



Estudo de esforços em pontos de fixação de componentes poliméricos para a indústria automóvel

RAFAEL JOSÉ OLIVEIRA SIMÕES

outubro de 2022

ESTUDO DE ESFORÇOS EM PONTOS DE FIXAÇÃO DE COMPONENTES POLIMÉRICOS PARA A INDÚSTRIA AUTOMÓVEL

Rafael José Oliveira Simões

1200225

2021/2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



ESTUDO DE ESFORÇOS EM PONTOS DE FIXAÇÃO DE COMPONENTES POLIMÉRICOS PARA A INDÚSTRIA AUTOMÓVEL

Rafael José Oliveira Simões

1200225

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.

2021/2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutora Elza Maria Morais Fonseca

Professor Coordenador, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

Doutor Isidro de Jesús Sánchez-Arce

Investigador Integrado, INEGI

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, à minha avó Irene, ao meu avô Fernando, à minha madrinha Cristina, ao meu tio Artur e aos meus primos Gonçalo e Miguel por todo o suporte ao longo deste percurso.

Ao meu orientador no ISEP Doutor Raul Campilho e a todas as pessoas da Simoldes que contribuíram para a conclusão desta dissertação, em especial aos engenheiros Vítor, Fernando e Jean.

PALAVRAS-CHAVE

Snap-fits, *Clips*, Componentes poliméricos, Indústria Automóvel, Método dos elementos finitos, Correlações, Ensaio físicos.

RESUMO

A incorporação de materiais poliméricos em componentes da estrutura automóvel, com o decorrer dos anos, tem vindo a desempenhar um papel primordial no setor automóvel, permitindo a produção de veículos mais eficientes e ecológicos. De entre muitas opções para a fixação destes componentes, encontram-se os *clips* e os *snap-fits*, que não só facilitam a montagem e desmontagem, como também contribuem para a redução da massa total do automóvel.

A presente dissertação de mestrado foi desenvolvida em âmbito industrial, na empresa Simoldes Plásticos, e surge da necessidade de haver um controlo mais rigoroso a envolver algumas fixações normalizadas internas, incorporadas nos componentes desenvolvidos pela Simoldes, a fim de cumprir com as especificações dos clientes. Numa fase inicial, e após a seleção das fixações normalizadas a serem alvo de estudo, realizaram-se ensaios experimentais segundo as direções que os cadernos de encargos das marcas automóveis estipulam para a resistência das fixações a serem incorporadas nos seus componentes. Com recurso ao Método de Elementos Finitos (MEF), efetuaram-se simulações numéricas no *software* Abaqus®, onde se replicaram as condições dos ensaios físicos a fim de correlacionar ambos os testes. Numa fase final, tendo em conta a diferença relativa dos resultados numéricos em relação aos resultados reais, procedeu-se à respetiva validação geométrica, realizando modificações nas zonas que se identificaram como críticas, nos casos em que os resultados obtidos das simulações assim o dizem.

Com a elaboração do presente trabalho foi possível estudar diferentes abordagens de cálculo numérico e perceber qual delas se adequa melhor ao problema em questão, entre as quais a utilização de elementos de casca para fazer a aproximação dos modelos de ensaio ou a utilização de elementos sólidos tetraédricos, realização de simulações estáticas ou dinâmicas e perceber qual aquela que fornece melhores resultados, e ainda estudar o influência que o *mass scaling* possui nas análises dinâmicas realizadas. A partir do trabalho realizado foi possível validar a geometria das fixações de estudo.

KEYWORDS

Snap-fits, Clips, Polymeric components, Automotive Industry, Finite element method, Correlations, Physical tests.

ABSTRACT

The incorporation of polymeric materials in car structure components, over the years, has been playing a key role in the automotive sector, enabling the production of more efficient and ecological vehicles. Among the many options for fixing these components, there are clips and snap-fits, which not only facilitate assembly and disassembly, but also contribute to reduce the total mass of the car.

This master's dissertation was developed in an industrial environment, at the company Simoldes Plastics, and arises from the need for a more rigorous control involving some internal standardized fixings, incorporated in the components developed by Simoldes, to comply with customer specifications. In an initial phase, and after the selection of the standardized fastenings to be studied, experimental tests were carried out according to the directions that the specifications of the automotive brands stipulate for the strength of the fastenings to be incorporated into their components. Using the Finite Element Method (FEM), numerical simulations were performed in the Abaqus® software, where the conditions of the physical tests were replicated to correlate both tests. In a final phase, considering the relative difference of the numerical results in relation to the real results, the respective geometric validation was carried out, making changes in the areas that were identified as critical, in cases where the results obtained from the simulations so dictate.

