96	-0,3%	0,708	0,0%
45	26,04	0,0%	0,707	-0,1%
30	26,23	+0,7%	0,709	+0,1%
15	26,27	+0,5%	0,724	+2,3%
7,5	26,39	+1,3%	0,762	+7,6%

A Tabela 32 traduz mais uma vez aquilo que foi dito anteriormente, sendo a junta sem chanfro (90°) claramente a que apresenta o pior desempenho.

Tabela 32. Energia absorvida JMSS DP8005+XNR6852E-2 em função de  $\alpha$ 

$\alpha$ [°]	$E$ [J]	Diferença
90	8,99	-
60	9,03	-+0,44%
45	9,00	+0,11%
30	9,07	+0,89%
15	9,80	+9,01%
7,5	10,46	+16,35%

#### 3.2.4.2 Chanfro interior dos aderentes

Neste capítulo a alteração geométrica em estudo será a variação do ângulo de chanfro interior dos aderentes ( $\beta$ ) de acordo com a geometria de junta representada na Figura 105. Os valores de  $\beta$  considerados são: 7,5°, 15°, 30°, 45°, 60° e 90° que tal como no capítulo anterior, representa a ausência de chanfro.

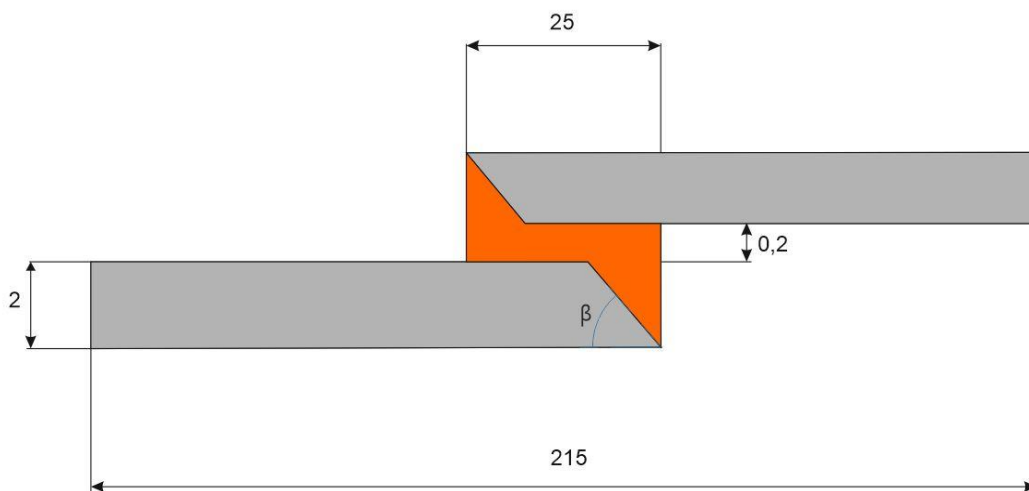


Figura 105. Geometria e dimensões da JMSS para o estudo da variação de  $\beta$

Tal como no capítulo 3.2.4.1, foi necessário efetuar um controlo de malha de forma a reduzir o número de elementos triangulares (Figura 106).



Figura 106. Controlo de malha para o modelo com  $\beta=30^\circ$

Os modelos com chanfro interior (Figura 107) contemplam algumas diferenças face aos modelos anteriores. Em termos de atribuição de materiais, pode-se ver a vermelho a secção correspondente ao adesivo flexível modelada com elementos coesivos, a azul a secção do adesivo rígido modelada com elementos coesivos e a cinzento a secção dos aderentes modelada com elementos sólidos. As propriedades destas secções mantêm-se, na camada adesiva mantêm-se os elementos *sweep* do tipo COH2D4, os aderentes têm elementos do tipo CPE4R e nas zonas triangulares elementos CPE3. Nas zonas amarelas foram atribuídas as propriedades elásticas do adesivo flexível modelada com elementos sólidos, estas duas zonas foram divididas por elementos estruturados do tipo CPE4R e do tipo CPE3 nas zonas triangulares.

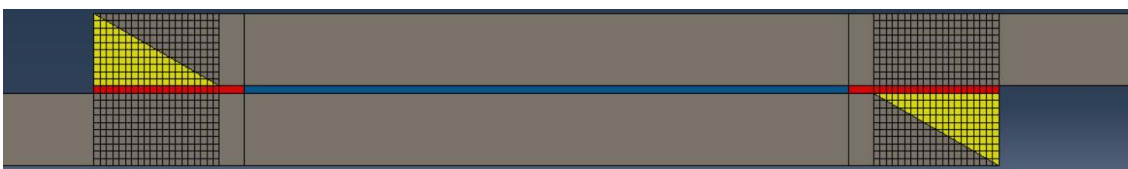


Figura 107. Identificação e atribuição de materiais para as várias secções no modelo com  $\beta=30^\circ$

As malhas utilizadas nos modelos de  $7,5^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$  são apresentadas da Figura 108 à Figura 112.

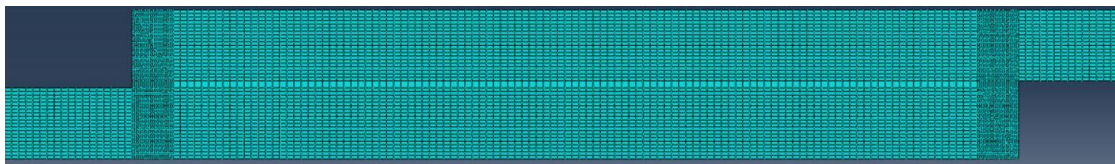


Figura 108. Visualização da malha do modelo com  $\beta=60^\circ$

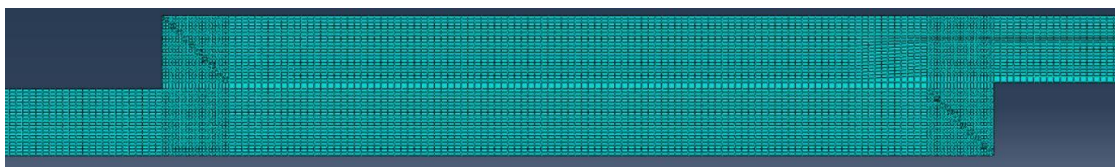


Figura 109. Visualização da malha do modelo com  $\beta=45^\circ$

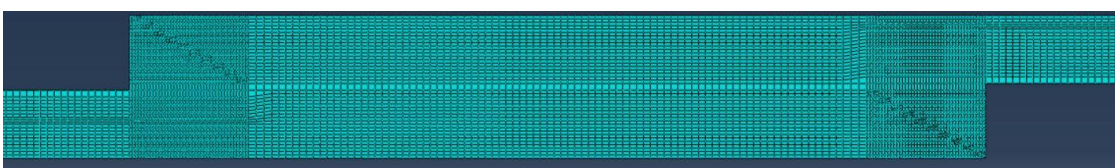


Figura 110. Visualização da malha do modelo com  $\beta=30^\circ$

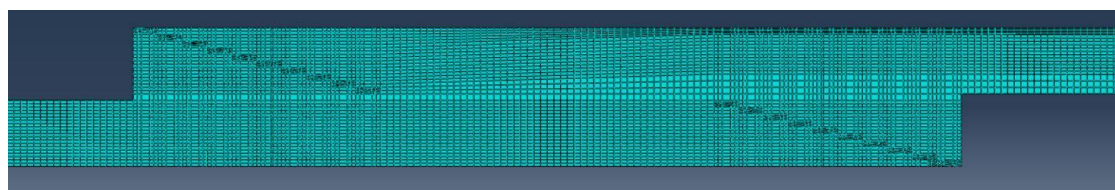


Figura 111. Visualização da malha do modelo com  $\beta=15^\circ$

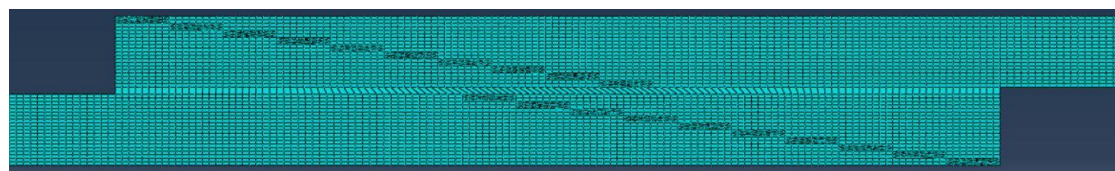


Figura 112. Visualização da malha do modelo com  $\beta=7,5^\circ$

O número de elementos utilizados para cada  $\beta$  são apresentados na Tabela 33.

Tabela 33. Número de elementos em função de  $\beta$ 

Elemento	$\alpha [^\circ]$					
	7,5	15	30	45	60	90
CPE4R	25326	26422	27150	26270	26590	13050
COH2D4	127	152	169	145	153	125
CPE3	1136	744	560	240	240	0
Total	26589	27318	27879	26655	26983	13175

### 3.2.4.2.1 Distribuições de tensões

Na Figura 113 é apresentada a distribuição de tensões de corte para a combinação de adesivos DP8005+AV138. Os maiores picos de tensão situam-se, tal como nos casos anteriores, nas fronteiras entre adesivos, mas no caso de  $\beta=15^\circ$  e  $7,5^\circ$ , o pico de tensões aparece no limite do chanfro no interior do aderente (Figura 114). A variação de  $\beta$  altera a localização desse limite. Para  $\beta=15^\circ$ , o limite fica a cerca de 7,5 mm, que, no eixo das abcissas do gráfico (Figura 113) corresponde aos valores de 0,3 e 0,7. Analisando os restantes modelos, é possível verificar que os chanfros interiores melhoram a distribuição de tensões. O modelo que apresenta melhores resultados é o de  $\beta=7,5^\circ$ , seguindo-se os modelos de  $30^\circ$  e  $45^\circ$ . O modelo de  $90^\circ$  é claramente o que apresenta os maiores picos nos extremos da junta adesiva.

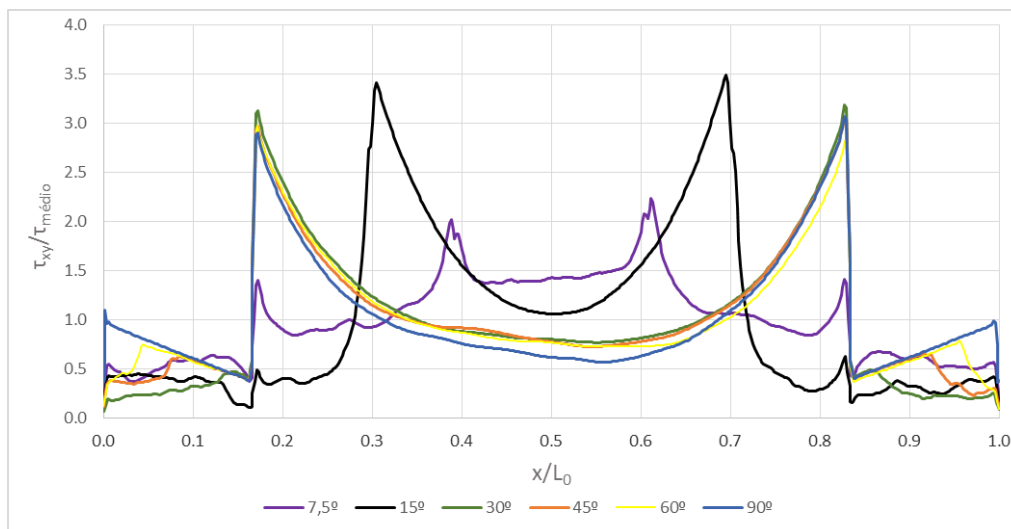


Figura 113. Distribuição de tensões de corte para a combinação de adesivos DP8005+AV138

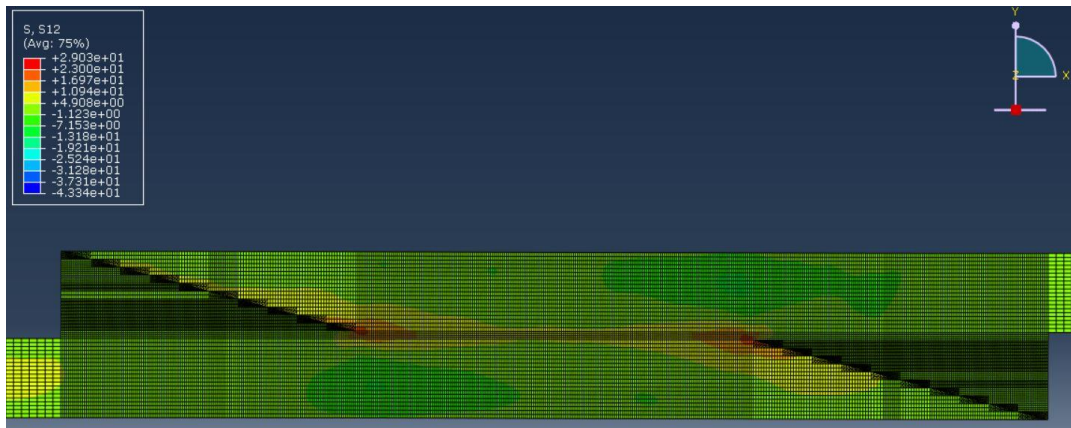


Figura 114. Concentração de tensões nos limites do chanfro interior para  $\beta=15^\circ$  para DP8005+AV138

A distribuição de tensões de arrancamento para a combinação de adesivos DP8005+AV138 é apresentada na Figura 115. O modelo de  $7,5^\circ$  é o que apresenta os maiores valores de pico nas fronteiras da junta adesiva seguindo-se dos modelos sem chanfro ( $90^\circ$ ) e de  $15^\circ$ . Os restantes modelos apresentam melhores resultados sendo o modelo de  $45^\circ$  o de melhor desempenho. A posição dos picos de tensões no interior da camada adesiva varia em função da posição dos limites dos chanfros interiores.

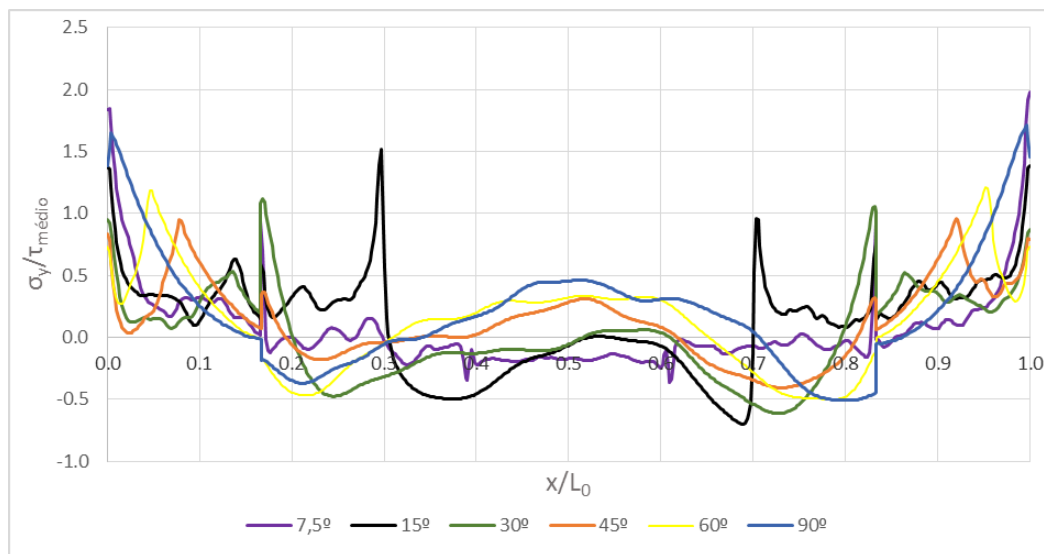


Figura 115. Distribuição de tensões de arrancamento para a combinação de adesivos DP8005+AV138

A Figura 116 mostra a distribuição de tensões de corte para a combinação de adesivos RTV106+AV138. Devido às fracas propriedades do adesivo RTV106, não são visíveis as influências que o chanfro interior tem sobre a junta. Para esta combinação de adesivos não foi possível simular o modelo com  $\beta=7,5^\circ$  e  $15^\circ$  devido às fracas propriedades do adesivo RTV106.