With the elaboration of the present work, it was possible to study different approaches to numerical calculation and to understand which one is best suited to the problem in question, including the use of shell elements to approximate the test models or the use of tetrahedral solid elements, performing static or dynamic simulations and realizing which one provides better results, and also studying the influence that mass scaling has on the dynamic analyzes performed. From the work carried out, it was possible to validate the geometry of the study fixtures.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

ASA	<i>Acrilonitrile styrene acrylate</i>
ABS	<i>Acrylonitrile butadiene styrene</i>
AFIA	Associação de Fabricantes para a Indústria Automóvel
CPU	<i>Central process unit</i>
CAD	<i>Computer aided design</i>
CAE	<i>Computer aided engineering</i>
DFA	<i>Design for assembly</i>
2D	Duas dimensões
EUA	Estados Unidos da América
MEF	Método dos elementos finitos
NA	Não aplicável
OICA	<i>Organisation Internationale des Constructers d'Automobiles</i>
PE	<i>Plastic strain</i>
PA	Poliamida
PA 6	Poliamida 6
PC	Policarbonato
PEI	Polieterimida
PEBD	Polietileno de baixa densidade
PMMA	Polimetilmetacrilato

POF	Poliolefinas
PP	Polipropileno
PET	Politereftalato de etileno
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i>
PIB	Produto interno bruto
TPO	<i>Thermoplastic polyolefin</i>
3D	Três dimensões
UV	Ultravioleta
UE	União Europeia

Lista de Unidades

daN	Decanewton
°	Graus
°C	Graus Celcius
h	Horas
MPa	Mega Pascal
mm	Milímetro
mm/mm	Milímetro por milímetro
mm/min	Milímetros por minuto
N	Newton
N/mm	Newton por milímetro
N/mm ²	Newton por milímetro ao quadrado
%	Porcentagem

kg	Quilograma
----	------------

s	Segundos
---	----------

Lista de Símbolos

A	Área abrangente da curva nominal do material na rotura
-----	--

A_p	Área projetada
-------	----------------

C_i	Capacidade de injeção
-------	-----------------------

R	Coefficiente de correlação
-----	----------------------------

L	Comprimento característico dos elementos
-----	--

k	Constante relativa à viscosidade do material
-----	--

VS	Contração resultante do processo de injeção
------	---

Ks	Declive da curva da simulação numérica no 1º patamar
------	--

$\bar{\varepsilon}_f^{pl}$	Deformação equivalente no final da rotura
----------------------------	---

$\bar{\varepsilon}_0^{pl}$	Deformação equivalente no início da rotura
----------------------------	--

ε_y	Deformação na cedência do material
-----------------	------------------------------------

$\varepsilon_{nominal}$	Deformação nominal
-------------------------	--------------------

ε_{pl}	Deformação plástica
--------------------	---------------------

ε_{real}	Deformação real
----------------------	-----------------

$\varepsilon_{u,real}$	Deformação última real
------------------------	------------------------

$d\varepsilon$	Derivada da deformação do material
----------------	------------------------------------

$d\bar{\varepsilon}^{pl}$	Derivada da deformação equivalente na rotura
---------------------------	--

$d\bar{u}^{pl}$	Derivada do deslocamento na rotura
-----------------	------------------------------------

dt	Derivada em ordem ao tempo
------	----------------------------

\bar{u}_f^{pl}	Deslocamento equivalente no final da rotura
$x(i)$	Deslocamento para cada instante
$x(f)$	Deslocamento para cada instante com o fator de folga incluído
d_F	Diâmetro de entrada de injeção
d_N	Diâmetro do orifício do bico de injeção
d_S	Diâmetro em direção ao bocal
L_W	Dimensão do contorno da ferramenta
L_F	Dimensões da peça plástica moldada
G_f	Energia de evolução de dano
$S_{máx}$	Espessura da secção transversal do componente moldado
η	Estado triaxial de tensão
F_S	Fator de segurança
F_f	Força de fecho do molde
F_S	Força estabelecida pelo cliente para a resistência das fixações
m	Massa do componente polimérico
F_p	Média das forças dos ensaios físicos no 1º patamar
K_p	Média dos declives das curvas dos ensaios físicos no 1º patamar
E	Módulo de elasticidade longitudinal
N_{cav}	Número de cavidades
P_i	Pressão de injeção
p	Pressão hidrostática
$\dot{\epsilon}(t)$	Taxa de deformação plástica equivalente

σ_y	Tensão axial
σ_{y0}	Tensão de início de rotura
q	Tensão equivalente de Von Mises
σ_{mises}	Tensão equivalente de Von Mises
$\sigma_{nominal}$	Tensão nominal
σ_{xx}	Tensão principal segundo o eixo x
σ_{yy}	Tensão principal segundo o eixo y
σ_{zz}	Tensão principal segundo o eixo z
σ_{real}	Tensão real
$\sigma_{u,real}$	Tensão última real