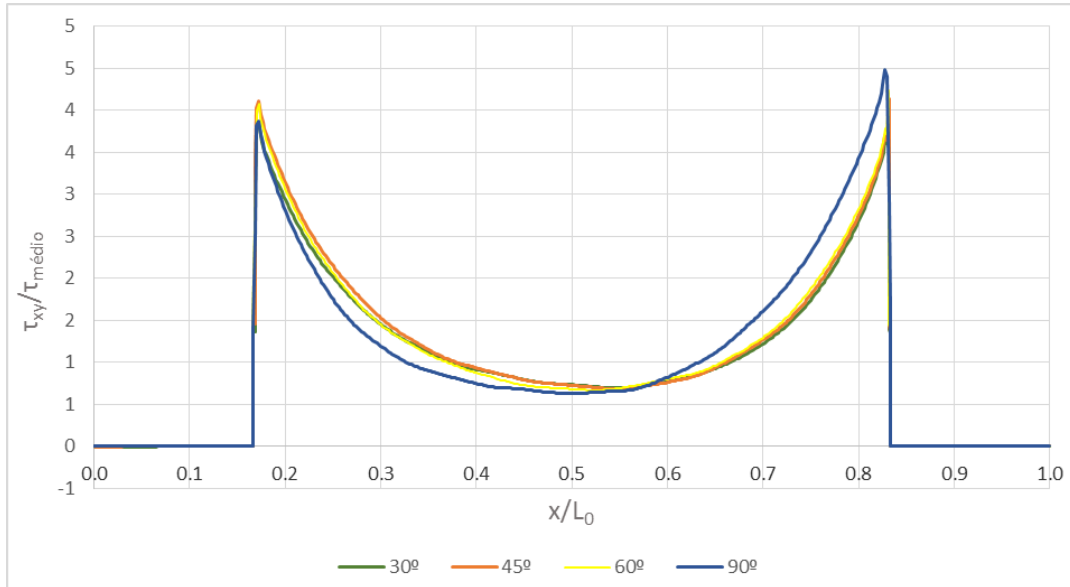


Figura 116. Distribuição de tensões de corte para a combinação de adesivos RTV106+AV138

As tensões de arrancamento para esta combinação de adesivos são apresentadas na Figura 117. Não é visível uma melhoria na concentração de tensões de arrancamento com a utilização do chanfro interior para esta combinação de adesivos. Quanto à junta sem chanfro (90°), na fronteira entre adesivos do lado direito, apresenta valores ligeiramente abaixo dos restantes modelos, mas, por outro lado, na fronteira do lado esquerdo verifica-se um valor de pico mais elevado em cerca de 30% que os restantes modelos.

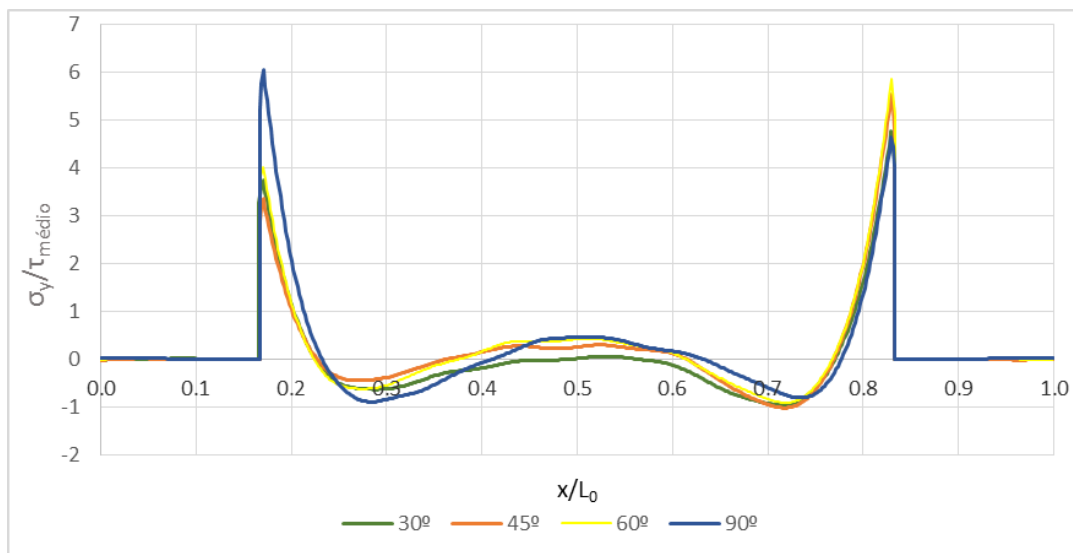


Figura 117. Distribuição de tensões de arrancamento para a combinação de adesivos RTV106+AV138

Por fim, a distribuição de tensões de corte para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2 é apresentada na Figura 118. Nas fronteiras entre adesivos é possível ver um aumento nos valores de pico de tensão em função da diminuição de  $\beta$

com a exceção do modelo com  $\beta$  de  $15^\circ$ . Tendo como referência o modelo sem chanfro ( $90^\circ$ ), é possível observar que, a distribuição de concentração de tensões de corte melhora significativamente com a redução de  $\beta$ . Tal como aconteceu nos casos anteriores, os modelos de  $15^\circ$  e  $7,5^\circ$  são influenciados pelos limites dos chanfros interiores dos aderentes.

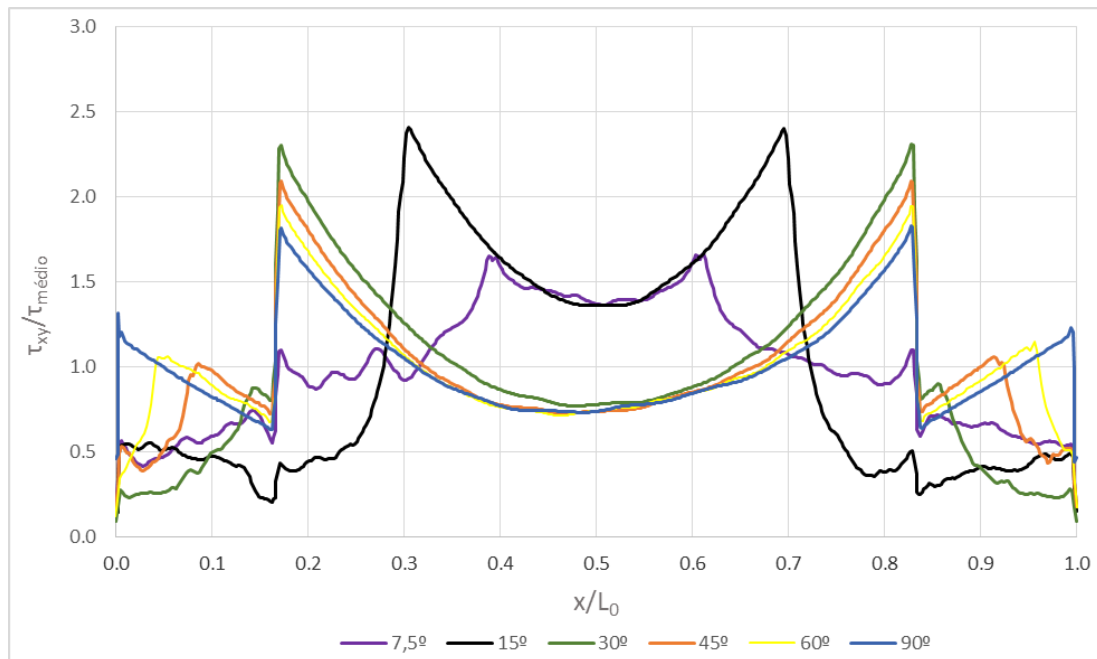


Figura 118. Distribuição de tensões de corte para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2

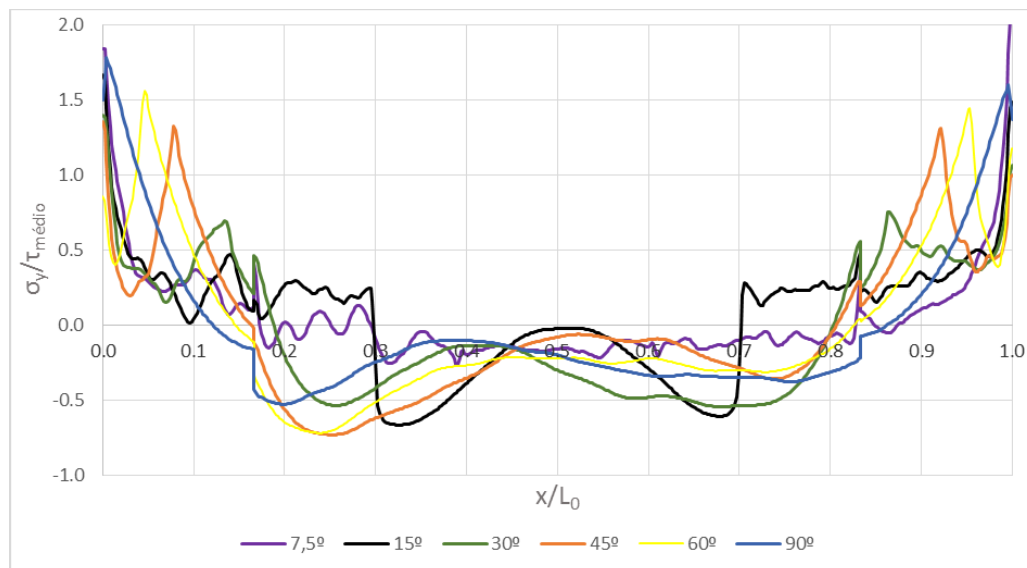


Figura 119. Distribuição de tensões de arrancamento para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2

Na Figura 119 são apresentadas as curvas de distribuição das tensões de arrancamento com a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2 em função de  $\beta$ . Entre os vários

modelos, destacam-se os modelos sem chanfro ( $90^\circ$ ) e o de menor ângulo por apresentarem os maiores valores de pico nas extremidades da camada adesiva. Para os modelos de  $60^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $30^\circ$  verifica-se um decréscimo do valor de pico da tensão de arrancamento com o decréscimo de  $\beta$  e uma variação da posição dos picos de tensão com a variação da posição dos limites do chanfro interior tal como acontece na combinação DP8005+AV138.

### 3.2.4.2.2 Resistência das juntas

As curvas  $P-\delta$  podem ser visualizadas na Figura 120 para os diferentes valores de  $\beta$  para a combinação de adesivos DP8005+AV138. O modelo com  $\beta=7,5^\circ$  sobressai-se pela redução do deslocamento máximo comparativamente com os restantes modelos. Verifica-se uma redução no valor de carga máxima apesar de não se verificarem diferenças significativas no deslocamento. O modelo sem chanfro é o que apresenta os melhores resultados em termos de carga e deslocamento máximo, no entanto é o que sofre mais com as tensões de arrancamento e o que apresenta maiores valores de pico de tensões de corte nas suas extremidades.

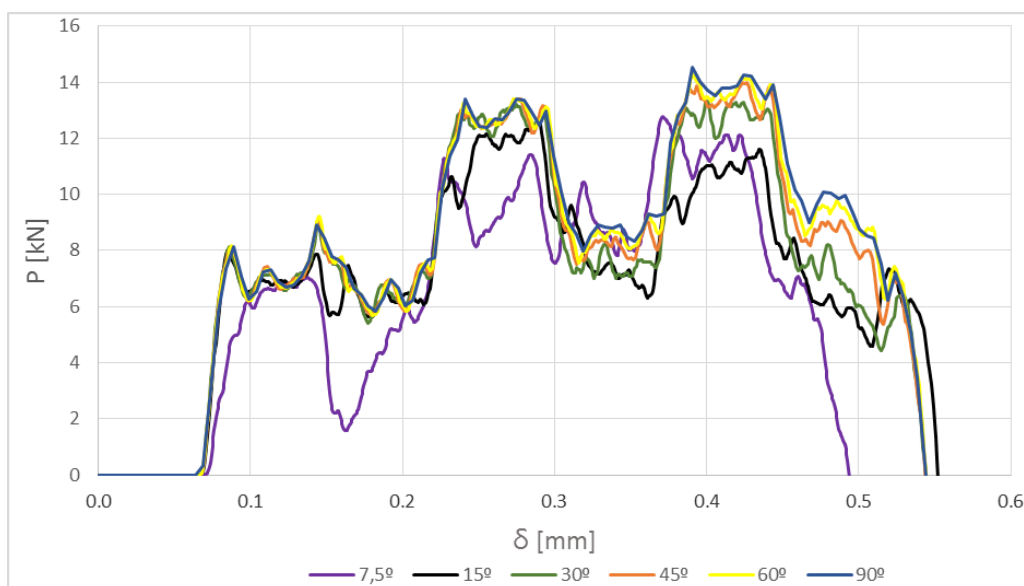


Figura 120. Curva  $P-\delta$  para a combinação de adesivos DP8005+AV138 em função de  $\beta$

Na Tabela 34 pode-se ver com mais detalhe as diferenças de desempenho entre os vários modelos.

Na Tabela 35 são apresentados os valores de energia absorvida pelas JMSS para a combinação de adesivos DP8005+AV138 em função de  $\beta$ . Tal como foi possível verificar na tabela anterior, as juntas com  $\beta=7,5^\circ$  e  $15^\circ$  são as que absorvem menos energia como resultado do menor valor de carga obtido. Verifica-se uma tendência de diminuição da energia absorvida com a redução de  $\beta$ .

Tabela 34. Influência de  $\beta$  na carga máxima para a JMSS DP8005+AV138

$\beta$ [°]	$P_{\text{máx}}$ [kN]	Diferença	$\delta_{\text{máx}}$ [mm]	Diferença
90	14,51	-	0,545	-
60	14,26	-1,7%	0,545	0,0%
45	13,99	-3,6%	0,544	-0,2%
30	13,33	-8,1%	0,544	-0,2%
15	12,65	-12,8%	0,552	+1,3%
7,5	12,77	-12,0%	0,493	-9,5%

Tabela 35. Energia absorvida JMSS DP8005+AV138 em função de  $\beta$ 

$\beta$ [°]	E [J]	Diferença
90	4,47	-
60	4,41	-1,3%
45	4,28	-4,3%
30	4,09	-8,5%
15	3,83	-14,3%
7,5	3,20	-28,4%

Na Figura 121 são apresentadas as curvas  $P$ - $\delta$  para a combinação de adesivos RTV106+AV138. Tal como já foi repetido no capítulo 3.2.4.2.1, não foi possível simular os modelos com  $\beta=7,5^\circ$  e  $15^\circ$  para esta combinação de adesivos. Os restantes modelos apresentam desempenho semelhante.

Na Tabela 36 é possível ver com maior detalhe as diferenças entre os quatro modelos restantes, verifica-se que para os modelos de  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$ , as cargas máximas obtidas são ligeiramente superiores que o modelo sem chanfro ( $90^\circ$ ) sendo o modelo de  $30^\circ$  o que se destaca.

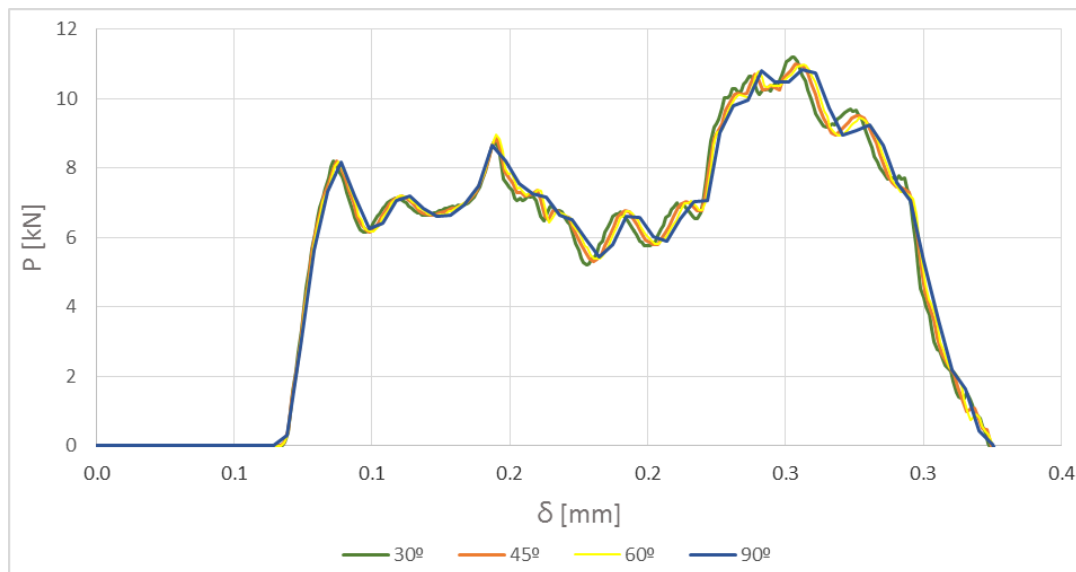


Figura 121. Curva  $P$ - $\delta$  para a combinação de adesivos RTV106+AV138 em função de  $\beta$

Tabela 36. Influência de  $\beta$  na carga máxima para a JMSS RTV106+AV138

$\beta$ [°]	$P_{max}$ [kN]	Diferença
90	10,84	-
60	10,99	+1,4%
45	10,99	+1,4%
30	11,20	+3,3%

A variação da energia absorvida pode ser visualizada na Tabela 37, onde não se verificam diferenças significativas.

Tabela 37. Energia absorvida JMSS RTV106+AV138 em função de  $\beta$

$\beta$ [°]	$E$ [J]	Diferença
90	1,79	-
60	1,78	-0,6%
45	1,78	-0,6%
30	1,77	-1,1%

As curvas  $P$ - $\delta$  para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2 são apresentadas na Figura 122. Verificam-se melhores desempenhos nos modelos de  $60^\circ$  e  $45^\circ$ , nos restantes a junta perde resistência com a diminuição de  $\beta$ .

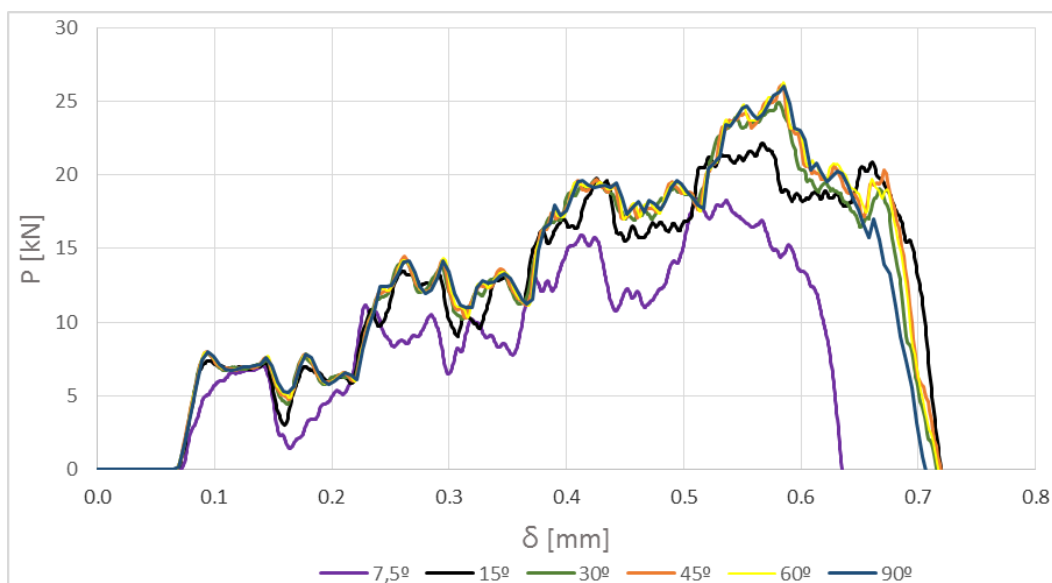


Figura 122. Curva  $P$ - $\delta$  para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2 em função de  $\beta$

A variação de carga e deslocamento máximos podem ser vistos com maior detalhe na Tabela 38.

Tabela 38. Influência de  $\beta$  na carga máxima para a JMSS DP8005+XNR6852E-2

$\beta$ [°]	$P_{\text{máx}}$ [kN]	Diferença	$\delta_{\text{máx}}$ [mm]	Diferença
90	26,05	-	0,708	-
60	26,31	+1,0%	0,718	+1,4%
45	26,16	+0,4%	0,719	+1,6%
30	24,96	-4,2%	0,716	+1,1%
15	22,17	-14,9%	0,720	+1,7%
7,5	18,33	-29,6%	0,635	-10,3%

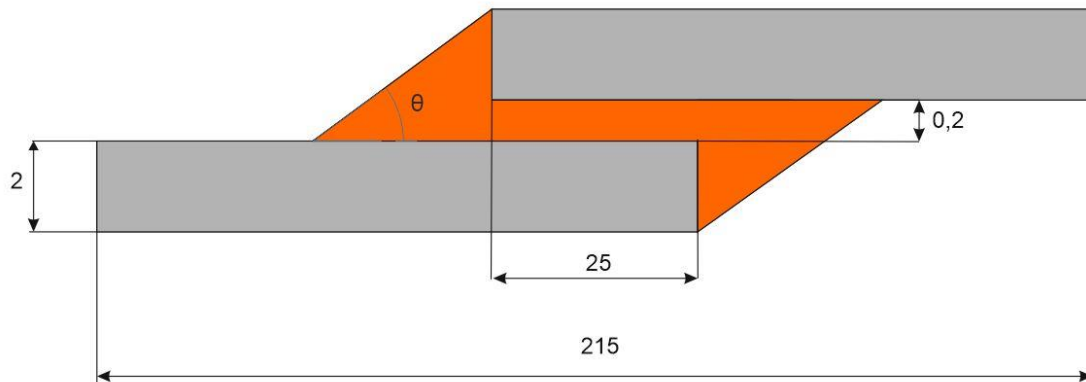
Na Tabela 39 é apresentada a energia absorvida para a combinação DP8005+XNR6852E-2 que vão ao encontro com o que foi observado em cima. Verifica-se um decréscimo muito acentuado na absorção de energia para a juntas de  $7,5^\circ$ . As juntas de  $60^\circ$  e  $45^\circ$  são as que apresentam melhor desempenho.

Tabela 39. Energia absorvida JMSS DP8005+XNR6852E-2 em função de  $\beta$ 

$\beta$ [°]	E [J]	Diferença
90	8,99	-
60	9,23	+2,7%
45	9,16	+1,9%
30	8,99	+0,0%
15	8,79	-2,2%
7,5	5,74	-36,2%

### 3.2.4.3 Filete de adesivo

A próxima alteração geométrica em estudo é a variação do ângulo de filete de adesivo ( $\theta$ ), mantendo-se o comprimento de sobreposição de 25 mm e a espessura de aderentes de 2 mm. A Figura 123 é uma representação da geometria da JMSS utilizada. Serão utilizados os seguintes valores de  $\theta$ : 7,5°, 15°, 30°, 45°, 60° e 90°.

Figura 123. Geometria da JMSS para o estudo do efeito de  $\theta$ 

Tal como nos casos anteriores foi necessário efetuar um controlo de malha de modo a reduzir o número de elementos triangulares (Figura 124).

Figura 124. Controlo de malha para o modelo com  $\theta=45^\circ$

Na Figura 125, a azul e branco, podemos ver as secções dos adesivos rígido e flexível respetivamente. A secção do adesivo rígido para os vários modelos será igual aos modelos anteriores somando o comprimento extra obtido pelo filete de adesivo, mantendo-se os seus elementos de malha como *sweep* do tipo COH2D4. A secção a verde corresponde aos aderentes tendo apenas elementos estruturados do tipo CPE4R. Para a secção do filete de adesivo, secções a vermelho, existem algumas semelhanças com o chanfro interior, nomeadamente a atribuição das propriedades elásticas do adesivo flexível. Estas duas secções foram divididas por elementos estruturados do tipo CPE4R e do tipo CPE3 nas zonas triangulares.

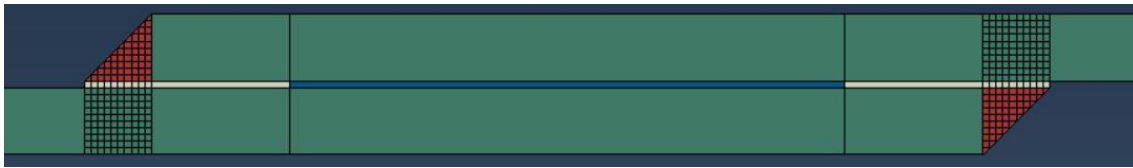


Figura 125. Atribuição de materiais no modelo com  $\theta=45^\circ$

As malhas criadas para os vários  $\theta$  são apresentadas das Figura 126 à Figura 130. O modelo de  $\theta=90^\circ$  não tem filete de adesivo e a malha é idêntica à utilizada na validação.

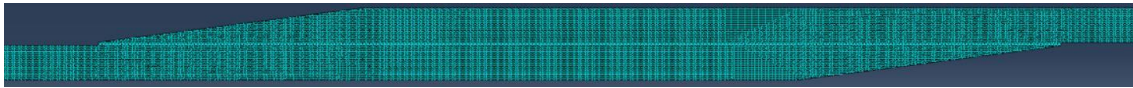


Figura 126. Malha do modelo com  $\theta=7,5^\circ$

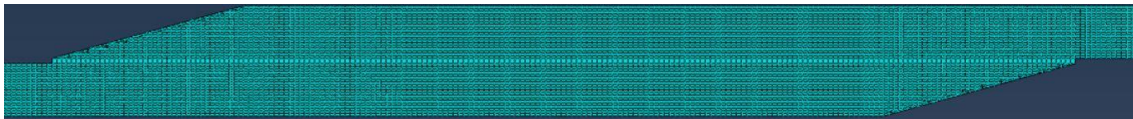


Figura 127. Malha do modelo com  $\theta=15^\circ$

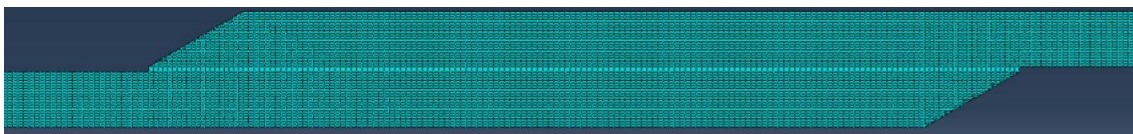


Figura 128. Malha do modelo com  $\theta=30^\circ$

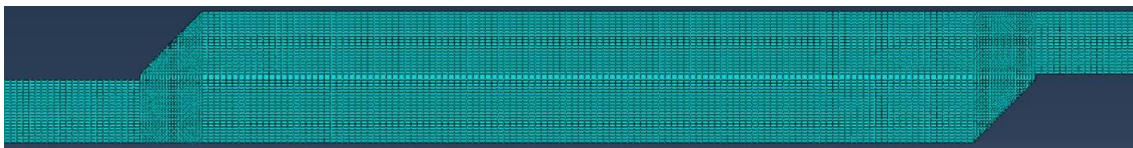
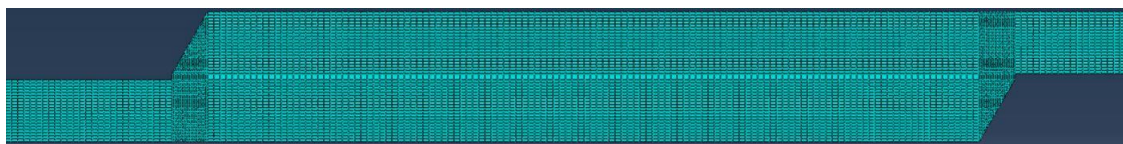


Figura 129. Malha do modelo com  $\theta=45^\circ$

Figura 130. Malha do modelo com  $\theta=60^\circ$ 

Na Tabela 40 são apresentados o número de elementos para cada JMSS.

Tabela 40. Número de elementos em função de  $\theta$ 

Elemento	$\theta$ [°]					
	90	60	45	30	15	7,5
CPE4R	13050	26470	26310	26030	26390	27150
COH2D4	125	165	165	165	205	285
CPE3	-	120	120	120	280	600
Total	13175	26755	26595	26315	26875	28035

#### 3.2.4.3.1 Distribuições de tensões

Nas alterações geométricas apresentadas nos capítulos anteriores, o comprimento da camada adesiva era restringido pelos topos dos aderentes, no entanto, com a introdução do filete de adesivo isso não acontece, sendo maior quanto menor o  $\theta$  em estudo. Devido a esse facto, a tensão média de corte calculada para estes ensaios foi obtida considerando apenas os valores de tensão registados dentro do limite dos aderentes. Nas distribuições de corte e arrancamento, a distância de 0 e 1 correspondem aos limites da camada adesiva entre aderentes (correspondente ao comprimento de sobreposição de 25 mm), a restante distância corresponde à camada adesiva sob os filetes de adesivo. A distribuição de tensões de corte para a combinação de adesivos DP8005+AV138 é apresentada na Figura 131. Observa-se uma redução dos efeitos de concentração de tensões de corte nos limites da camada adesiva entre aderentes conforme se vai reduzindo o valor de  $\theta$ , estes resultados foram também obtidos em ensaios estáticos [111].

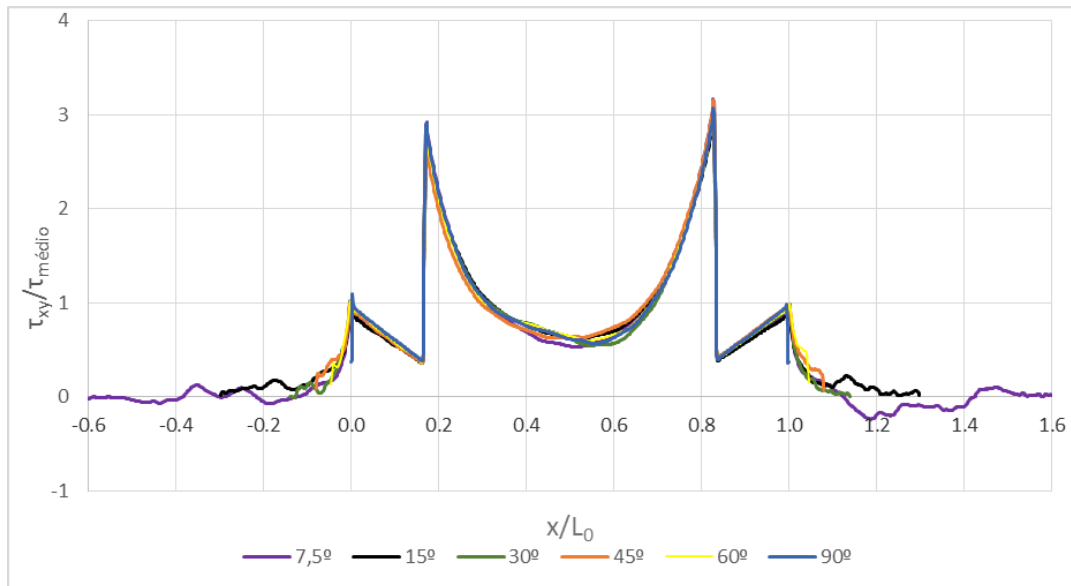


Figura 131. Distribuição de tensões de corte para os adesivos DP8005+AV138 em função de  $\theta$

As tensões de arrancamento são apresentadas na Figura 132, apesar de as curvas obtidas serem bastante semelhantes, é possível ver que, o filete de adesivo proporciona melhorias em termos de redução de concentração de tensões de arrancamento e as mesmas são menores quanto menor for o valor de  $\theta$ .