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Estimativa da quantidade de automóveis produzidos e vendidos no mundo, entre os anos de 2010-2020 (dados retirados de [1]).	9
Figura 2 - Estimativa da quantidade de automóveis produzidos e vendidos em Portugal, entre os anos de 2010-2020 (dados retirados de [1]).	11
Figura 3 – Componentes de cariz polimérico na estrutura de um automóvel (adaptado de [15]).	14
Figura 4 – Princípio de funcionamento do processo de moldação por injeção [28].	17
Figura 5 -Etapas ocorridas durante um ciclo de injeção: a) fecho do molde; b) injeção; c) pressão de compactação; d) plasticização; e) arrefecimento; f) abertura do molde e ejeção; g) tempo morto; h) tempo de ciclo.	17
Figura 6 - Linha de soldadura [36].	19
Figura 7 - Rebarba gerada num produto processado por moldação por injeção.	19
Figura 8 - Chupados ocorridos numa zona de reforço (adaptado de [38]).	20
Figura 9 - Defeito de empenamento a uma escala exagerada.	20
Figura 10 – Molde de duas placas e os seus vários componentes (adaptado de [40]).	20
Figura 11 – Sistema de extração que utiliza pinos ejetores (adaptado de [40]).	21
Figura 12 – Diferentes buchas de injeção de acordo com o tipo de bico de injeção (adaptado de [40]).	21
Figura 13 – Sistemas de alimentação: a) direta; b) submarino (sistema de injeção indireta) (adaptado de [40]).	22
Figura 14 – Sistema de guiamento anti rotação (adaptado de [45]).	22
Figura 15 - Algumas etapas no projeto de moldes.	23
Figura 16 – Entrada de injeção mais simples ([49]).	25
Figura 17 – Evolução da contração do material com o aumento da espessura de parede (adaptado de [52]).	26
Figura 18 - Exemplos de geometrias utilizadas para aumentar a rigidez de componentes plásticos (adaptado de [56]).	27
Figura 19 – Recomendações a seguir na conceção de frisos (adaptado de [55, 57]).	28
Figura 20 - Fator de concentração de tensões <i>versus</i> rácio raio/espessura (adaptado de [55]).	29
Figura 21 – Recomendações para a colocação de raios: a) bom <i>design</i> ; b) muito fino; c) muito espesso (adaptado de [54]).	29

Figura 22 – Ilustração de um ângulo de saída (adaptado de [58]).	29
Figura 23 -Principais técnicas de fixação de componentes poliméricos.	30
Figura 24 – Elementos mecânicos mais utilizados para a fixação do painel de porta à estrutura metálica da porta (adaptado de [21, 65-67]).	31
Figura 25 – Princípio de funcionamento da metodologia <i>snap-fit</i> (adaptado de [71]).	32
Figura 26 – Tipologias mais comuns dos <i>integral snap-fit joints</i> : a) <i>cantilever snap-fit joints</i> ; b) <i>torsion snap-fit joints</i> ; c) <i>annular snap-fit joints</i> (adaptado de [66]).	32
Figura 27 – Imagem esquemática da fixação através da utilização de um <i>clip</i> de uma porção de um revestimento de pilar à estrutura metálica do automóvel (adaptado de [76]).	33
Figura 28 – Discretização de um determinado domínio (adaptado de [96]).	38
Figura 29 – Tipos de elementos de primeira ordem: a) triangular de 3 nós; b) quadrilátero de 4 nós; c) tetraédrico de 4 nós; d) hexaédrico de 8 nós (adaptado de [98]).	39
Figura 30 – Algumas aplicações do MEF no setor automóvel (adaptado de [20, 101-103]).	40
Figura 31 – Logótipo da Simoldes Plásticos [111].	47
Figura 32 – Interior de um veículo comercial do futuro desenvolvido pela Simoldes Plásticos [112].	47
Figura 33 - Linha cronológica das empresas da Simoldes Plásticos.	48
Figura 34 – 1ª fixação normalizada e os seus elementos: a) <i>clip</i> estanque; b) <i>clip</i> não estanque; c) porta agrafa da biblioteca Simoldes.	49
Figura 35 – Painel de porta lateral traseiro desenvolvido para a Renault.	50
Figura 36 - Formato do porta agrafa incorporado no painel de porta traseiro desenvolvido para a Renault.	50
Figura 37 - Redução de espessura referente à 1ª fixação.	51
Figura 38 - Frisos laterais do porta agrafa da 1ª fixação.	51
Figura 39 - Abertura para saída de gases.	52
Figura 40 - Nervuras para retenção do <i>clip</i> .	52
Figura 41 - Dimensão da abertura do porta agrafa da 1ª fixação para entrada do <i>clip</i> .	53
Figura 42 - Sequência de montagem: a) sentido de montagem do <i>clip</i> ; b) <i>clip</i> montado no porta agrafa.	53
Figura 43 - Interferência entre o <i>clip</i> e o porta agrafa.	54
Figura 44 – 2ª fixação normalizada e os seus elementos: a) 1º <i>clip</i> ; b) 2º <i>clip</i> ; c) porta agrafa <i>standard</i> da biblioteca Simoldes.	54