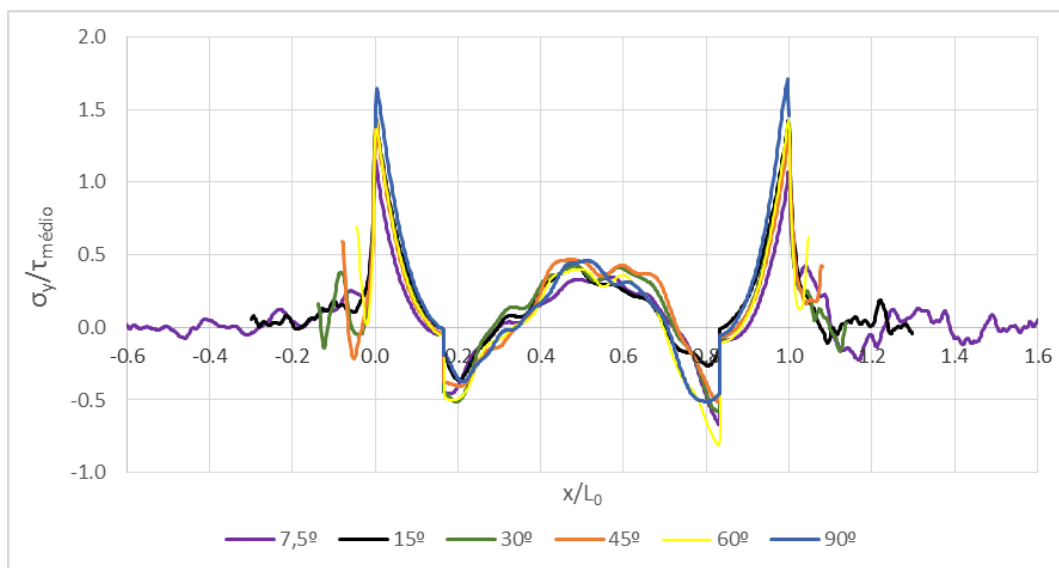


Figura 132. Distribuição de tensões de arrancamento para os adesivos DP8005+AV138 em função de  $\theta$

Para a combinação de adesivos RTV106+AV138 são apresentadas na Figura 133 a distribuição de tensões de corte para os vários modelos. Para esta combinação, o filete de adesivo não oferece quaisquer benefícios à junta devido às fracas propriedades do adesivo RTV106.

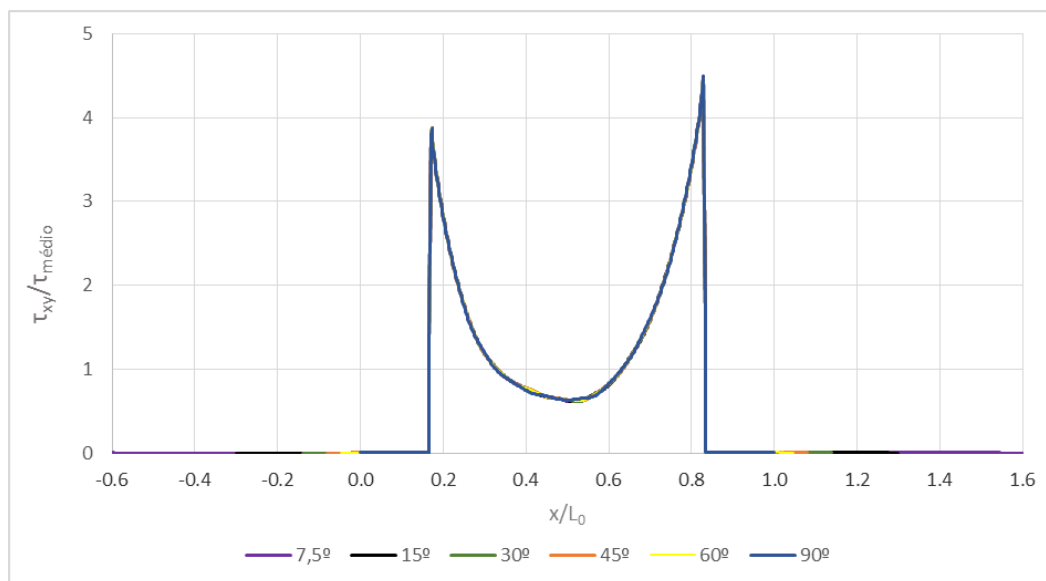


Figura 133. Distribuição de tensões de corte para os adesivos RTV106+AV138 em função de  $\theta$

Tal como acontece na distribuição de tensões de corte, os resultados obtidos para a distribuição de tensões de arrancamento (Figura 134) mostram que, o filete de adesivo utilizando as propriedades elásticas do adesivo RTV106 não trás qualquer melhoria nas tensões de arrancamento da junta.

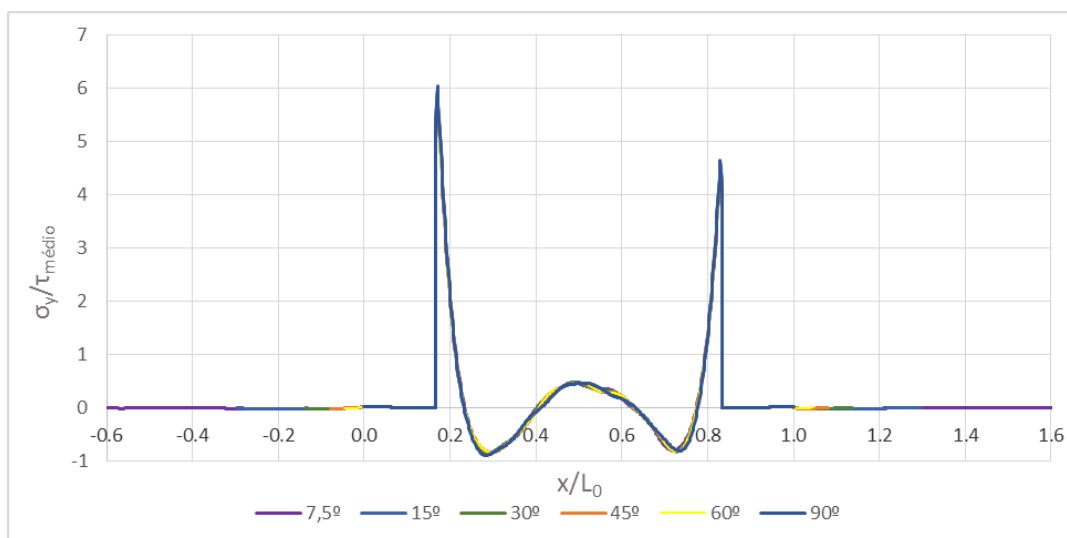


Figura 134. Distribuição de tensões de arrancamento para os adesivos RTV106+AV138 em função de  $\theta$

Na Figura 135 são apresentadas as curvas de distribuição de tensões de corte para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2. Tal como verificado na combinação de adesivos DP8005+AV138, também nesta combinação se verifica que o filete de adesivo introduz melhorias na distribuição e na redução das tensões de corte.

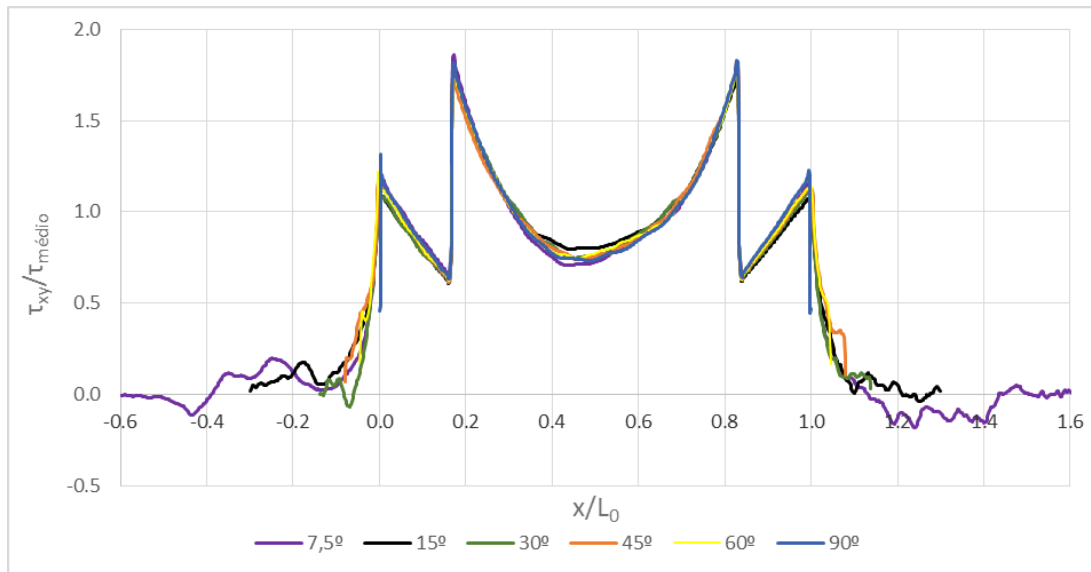


Figura 135. Distribuição de tensões de corte para os adesivos DP8005+XNR6852E-2 em função de  $\theta$

Verifica-se mais uma vez, que a introdução de filetes de adesivo reduz a concentração de tensões de arrancamento conforme mostra Figura 136. O modelo sem filetes de adesivo (90°) é de todos o que apresenta maiores valores de pico.

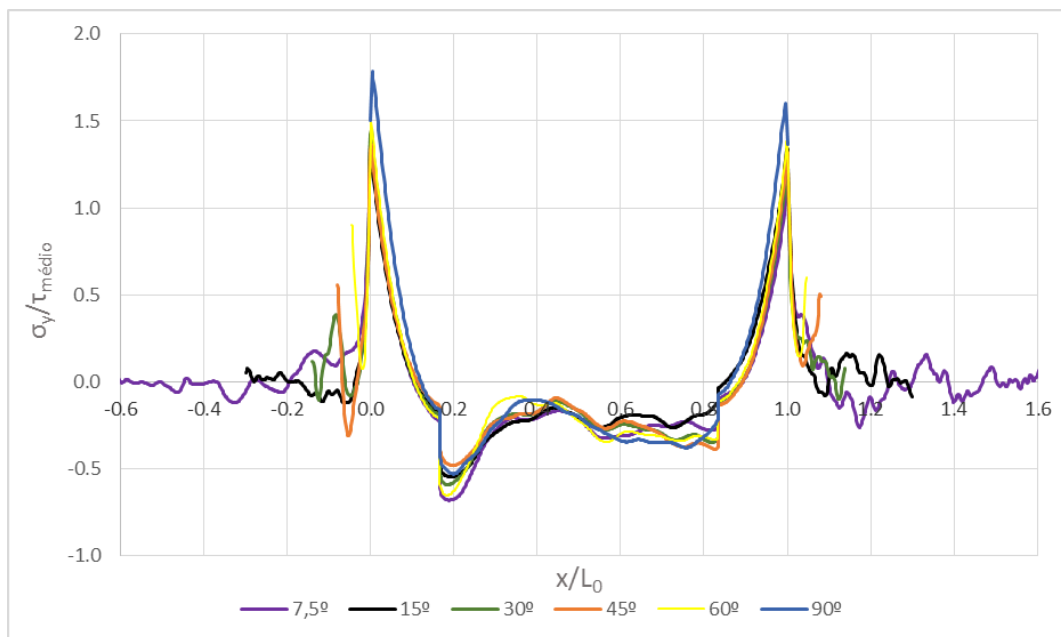


Figura 136. Distribuição de tensões de arrancamento para os adesivos DP8005+XNR6852E-2

### 3.2.4.3.2 Resistência das juntas

As curvas  $P-\delta$  para a combinação de adesivos DP8005+AV138 em função da variação de  $\theta$ , podem ser visualizadas na Figura 137. Verifica-se uma melhoria no desempenho das juntas com a redução do ângulo de filete de adesivo.

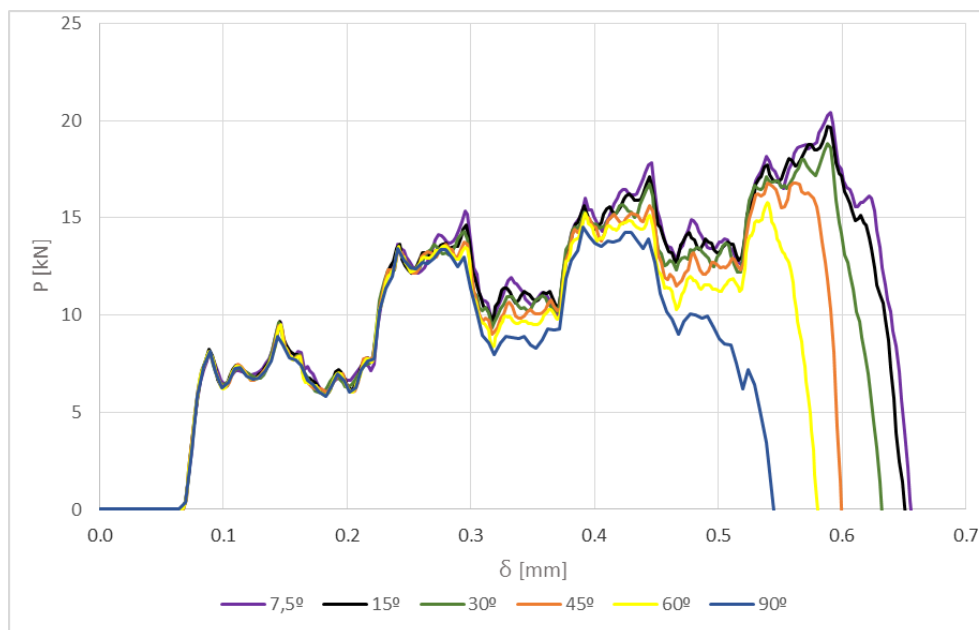


Figura 137. Curvas P- $\delta$  para a combinação de adesivos DP8005+AV138 em função de  $\theta$

Na Tabela 41 é possível visualizar com maior pormenor as diferenças entre os vários modelos de filete de adesivo em termos de carga máxima. O modelo com filete de 7,5° apresenta um aumento no valor da carga máxima em 41% e um aumento no deslocamento máximo em 20%.

Tabela 41. Influência de  $\theta$  na carga máxima para a JMSS DP8005+AV138

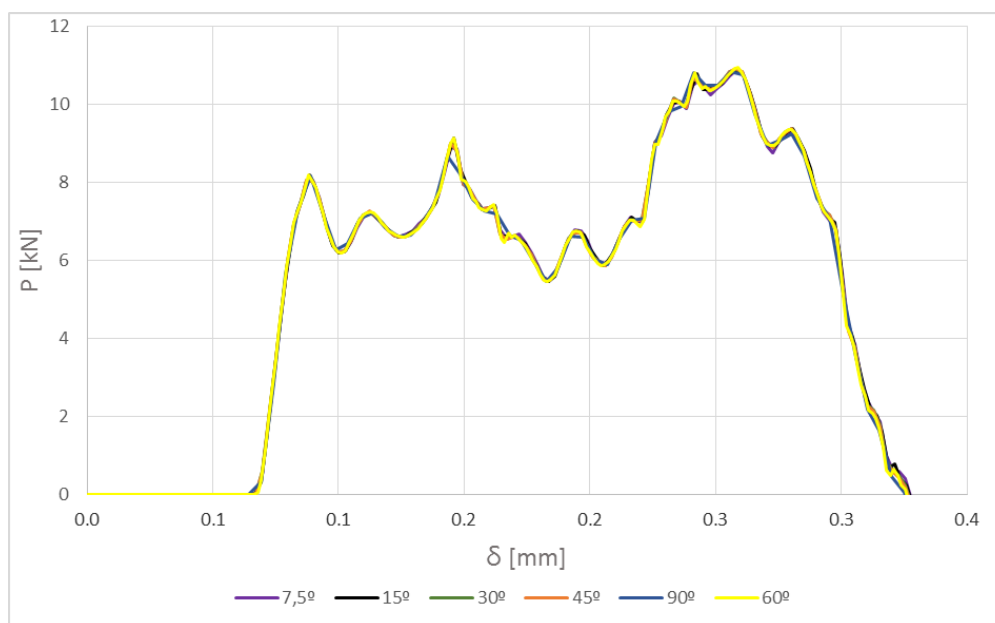
$\theta$ [°]	$P_{max}$ [kN]	Diferença	$\delta_{max}$ [mm]	Diferença
90	14,51	-	0,549	-
60	15,80	+8,9%	0,581	+5,8%
45	16,81	+15,9%	0,600	+9,3%
30	18,84	+29,8%	0,633	+15,3%
15	19,72	+35,9%	0,653	+18,9%
7,5	20,43	+40,8%	0,657	+19,7%

A energia absorvida pela junta para os vários modelos para a combinação DP8005+AV138 é apresentada na Tabela 42 que, tal como seria de esperar, com a diminuição de  $\theta$ , a capacidade de absorção de energia aumenta.

Tabela 42. Energia absorvida JMSS DP8005+AV138 em função de  $\theta$ 

$\theta$ [°]	E [J]	Diferença
90	4,47	-
60	5,33	+19,2%
45	5,91	+32,2%
30	6,49	+45,2%
15	6,96	+55,7%
7,5	7,14	+59,7%

As curvas  $P-\delta$  para a combinação de adesivos RTV106+AV138 é apresentada na Figura 138. Para esta combinação de adesivos, as diferenças de resultados são insignificantes para esta alteração geométrica. Este fenómeno é explicado pela flexibilidade muito elevada do adesivo RTV106, fazendo com que não existam diferenças significativas entre o modelo de 90° (sem filete de adesivo) e os restantes modelos.

Figura 138. Curvas  $P-\delta$  para a combinação de adesivos RTV106+AV138 em função de  $\theta$ 

Os valores de carga e deslocamento máximos para cada modelo são apenas distinguíveis na Tabela 43.

Tabela 43. Influência de  $\theta$  na carga máxima para a JMSS RTV106+AV138

$\theta$ [°]	$P_{max}$ . [kN]	Diferença	$\delta_{max}$ [mm].	Diferença
90	10,84	-	0,330	-
60	10,93	+0,8%	0,327	-0,9%
45	10,90	+0,6%	0,328	-0,6%
30	10,89	+0,5%	0,328	-0,6%
15	10,89	+0,5%	0,328	-0,6%
7,5	10,85	+0,1%	0,328	-0,6%

Devido às diferenças quase impercetíveis de carga e deslocamento máximo, a energia absorvida é também idêntica para os vários modelos conforme é apresentado na Tabela 44.

Tabela 44. Energia absorvida JMSS RTV106+AV138 em função de  $\theta$ 

$\theta$ [°]	E [J]	Diferença
90	1,79	-
60	1,79	0,0%
45	1,80	+0,6%
30	1,80	+0,6%
15	1,80	0%
7,5	1,79	0,0%

Por fim, as curvas  $P$ - $\delta$  para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2 são apresentadas na Figura 139. Tal como acontece na combinação DP8005+AV138, é evidente uma melhoria no desempenho da junta com a redução de  $\theta$ . No entanto, em termos percentuais, o aumento de carga máxima é inferior ao verificado na combinação DP8005+AV138.

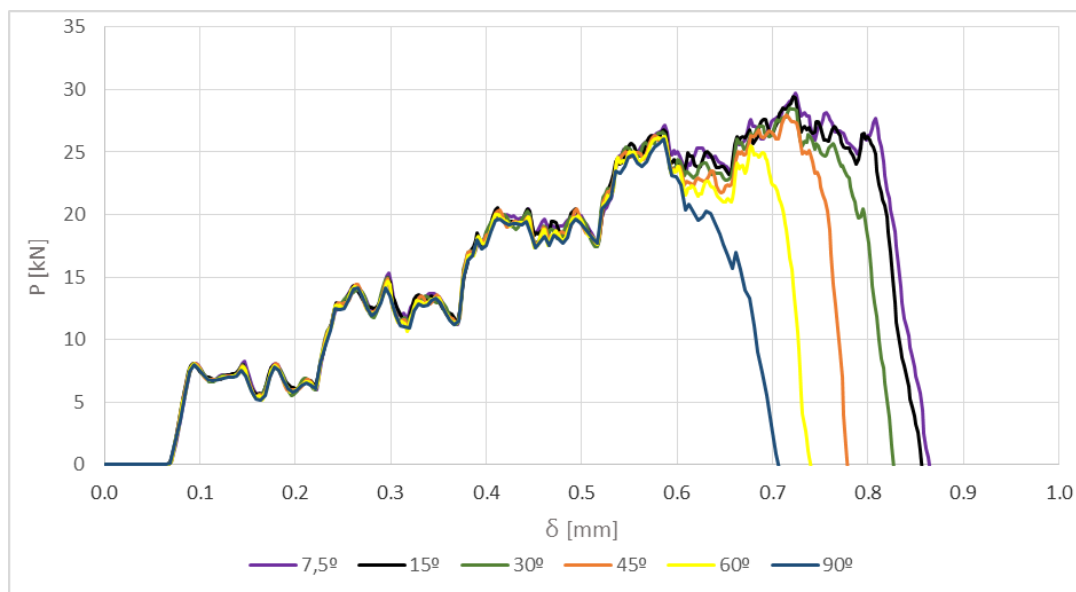


Figura 139. Curvas P- $\delta$  para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2 em função de  $\theta$

Na Tabela 45 são apresentadas as variações de carga e deslocamento máximo em função da variação de  $\theta$ .

Tabela 45. Influência de  $\theta$  na carga máxima para a JMSS DP8005+XNR6852E-2

$\theta$ [°]	$P_{max}$ [kN]	Diferença	$\delta_{max}$ [mm].	Diferença
90	26,05	-	0,708	-
60	26,21	+0,6%	0,741	+4,7%
45	28,02	-+7,6%	0,779	+10,0%
30	28,48	+9,3%	0,827	+16,8%
15	29,42	+12,9%	0,857	+21,0%
7,5	29,68	+13,9%	0,865	+22,2%

A energia absorvida por esta combinação de adesivos é apresentada na Tabela 46. Existe uma maior perda na capacidade de absorção de energia para as juntas de 90° e 60°.

Tabela 46. Energia absorvida JMSS DP8005+XNR6852E-2 em função de  $\theta$ 

$\theta$ [°]	E [J]	Diferença
90	8,99	-
60	10,30	+14,57%
45	11,59	+28,92%
30	12,75	+41,82%
15	13,57	+50,95%
7,5	13,89	+54,51%

### 3.2.5 Outras alterações geométricas

Neste último capítulo será feito um conjunto de otimizações geométricas com o objetivo de melhorar os resultados obtidos nos modelos apresentados nos capítulos anteriores. Isto é, ao longo deste trabalho foram feitos vários estudos abordando uma série de parâmetros geométricos, tais como a variação do comprimento de sobreposição, da espessura de aderentes, a introdução de chanfros interior/exterior nos aderentes e, por fim, a introdução de filetes de adesivo. Para cada combinação de adesivos será selecionada a melhor situação para cada caso e serão feitas combinações com as alterações geométricas abordadas nos capítulos anteriores.

Devido ao facto de todas as alterações geométricas terem sido feitas com  $L_0=25$  mm, e com  $e=2$  mm, as otimizações serão feitas com estas dimensões. Para além disso, não é possível a criação de um chanfro interior e um exterior na mesma junta, e um filete de adesivo também não é possível de executar com um chanfro exterior. Desta forma, para a otimização das juntas serão associados os melhores resultados para cada combinação de adesivos considerando o melhor resultado de cada nas alterações geométricas de chanfro interior e filete de adesivo. Na Figura 140 está representada a geometria da JMSS com os parâmetros descritos a cima. A cinzento estão representados os aderentes, a rosa os adesivos rígido (secção B) e flexível (secção A) com a proporção enumerada no capítulo 3.1.3.1 e, a laranja, a secção correspondente ao adesivo que preenche o chanfro interior dos aderentes e o filete de adesivo seguindo os parâmetros enunciados nos capítulos 3.2.4.2 e 3.2.4.3, respetivamente.

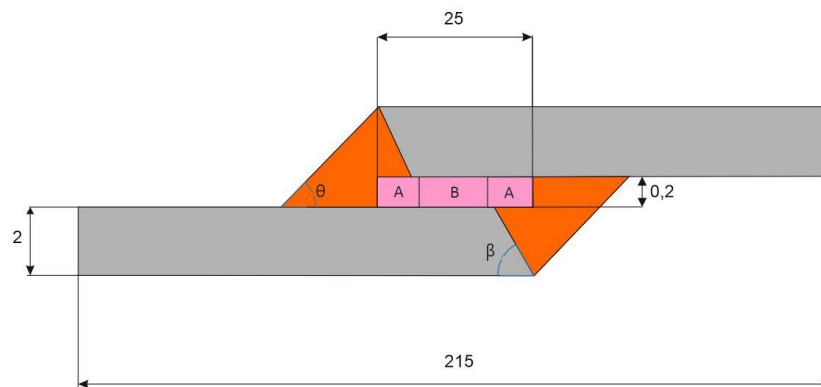


Figura 140. Geometria da JMSS para o estudo de otimização geométrica

### 3.2.5.1 DP8005+AV138

Os melhores resultados obtidos para esta combinação de adesivos foram para o filete de adesivo com  $\theta=7,5^\circ$  e com um chanfro interior com  $\beta=60^\circ$ . A combinação destes dois modelos resultou no modelo conforme se pode ver na Figura 141.

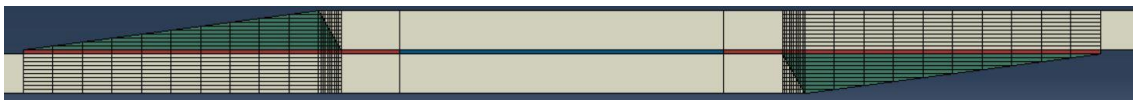


Figura 141. Modelo combinado dos adesivos DP8005+AV138

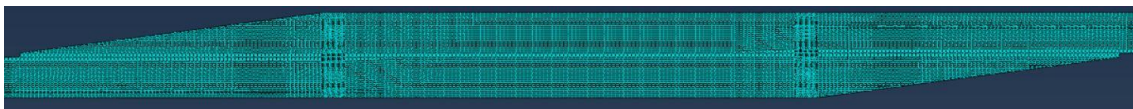


Figura 142. Malha do modelo combinado para os adesivos DP8005+AV138

A malha criada para esta combinação (Figura 142) seguiu os mesmos parâmetros utilizados nas alterações individuais e os elementos gerados são apresentados na Tabela 47.

Tabela 47. Elementos para o modelo combinado com os adesivos DP8005+AV138

Tipo elementos	Nº elementos
CPE4R	28190
COH2D4	313
CPE3	840
<b>Total</b>	<b>29343</b>

### 3.2.5.1.1 Distribuições de tensões

A distribuição de tensões de corte para a combinação de adesivos DP8005+AV138 considerando as alterações geométricas enunciadas no capítulo anterior são apresentadas na Figura 143.

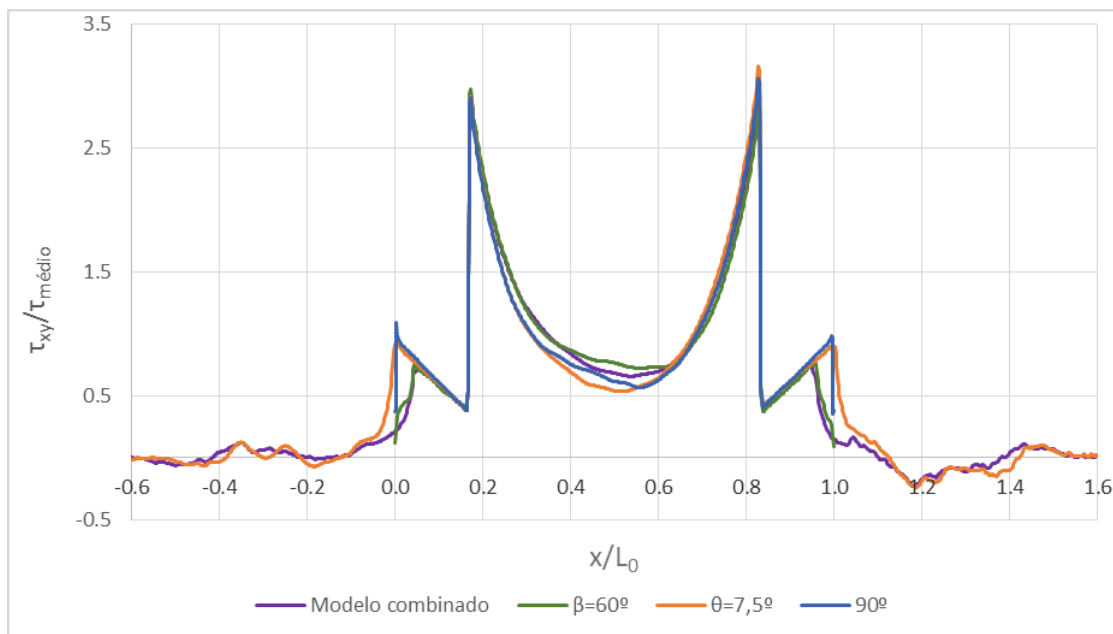


Figura 143. Distribuição de tensões de corte para a combinação DP8005+AV138

As tensões de corte do modelo combinado aproximam-se do modelo apenas com filete de adesivo, mas, apresentam picos menos acentuados nas extremidades da camada adesiva e que se concentram nos limites do chanfro interior tal como acontece no modelo com o chanfro interior.

As tensões de arrancamento para esta configuração são apresentadas na Figura 144. Na zona central da camada adesiva verifica-se uma área maior sujeita a tensões de compressão na junta combinada, os maiores picos de tensão localizam-se nos limites do chanfro interior, e existe uma transição mais suave conforme acontece nas curva do filete de adesivo.

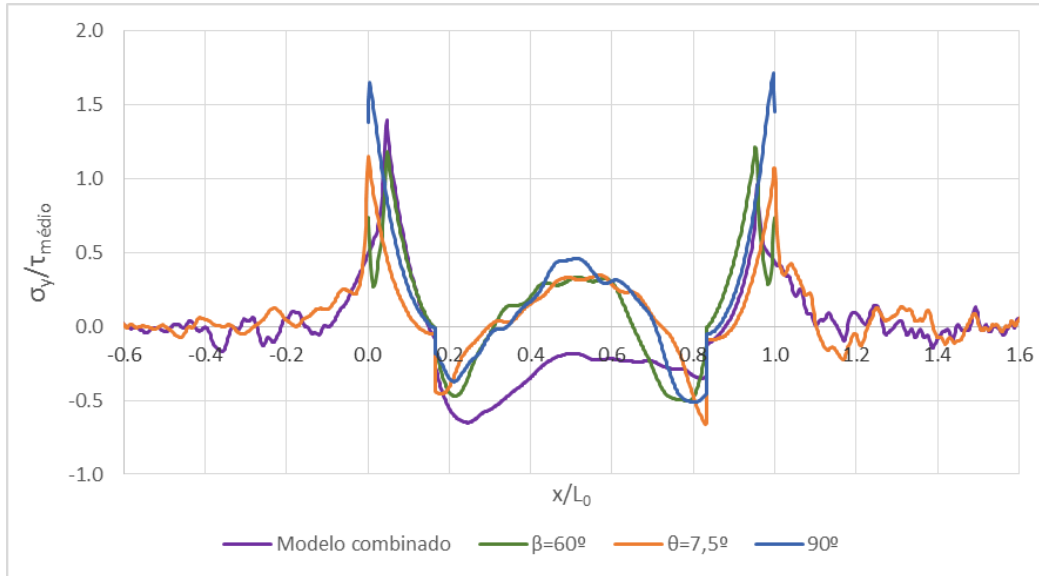


Figura 144. Distribuição de tensões de arrancamento para a combinação DP8005+AV138

### 3.2.5.1.2 Resistência das juntas

As curvas  $P-\delta$  obtidas para a combinação de adesivos DP8005+AV138 são apresentadas na Figura 145. As curvas estão agrupadas duas a duas, os resultados do modelo combinado são semelhantes aos do filete de adesivo, e os resultados do chanfro interior aproximam-se dos do modelo sem alterações geométricas. Com a combinação do filete adesivo com o chanfro interior obteve-se então os segundos melhores resultados tanto em carga como deslocamentos máximos. A melhor prestação é obtida para o modelo com filete de adesivo, no entanto, no modelo combinado obtém-se curvas de distribuição de tensão melhores.

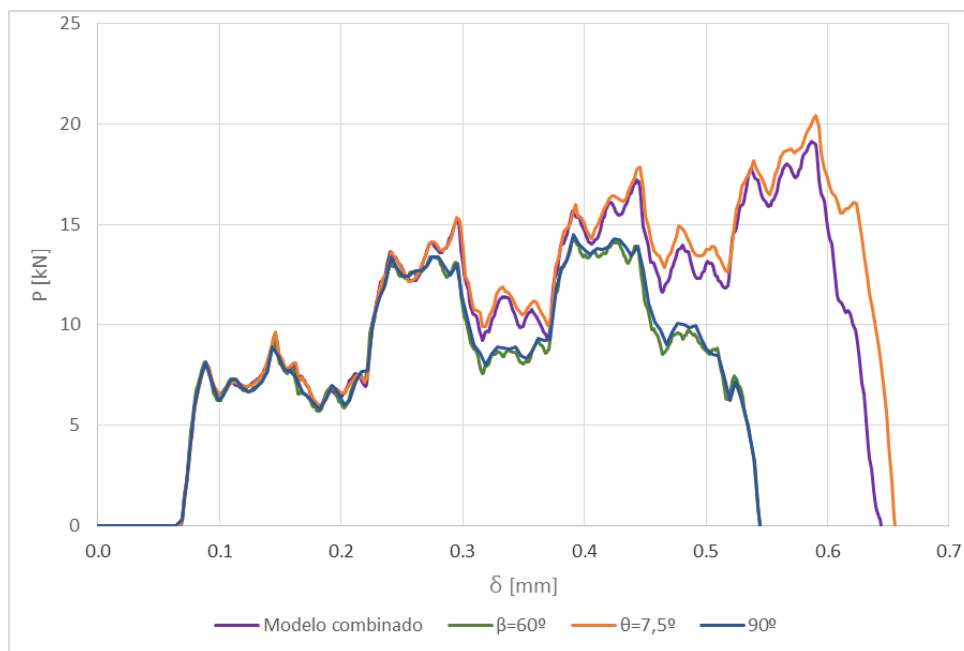


Figura 145. Curva  $P-\delta$  para a configuração DP8005+AV138 otimizada

Na Tabela 48 pode-se ver com maior detalhe os valores máximos obtidos para a carga e o deslocamento.

Tabela 48. Comparação de resultados para a combinação DP8005+AV138

Modelo	$P_{\max}$ [kN]	Diferença	$\delta_{\max}$ [mm]	Diferença
90°	14,51	-	0,545	-
$\beta=60^\circ$	14,26	-1,7%	0,545	0%
$\theta=7,5^\circ$	20,43	+40,8%	0,657	+20,6%
Combinado	19,12	+31,8%	0,644	+18,2%

A energia absorvida pelo modelo combinado fica abaixo do modelo com filete de adesivo devido aos seus valores de carga e deslocamento máximos inferiores, conforme é apresentado na Tabela 49.

Tabela 49. Comparação energia absorvida obtida para a combinação DP8005+AV138

$\alpha$ [°]	E [J]	Diferença
90°	4,47	-
$\beta=60^\circ$	4,41	-1,3%
$\theta=7,5^\circ$	7,14	+59,7%
Combinado	6,61	+47,9%

### 3.2.5.2 RTV106+AV138

Foram obtidos os melhores resultados singulares nos modelos com  $\beta=30^\circ$  e  $\theta=60^\circ$ . Na Figura 146 é apresentado o modelo combinado para esta combinação de adesivos, onde é possível visualizar as várias secções e materiais atribuídos. A secção correspondente ao adesivo rígido está representada a azul, a vermelho estão representadas as secções do adesivo flexível, a verde estão representadas as secções dos aderentes e a branco, secção correspondente ao filete de adesivo e ao chanfro interior cujo material atribuído contempla as propriedades elásticas do adesivo flexível. A malha aplicada a este modelo é apresentada na Figura 147. A atribuição de materiais e os parâmetros de malha seguiram o mesmo critério utilizado nas alterações geométricas anteriores (capítulos 3.2.4.2 e 3.2.4.3). Os números de elementos gerados são apresentados na Tabela 50.



Figura 146. Modelo combinado para os adesivos RTV106+AV138

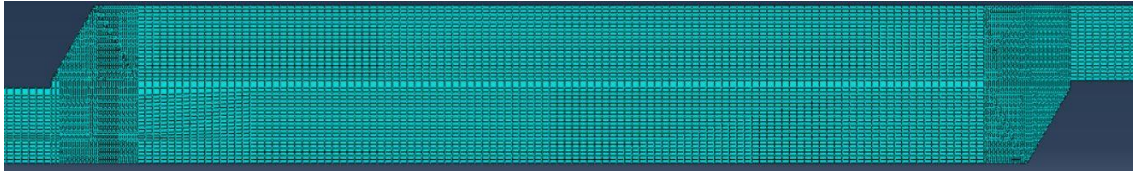


Figura 147. Malha do modelo combinado para os adesivos RTV106+AV138

Tabela 50. Número de elementos para o modelo combinado para os RTV106+AV138

Tipo elementos	Nº elementos
CPE4R	27466
COH2D4	191
CPE3	362
<b>Total</b>	<b>28019</b>

### 3.2.5.2.1 Distribuições de tensões

Na Figura 148 é apresentada a comparação das distribuições de tensões entre o modelo combinado e os modelos singulares para a combinação de adesivos RTV106+AV138. Esta combinação de adesivos mostrou ao longo deste trabalho que as alterações geométricas têm pouco impacto na resistência da mesma, derivado das fracas propriedades do adesivo RTV106. Tal como nos casos anteriores, no modelo combinado não são visíveis diferenças significativas na sua distribuição de tensões de corte quando comparada com os restantes modelos.

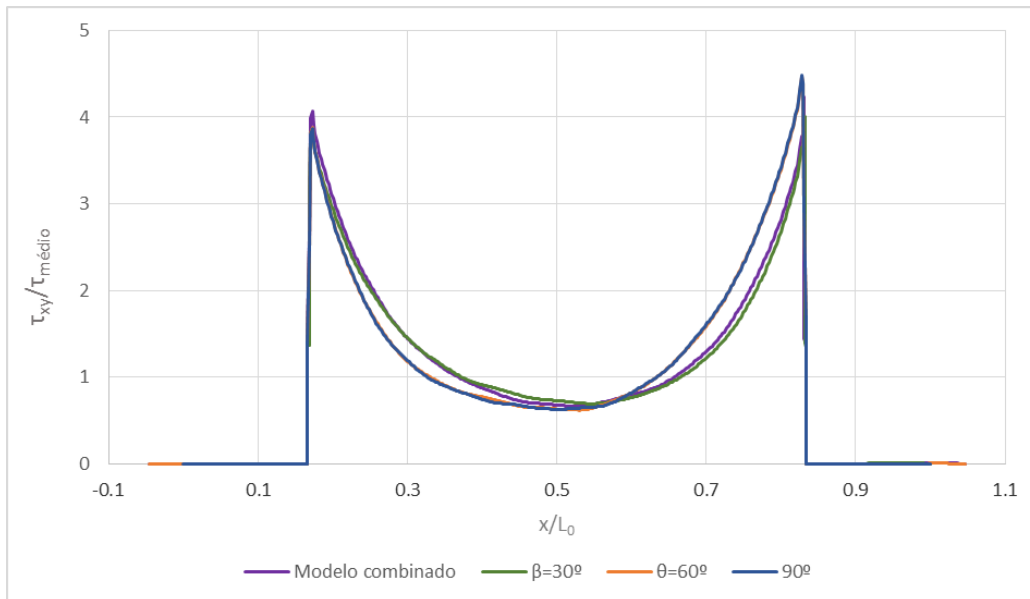


Figura 148. Distribuição de tensões de corte para a combinação RTV106+AV138

As tensões de arrancamento são apresentadas na Figura 149. As várias curvas seguem a mesma trajetória existindo pequenas diferenças nos seus valores de tensão. Existe um pico de tensão na fronteira entre adesivos do lado direito que é maior no modelo combinado, no entanto, na fronteira oposta, são os modelos com filete de adesivo e sem alterações geométricas que apresentam o maior valor.

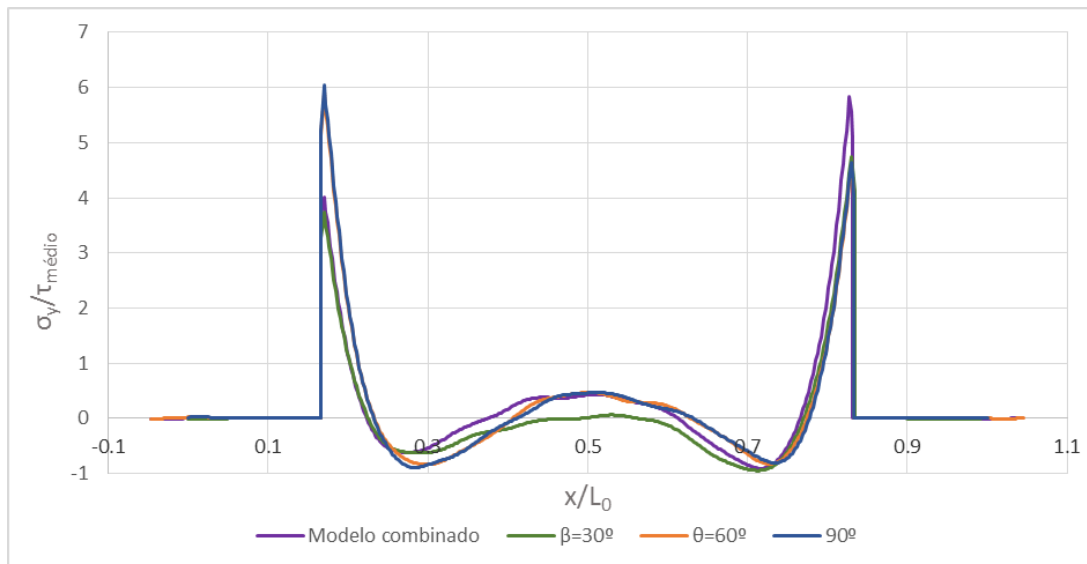


Figura 149. Distribuição de tensões de arrancamento para a combinação RTV106+AV138

### 3.2.5.2.2 Resistência das juntas

Tal como foi enunciado na apresentação das curvas de distribuição de tensões, as curvas P- $\delta$  não apresentam diferenças significativas entre os vários modelos para os valores de carga e deslocamento (Figura 150).

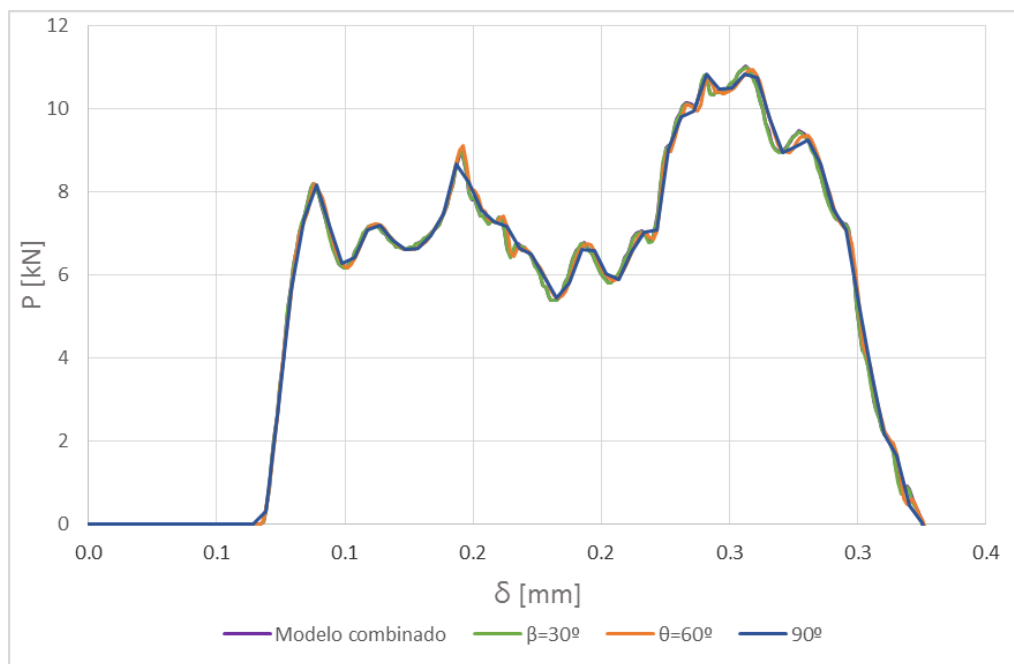


Figura 150. Curvas P- $\delta$  para a configuração RTV106+AV138

Na Tabela 51 são apresentados os valores máximos obtidos para a carga e o deslocamento. Como referido anteriormente, as diferenças são reduzidas, no entanto, todos os modelos apresentam maior valor de carga máxima que o modelo sem qualquer alteração geométrica ( $90^\circ$ ), no entanto o deslocamento máximo é inferior. Ao contrário da combinação DP8005+AV138 no qual os melhores resultados foram obtidos no modelo com filete de adesivo, para esta combinação obteve-se melhores resultados no modelo com chanfro interior sendo mais uma vez, o modelo combinado o que apresenta os segundos melhores resultados.

Tabela 51. Comparação de resultados para os adesivos RTV106+AV138

Modelo	$P_{\max}$ [kN]	Diferença	$\delta_{\max}$ [mm]	Diferença
$90^\circ$	10,84	-	0,330	-
$\beta=30^\circ$	11,20	+3,3%	0,324	-1,8%
$\theta=60^\circ$	10,93	+0,8%	0,327	-0,9%
Combinado	11	+1,5%	0,326	-1,2%

Na Tabela 52 são apresentados os valores de energia absorvida onde se obtiveram diferenças nulas com a exceção do modelo com chanfro interior.

Tabela 52. Comparação energia absorvida obtida para os adesivos RTV106+AV138

$\alpha$ [°]	E [J]	Diferença
90°	1,79	-
$\beta=30^\circ$	1,77	-1,1%
$\theta=60^\circ$	1,79	0%
Combinado	1,79	0%

### 3.2.5.3 DP8005+XNR6852E-2

Para a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2, as melhores prestações foram obtidas tal como na combinação DP8005+AV138 nos modelos singulares com  $\beta=60^\circ$  e  $\theta=7,5^\circ$ . Desta forma a única diferença será a atribuição dos materiais pois a geometria e a malha do modelo são as mesmas tal como é apresentado na Figura 151, Figura 152 e Tabela 53.

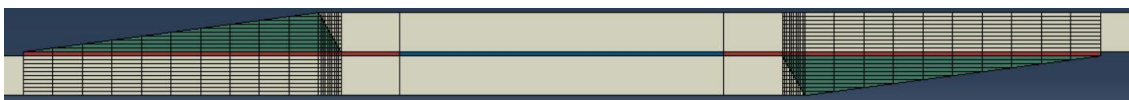


Figura 151. Modelo combinado para os adesivos DP8005+XNR6852E-2

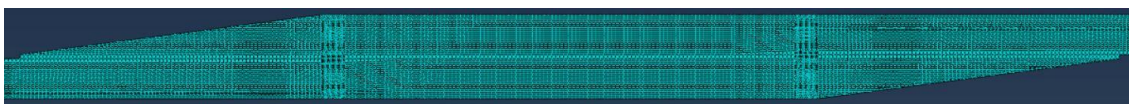


Figura 152. Malha do modelo combinado para os adesivos DP8005+XNR6852E-2

Tabela 53. Número de elementos para o modelo combinado para os adesivos DP8005+XNR6852E-2

Tipo elementos	Nº elementos
CPE4R	28190
COH2D4	313
CPE3	840
Total	29343

### 3.2.5.3.1 Distribuições de tensões

Na Figura 153 é apresentada a comparação das distribuições de tensões de corte entre o modelo combinado e os modelos singulares. O modelo combinado, segue uma distribuição semelhante à do modelo com filete de adesivo, mas o pico de tensão desloca-se das fronteiras da junta adesiva para os limites do chanfro interior com valores de pico mais reduzidos.

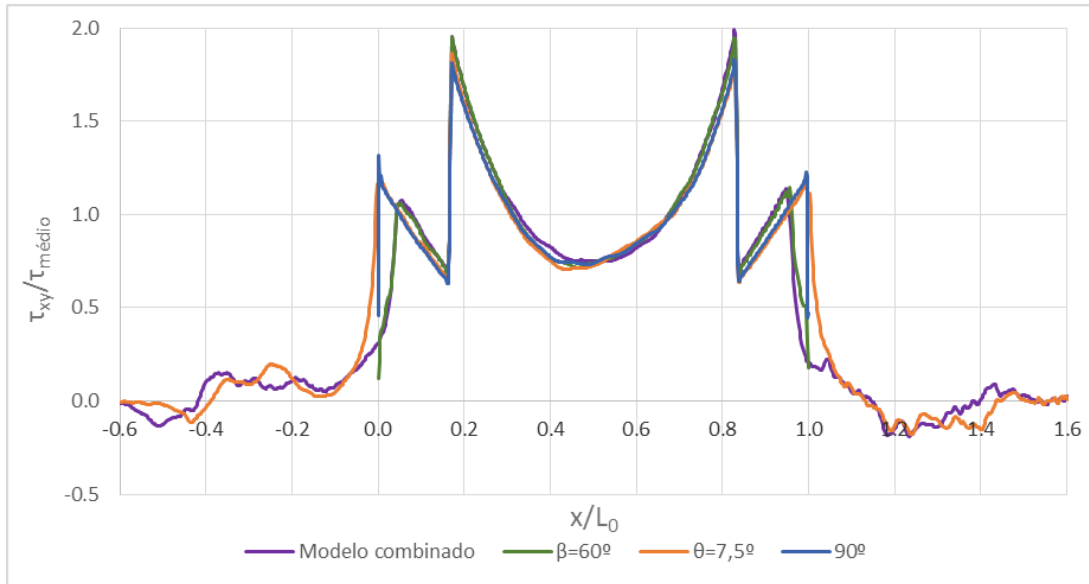


Figura 153. Distribuição de tensões de corte para os adesivos DP8005+XNR6852E-2

As distribuições de tensão de arrancamento são apresentadas na Figura 154. Os valores de pico coincidem com a localização dos limites do chanfro interior, mas de valor inferior.

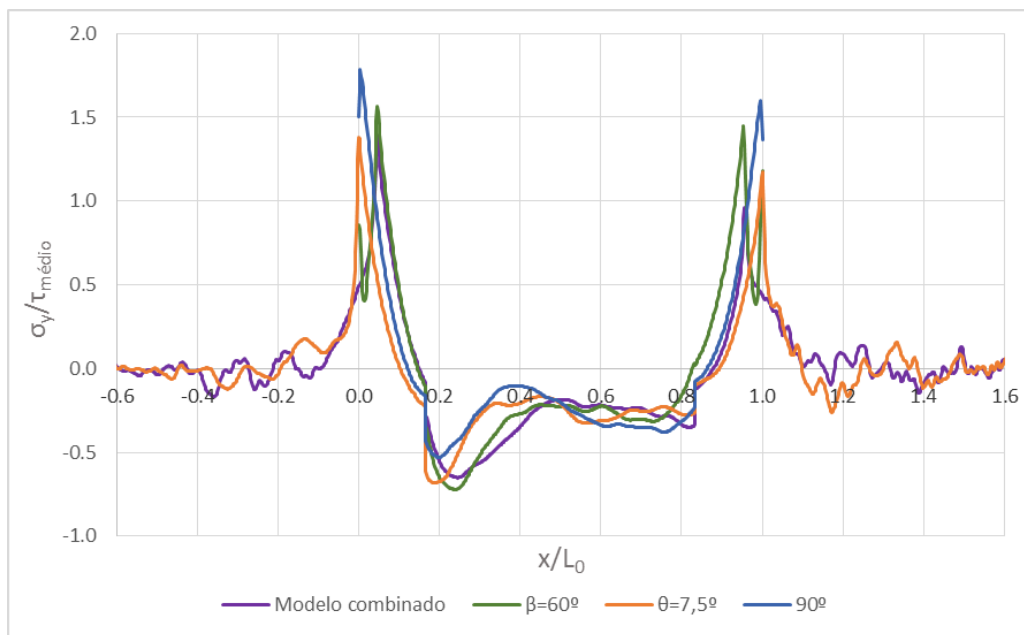


Figura 154. Distribuição de tensões de arrancamento para os adesivos DP8005+XNR6852E-2

### 3.2.5.3.2 Resistência das juntas

A comparação das distribuições de tensões de corte para os vários modelos é apresentada na Figura 155.

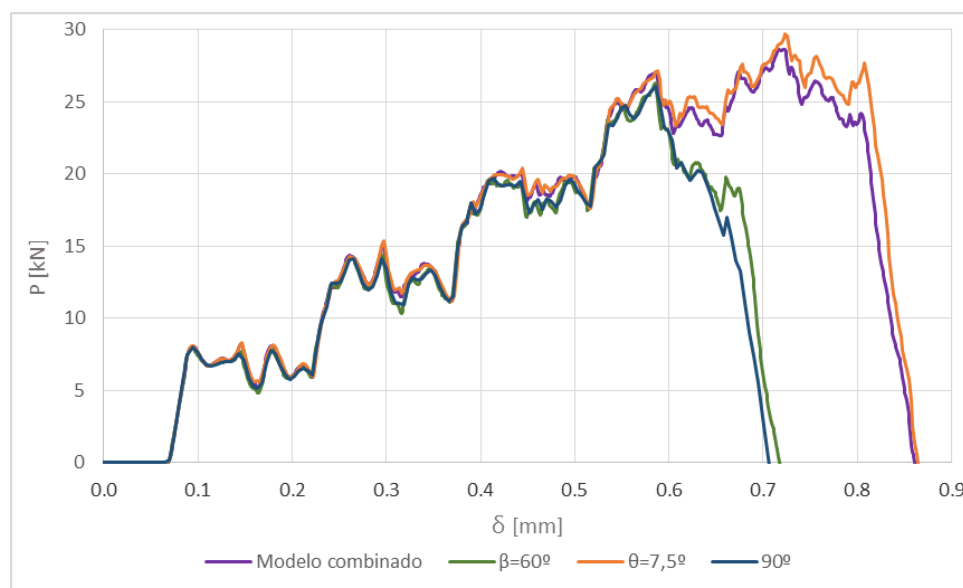


Figura 155. Curvas P- $\delta$  para a os adesivos DP8005+XNR6852E-2

Verifica-se a tendência obtida na comparação de resultados do modelo combinado para a combinação de adesivos DP8005+AV138 onde é possível ver que o modelo com chanfro interior apresenta resultados semelhantes ao modelo sem qualquer alteração geométrica ( $90^\circ$ ) e que o modelo com filete de adesivo apresenta resultados semelhantes ao modelo combinado. Mais uma vez, o modelo com filete de adesivo apresenta o melhor desempenho.

Na Tabela 54 são apresentados com maior pormenor os valores de carga e deslocamento máximo para os vários modelos. A configuração com filete de adesivo tem um desempenho superior em termos de carga máxima comparativamente com o modelo combinado em 3,4% e um deslocamento máximo superior em 0,5%.

Tabela 54. Comparação de resultados com a junta otimizada para a combinação DP8005+XNR6852E-2

Modelo	$P_{\max}$ [kN]	Diferença	$\delta_{\max}$	Diferença
$90^\circ$	26,05	-	0,708	-
$\beta=60^\circ$	26,31	+1,0%	0,718	+1,4%
$\theta=7,5^\circ$	29,68	+13,9%	0,865	+22,2%
Combinado	28,66	+10,0%	0,861	+21,6%

A energia absorvida pelos vários modelos é apresentada na Tabela 55 destacando-se os modelos com filete de adesivo e o otimizado, sendo o melhor desempenho obtido para o modelo com filete de adesivo.

Tabela 55. Comparação energia absorvida obtida para a combinação DP8005+XNR6852E-2

$\alpha$ [°]	E [J]	Diferença
90°	8,99	-
$\beta=60^\circ$	9,23	+2,7%
$\theta=7,5^\circ$	13,89	+54,5%
Combinado	13,42	+49,3%



# CONCLUSÕES



## 4 CONCLUSÕES

O modelo numérico criado no *software* ABAQUS® foi inicialmente validado com resultados obtidos experimentalmente no trabalho de Silva [90]. Esta validação ocorreu para duas combinações de adesivos, DP8005+AV138 e RTV106+AV138. Foi possível concluir que a extrapolação de propriedades do adesivo AV138 para uma velocidade de 105000 mm/min não é uma forma adequada para obtenção das mesmas. Com o ajuste dessas propriedades foi possível obter resultados numéricos muito próximos dos experimentais.

Para o estudo numérico foi adicionada a combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2. Este estudo teve início com a análise da variação do comprimento de sobreposição, no qual se obtiveram resultados de acordo com o esperado, ou seja, aumento da resistência com o aumento deste parâmetro. Ao nível das tensões de corte, é possível verificar que estas aumentam com o aumento de  $L_0$ . No entanto, para as tensões de arrancamento não é visível uma tendência clara. Ao nível da resistência da junta, esta aumenta com o aumento de  $L_0$ , e o mesmo se verifica para o deslocamento até à rotura. A combinação de adesivos DP8005+XNR6852E-2 é a que mais beneficia com o aumento deste parâmetro. Fazendo uma comparação de resultados obtidos entre as JMSS deste trabalho e as JSS do trabalho de Valente [112], é possível verificar que, para a combinação DP8005+AV138, a resistência da junta mista é superior à junta utilizando apenas o adesivo AV138, no entanto é inferior à junta que utiliza apenas o adesivo DP8005. Para a combinação DP8005+XNR6852E-2 obtiveram-se resultados superiores aos obtidos nas juntas utilizando os adesivos separadamente, o que mostra que as juntas mistas são uma boa solução.

Os resultados obtidos com a variação da espessura dos aderentes mostram que, para as várias combinações de adesivos, as tensões de corte e arrancamento tendem a aumentar com a diminuição da espessura. Existe um aumento de resistência das juntas com o aumento da espessura, mas que não é tao expressivo como o aumento que se verifica na variação do comprimento de sobreposição. O deslocamento máximo tem uma tendência inversa, isto é, com o aumento da espessura as juntas tornam-se mais rígidas e menos elásticas, chegando à rotura com valores de deslocamento inferiores. Contrariamente ao que se verifica com o aumento de  $L_0$ , o aumento de  $e$  torna as juntas menos capazes de absorver energia devido ao aumento da rigidez das mesmas.

A introdução de chanfros exteriores nos aderentes resulta numa diminuição dos valores de pico das tensões. Para a junta DP8005+AV138, obtêm-se os melhores resultados nas tensões de corte para os aderentes com chanfro de 45°, enquanto ao arrancamento têm-se menores valores no chanfro de 7,5°. Para as outras duas combinações, obtêm-

se os melhores resultados nos modelos com os chanfros de 7,5° e 15°. Ao nível da resistência, esta aumenta com a diminuição do ângulo dos chanfros, mas com diferenças pequenas. Para a junta com DP8005+AV138 verifica-se um aumento de resistência de 3%, para a junta RTV106+AV138 verifica-se um aumento de 4% e para a junta com DP8005+XNR6852E-2 verifica-se um aumento de resistência de 7%, quando comparadas as juntas com 7,5° e sem chanfro (90°).

O chanfro interior aplicado aos aderentes traz em alguns casos um deslocamento da posição dos picos de tensão, que passam da fronteira entre os adesivos para o limite dos chanfros interiores. Nas combinações DP8005+AV138 e DP8005+XNR6852E-2, verifica-se uma redução de tensões com a redução do ângulo do chanfro interior, sendo os melhores resultados obtidos para o modelo com 7,5°. Apenas nas tensões de arrancamento para a combinação DP8005+AV138 os melhores resultados foram obtidos para o modelo de 45°. A combinação RTV106+AV138 mostrou mais uma vez que não é uma boa combinação, e não foi possível simular os modelos de 7,5° e 15° devido às fracas propriedades do adesivo RTV106.

A introdução de filetes de adesivo melhora a distribuição de tensões de corte e arrancamento e ao mesmo tempo, aumenta a resistência e o deslocamento máximo das juntas até à rutura com a exceção da combinação RTV106+AV138 que não se verificam quaisquer diferenças com a introdução desta alteração geométrica.

Com estes resultados, foram construídas novas juntas com configurações teoricamente ótimas, combinando as alterações geométricas consideradas anteriormente. Estes modelos mantiveram o comprimento de sobreposição (25 mm) e a espessura dos aderentes (2 mm) constantes. Como o chanfro exterior não pode ser executado em simultâneo com o chanfro interior e com o filete de adesivo, foi excluído. Desta forma, a configuração de junta teoricamente ótima foi construída considerando os melhores resultados do chanfro interior e do filete adesivo para cada combinação singular. Esta combinação de alterações não trouxe os valores esperados pois a resistência das juntas nas várias combinações de adesivos foi sempre inferior a pelo menos uma das combinações singulares.

Como sugestão para trabalhos futuros sugere-se o estudo experimental da combinação de adesivos DP8005+AV138, pois é uma combinação que apresenta problemas devido aos adesivos se misturarem. Também é sugerida a determinação de propriedades dos adesivos ao impacto numa gama de velocidades de ensaio mais alargada pois, conforme se concluiu neste trabalho com os resultados obtidos, a extrapolação linear das propriedades não é um método muito fiável.

# REFERÊNCIAS



## 5 REFERÊNCIAS

1. Landrock, A.H. and S. Ebnesajjad, *Adhesives technology handbook*. 2008: William Andrew.
2. Mendoza, O. *Construções em argila*. 2000; Available from: [https://www.google.pt/search?q=constru%C3%A7%C3%B5es+em+argila&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKewitq82oxKDXAhVBGxQKHfWZBY4Q\\_AUI\\_CigB&biw=1536&bih=735#imgrc=sPWorqZxGk6lZM:](https://www.google.pt/search?q=constru%C3%A7%C3%B5es+em+argila&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKewitq82oxKDXAhVBGxQKHfWZBY4Q_AUI_CigB&biw=1536&bih=735#imgrc=sPWorqZxGk6lZM:).
3. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000: McGraw-Hill.
4. Da Silva, L.F., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011: Springer Science & Business Media.
5. Kinloch, A., *Adhesion and adhesives: science and technology*. 2012: Springer Science & Business Media.
6. Löbel, T., et al., *A hybrid bondline concept for bonded composite joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2016. **68**: p. 229-238.
7. Hale, J., *787-from the ground up*. Aero Magazine, 2006. **4**: p. 17-24.
8. Markatos, D., et al., *The effects of manufacturing-induced and in-service related bonding quality reduction on the mode-I fracture toughness of composite bonded joints for aeronautical use*. Composites Part B: Engineering, 2013. **45**(1): p. 556-564.
9. Uratex. Available from: <http://www.uratex.com.ph/industrial-institutional/blog/application-polyurethane-foam-automotive-industry>.
10. Arma. Available from: [https://www.google.pt/search?biw=1536&bih=730&tbn=isch&sa=1&ei=dyKYW5XkL-7orgT1hY7oDQ&q=+colete+%C3%A0+prova+de+bala&oq=+colete+%C3%A0+prova+de+bala&gs\\_l=img.3..0j0i30k1j0i5i30k1l2j0i24k1l2.191314.191314.0.192087.1.1.0.0.0.190.190.0j1.1.0...0...1c.1.64.img..0.1.190...0.snrQUlqdl3A#imgrc=90Ny8zdFO-OIFM:](https://www.google.pt/search?biw=1536&bih=730&tbn=isch&sa=1&ei=dyKYW5XkL-7orgT1hY7oDQ&q=+colete+%C3%A0+prova+de+bala&oq=+colete+%C3%A0+prova+de+bala&gs_l=img.3..0j0i30k1j0i5i30k1l2j0i24k1l2.191314.191314.0.192087.1.1.0.0.0.190.190.0j1.1.0...0...1c.1.64.img..0.1.190...0.snrQUlqdl3A#imgrc=90Ny8zdFO-OIFM:).
11. Adams, R. and J. Comyn, *Joining using adhesives*. Assembly Automation, 2000. **20**(2): p. 109-117.
12. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhaes, and M.F.S. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007: Publindústria.
13. Fernandes, T.A.B., *Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas*. 2014.
14. Raphael, C. *Variable-adhesive bonded joints*. in *Appl. Polym. Symp.* 1966.
15. Pires, I., et al., *Performance of bi-adhesive bonded aluminium lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2003. **23**(3): p. 215-223.
16. Fitton, M. and J. Broughton, *Variable modulus adhesives: an approach to optimised joint performance*. International journal of adhesion and adhesives, 2005. **25**(4): p. 329-336.

17. das Neves, P.J., L.F. da Silva, and R. Adams, *Analysis of mixed adhesive bonded joints part I: theoretical formulation*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2009. **23**(1): p. 1-34.
18. da Silva, L.F. and M.J.C. Lopes, *Joint strength optimization by the mixed-adhesive technique*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(5): p. 509-514.
19. Thamm, F., *Stress distribution in lap joints with partially thinned adherends*. The Journal of Adhesion, 1976. **7**(4): p. 301-309.
20. Semerdjiev, S., *Metal to metal adhesive bonding, 1970*. London, Business Books.
21. Srinivas, S., *NASA technical note*. NASA TN D-7855, 1975.
22. Patrick, R.L., *Treatise on Adhesion and Adhesives: Structural Adhesives with Emphasis on Aerospace Applications*. 1976: Dekker.
23. Temiz, Ş., *Application of bi-adhesive in double-strap joints subjected to bending moment*. Journal of adhesion science and technology, 2006. **20**(14): p. 1547-1560.
24. Bouiadjra, B.B., et al., *Fracture energy for repaired cracks with bonded composite patch having two adhesive bands in aircraft structures*. Computational materials science, 2007. **40**(1): p. 20-26.
25. Da Silva, L.F. and R. Adams, *Joint strength predictions for adhesive joints to be used over a wide temperature range*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007. **27**(5): p. 362-379.
26. Da Silva, L.F. and R. Adams, *Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007. **27**(3): p. 216-226.
27. Dean, G., et al., *Comparison of bulk and joint specimen tests for determining the shear properties of adhesives*. Rapport technique CMMT (B), 1996. **51**.
28. Adams, R.D., J. Comyn, and W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 1997: Springer Science & Business Media.
29. Hopkinson, B., *A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, 1914. **213**: p. 437-456.
30. Gray, G., *Classic split Hopkinson pressure bar technique ASM V8 mechanical testing*. Materials Park, Ohio: ASM International, 1999: p. 17-20.
31. Volkersen, O., *Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. Luftfahrtforschung, 1938. **15**: p. 41-47.
32. Adams, R.D. and N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. Journal of Strain Analysis, 1974. **9**(3): p. 185-196.
33. Harris, J. and R. 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.
34. Sosa, J.C. and N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology, 2012. **72**(7): p. 788-791.
35. Goland, M. and E. Reissner, *The stresses in cemented joints*. Journal of Applied Mechanics, 1944. **66**: p. 17-27.

36. Panigrahi, S. and 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.
37. U., H.-S., *Stress analysis: a continuum mechanics approach In: Developments in Adhesives*. 1973.
38. Penado, F.E., *A simplified method for the geometrically nonlinear analysis of the single lap joint*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 1998. **11**(3): p. 272-287.
39. Williams, M., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the seismological society of America, 1959. **49**(2): p. 199-204.
40. Fernlund, G. and J. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints: Part 2: Experimental study*. International journal of adhesion and adhesives, 1991. **11**(4): p. 213-227.
41. 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.
42. Feraren, P. and H.M. Jensen, *Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. **71**(15): p. 2125-2142.
43. Ji, G., et al., *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47**(18): p. 2445-2458.
44. Yang, Q. and M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.
45. Khoramishad, H., et al., *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
46. Daudeville, L. and P. Ladeveze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
47. Voyiadjis, G.Z. and P.I. Kattan, *Damage mechanics*. 2005: CRC Press.
48. Shenoy, V., et al., *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.
49. Mohammadi, S., *Extended finite element method: for fracture analysis of structures*. 2008: John Wiley & Sons.
50. Belytschko, T. and T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International journal for numerical methods in engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
51. Dolbow, J. and T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International journal for numerical methods in engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
52. Sato, C., *Design for Impact Loads*, in *Handbook of Adhesion Technology*. 2011, Springer. p. 743-763.

53. Sato, C.a. and K. Ikegami, *Dynamic deformation of lap joints and scarf joints under impact loads*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2000. **20**(1): p. 17-25.
54. Khan, A.S., O. Lopez-Pamies, and R. Kazmi, *Thermo-mechanical large deformation response and constitutive modeling of viscoelastic polymers over a wide range of strain rates and temperatures*. International Journal of Plasticity, 2006. **22**(4): p. 581-601.
55. Iwamoto, T., T. Nagai, and T. Sawa, *Experimental and computational investigations on strain rate sensitivity and deformation behavior of bulk materials made of epoxy resin structural adhesive*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47**(2): p. 175-185.
56. Cowper, G.R. and P.S. Symonds, *Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams*. 1957, Brown Univ Providence Ri.
57. Ludwik, P., *Elemente der technologischen Mechanik*. 2013: Springer-Verlag.
58. Goglio, L., et al., *High strain-rate compression and tension behaviour of an epoxy bi-component adhesive*. International journal of adhesion and adhesives, 2008. **28**(7): p. 329-339.
59. Johnson, G.R. and W.H. Cook, *Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures*. Engineering fracture mechanics, 1985. **21**(1): p. 31-48.
60. Morin, D., et al., *Identification of a new failure criterion for toughened epoxy adhesive*. Engineering fracture mechanics, 2010. **77**(17): p. 3481-3500.
61. Kitagawa, M., T. Mori, and T. Matsutani, *Rate-dependent nonlinear constitutive equation of polypropylene*. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 1989. **27**(1): p. 85-95.
62. Krempl, E., *Viscoplasticity based on total strain- The modelling of creep with special considerations of initial strain and aging*. ASME, Transactions, Journal of Engineering Materials and Technology, 1979. **101**: p. 380-386.
63. Chiu, W. and R. Jones, *Unified constitutive model for thermoset adhesive, FM73*. International journal of adhesion and adhesives, 1995. **15**(3): p. 131-136.
64. Ramaswamy, V., D. Stouffer, and J. Laflen, *A unified constitutive model for the inelastic uniaxial response of Rene'80 at temperatures between 538C and 982C*. Journal of Engineering Materials and Technology, 1990. **112**(3): p. 280-286.
65. Crocombe, A., *Modelling and predicting the effects of test speed on the strength of joints made with FM73 adhesive*. International journal of adhesion and adhesives, 1995. **15**(1): p. 21-27.
66. Harris, J. and R. Adams, *An assessment of the impact performance of bonded joints for use in high energy absorbing structures*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 1985. **199**(2): p. 121-131.
67. Higuchi, I., T. Sawa, and H. Suga, *Three-dimensional finite element analysis of single-lap adhesive joints under impact loads*. Journal of adhesion science and technology, 2002. **16**(12): p. 1585-1601.
68. Higuchi, I., T. Sawa, and H. Suga, *Three-dimensional finite element analysis of single-lap adhesive joints subjected to impact bending moments*. Journal of adhesion science and technology, 2002. **16**(10): p. 1327-1342.

69. Sawa, T., I. Higuchi, and H. Suga, *Three-dimensional finite element stress analysis of single-lap adhesive joints of dissimilar adherends subjected to impact tensile loads*. Journal of adhesion science and technology, 2003. **17**(16): p. 2157-2174.
70. Challita, G. and R. Othman, *Finite-element analysis of SHPB tests on double-lap adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(4): p. 236-244.
71. Hazimeh, R., et al., *Finite element analysis of adhesively bonded composite joints subjected to impact loadings*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2015. **56**: p. 24-31.
72. Duncan, B. and A. Pearce, *Comparison of impact and high rate tests for determining properties of adhesives and polymers needed for design under impact loading*. 1999: NPL.
73. Charalambides, M. and G. Dean, *Constitutive models and their data requirements for use in finite element analysis of adhesives under impact loading*. 1997: National Physical Laboratory. Great Britain, Centre for Materials Measurement and Technology.
74. Dean, G.D., et al., *Data requirements for the use of finite element methods to predict the impact performance of plastics*. 1997: National Physical Laboratory.
75. Xia, Y., et al., *Development of high-efficiency modeling technique for weld-bonded steel joints in vehicle structures—Part I: Static experiments and simulations*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(4): p. 414-426.
76. Yang, X., et al., *Modeling of high strength steel joints bonded with toughened adhesive for vehicle crash simulations*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **39**: p. 21-32.
77. Bigwood, D. and A. Crocombe, *Non-linear adhesive bonded joint design analyses*. International journal of adhesion and adhesives, 1990. **10**(1): p. 31-41.
78. Crocombe, A. and R. Adams, *An elasto-plastic investigation of the peel test*. The Journal of Adhesion, 1982. **13**(3-4): p. 241-267.
79. Lee, S.J. and D.G. Lee, *Development of a failure model for the adhesively bonded tubular single lap joint*. The Journal of Adhesion, 1992. **40**(1): p. 1-14.
80. Sheppard, A., D. Kelly, and L. Tong, *A damage zone model for the failure analysis of adhesively bonded joints*. International journal of adhesion and adhesives, 1998. **18**(6): p. 385-400.
81. Dean, G., G. Lord, and B. Duncan. *Comparison of the measured and predicted performance of adhesive joints under impact*. in *NPL Report CMMT (A) 206 APPENDIX 1 FINITE ELEMENT ANALYSIS PERFORATED SINGLE-LAP JOINT NPL Report CMMT (A) 206*. 1999. Citeseer.
82. Zgoul, M. and A. Crocombe, *Numerical modelling of lap joints bonded with a rate-dependent adhesive*. International journal of adhesion and adhesives, 2004. **24**(4): p. 355-366.
83. Cavalli, M. and M. Thouless, *The effect of damage nucleation on the toughness of an adhesive joint*. The Journal of Adhesion, 2001. **76**(1): p. 75-92.
84. Carlberger, T. and U. Stigh, *An explicit FE-model of impact fracture in an adhesive joint*. Engineering fracture mechanics, 2007. **74**(14): p. 2247-2262.

85. Haufe, A., et al. *Modelling of weld and adhesive connections in crashworthiness applications with LS-DYNA*. in *Proceedings of the NAFEMS seminar "simulation of connections and joints in structures"*. Wiesbaden, Germany. 2010.
86. May, M., H. Voß, and S. Hiermaier, *Predictive modeling of damage and failure in adhesively bonded metallic joints using cohesive interface elements*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2014. **49**: p. 7-17.
87. Clarke, M., et al., *Application of the design of experiments procedure to the behaviour of adhesively bonded joints with plastically deformable adherends to enable further understanding of strain rate sensitivity*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2013. **44**: p. 226-231.
88. Avendaño, R., et al., *Impact loading of single lap joints of dissimilar lightweight adherends bonded with a crash-resistant epoxy adhesive*. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2016. **138**(4): p. 041019.
89. Öz, Ö. and H. Özer, *An experimental investigation on the failure loads of the mono and bi-adhesive joints*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2017. **31**(19-20): p. 2251-2270.
90. Silva, M.R.G., *Impact of mixed adhesive joints for the automotive industry*. 2015.
91. Alfano, G. and M. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*. **50**: p. 1701-1736.
92. Allix, O. and A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. *International Journal of Fracture*, 1996. **77**: p. 111-140.
93. Chandra, N., et al., *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. *International Journal of Solids and Structures*, 2002. **39**: p. 2827-2855.
94. Chen, J., *Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and by decohesion models*. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2002. **15**: p. 429-441.
95. Kafkalidis, M.S. and 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**: p. 4367-4383.
96. Liljedahl, C.D.M., et al., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. *International Journal of Fracture*, 2006. **141**: p. 147-161.
97. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and 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**: p. 1497-1512.
98. Campilho, R.D.S.G., et al., *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2013. **44**: p. 48-56.
99. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2009. **29**: p. 195-205.
100. *Huntsman Araldite AV138/HV998 Technical Data sheet*. 2014; Available from: <http://www.adhesivehelp.com/productdatasheets/huntsman-a2014.pdf>.

101. *Momentive RTV100 Series Technical Data Sheet*. 2012.; Available from: <https://www.momentive.com/en-us/products/tds/rtv100-series/>.
102. *3M Scotch-Weld Structural Plastic Adhesive Technical Data*. 2016.
103. Reedy, E.D., *Strength of butt and sharp-cornered joints*, in *The Mechanics of Adhesion*. 2002, Elsevier New York, NY. p. 145-192.
104. Mata, R.A., *Impact of adhesive joints for the automotive industry at low and high temperatures*. MsC, IDMEC, University of Porto, 2014.
105. from:, D.E.R.S.A.; Available from: <http://nagaseamerica.com/product/denatite-epoxy-resin-series/>.
106. Nunes, S., et al., *Comparative failure assessment of single and double lap joints with varying adhesive systems*. *The Journal of Adhesion*, 2016. **92**(7-9): p. 610-634.
107. Reis, P., F. Antunes, and J. Ferreira, *Influence of superposition length on mechanical resistance of single-lap adhesive joints*. *Composite structures*, 2005. **67**(1): p. 125-133.
108. Campilho, R.D., M. De Moura, and J. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. *Composites Science and Technology*, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
109. Team, R.C., *R: A language and environment for statistical computing*. 2013.
110. Studio, R., *RStudio: integrated development environment for R*. RStudio Inc, Boston, Massachusetts, 2012: p. 74.
111. Belingardi, G., L. Goglio, and A. Tarditi, *Investigating the effect of spew and chamfer size on the stresses in metal/plastics adhesive joints*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2002. **22**(4): p. 273-282.
112. Valente, J.P.A., *Estudo de Alterações Geométricas em Juntas Adesivas Solicitadas ao Impacto*. 2017.