Figura 45 - Soleira desenvolvida para a Renault onde está incorporada a 2ª fixação a ser alvo de estudo.	54
Figura 46 - Rasgo na zona de trás do porta agrafo para guiamento do <i>clip</i>	55
Figura 47 - Frisos laterais de reforço.	55
Figura 48 - Dimensão da abertura do porta agrafo da 2ª fixação para entrada do <i>clip</i>	56
Figura 49 - Redução de espessura do porta agrafo da 2ª fixação.	56
Figura 50 – 3ª fixação normalizada e os seus elementos: a) <i>clip</i> metálico; b) porta agrafo <i>standard</i> da biblioteca Simoldes.	57
Figura 51 - Pilar B onde está inserida a 3ª fixação alvo de estudo.	57
Figura 52 - Porta agrafo incorporado no pilar B da Audi.	58
Figura 53 - Sequência de montagem do <i>clip</i> no porta agrafo: a) face de apoio do <i>clip</i> distinguida a azul no porta agrafo sem o <i>clip</i> ; b) apoio do <i>clip</i> na face de apoio + movimento de inserção do <i>clip</i> ; c) <i>clip</i> inserido + recuperação da forma original do <i>clip</i>	58
Figura 54 - Montagem da chapa na 3ª fixação.	59
Figura 55 - Nervuras de reforço posicionadas na zona superior do porta agrafo.	59
Figura 56 – Redução de espessura referente à 3ª fixação de estudo.	60
Figura 57 - Direções de ensaio ao arrancamento (A) e ao corte (B e C) a serem exercidas na fixação.	61
Figura 58 - Direções de ensaio, segundo o caderno de encargos da Audi, relativamente aos elementos de fixação serem incorporados nos seus componentes.	62
Figura 59 - Posições das fixações para estudo no painel de porta lateral traseiro, desenvolvido para a Renault, em formato CAD.	65
Figura 60 - Marcação em torno das posições arbitradas de estudo para realização da furação: a) em torno das fixações da posição 1 e 2; b) marcações em torno da fixação da posição 3.	65
Figura 61 – Corte e furação de alguns modelos para ensaios físicos: a) modelo da posição 2 para ensaio de arrancamento, segundo a direção A; b); modelo da posição 1 para ensaio de corte, segundo a direção C.	66
Figura 62 - Posições das fixações escolhidas para estudo na soleira, desenvolvida para a Renault, em formato CAD.	66
Figura 63 - Posições arbitradas para estudo no componente real: a) fixação da primeira posição; b) fixação da segunda posição; c) fixação da terceira posição.	66
Figura 64 - Corte e furação de alguns modelos para ensaios físicos: a) modelo da posição 1 para ensaio de corte, segundo a direção B; b); modelo da posição 3 para ensaio de arrancamento, segundo a direção A.	67

Figura 65 - Identificação das posições das fixações para estudo, no modelo CAD do pilar B, desenvolvido para a Audi.....	67
Figura 66 - Posições das fixações arbitradas para estudo no componente real.	68
Figura 67 – Corte, furação e marcação do modelo do pilar b direito para realização de ensaios físicos de corte nas fixações da posição 1 e 2, segundo a direção C.	68
Figura 68 – Formato da ferramenta utilizado nos ensaios físicos que replica a geometria do <i>clip</i> incorporado na 1ª fixação.....	69
Figura 69 - Preparação da fixação da posição 1 para ensaio de arrancamento.	70
Figura 70 - Preparação da fixação da posição 2 para ensaio de corte.	70
Figura 71 - Formato da ferramenta utilizado nos ensaios físicos que replica a geometria do <i>clip</i> incorporado na 2ª fixação.....	71
Figura 72 - Preparação da fixação da posição 1 para ensaio de arrancamento.	71
Figura 73 - Preparação da fixação da posição 3 para ensaio de corte.	72
Figura 74 - Formato da ferramenta utilizada nos ensaios físicos que replica a geometria do <i>clip</i> incorporado na 3ªfixação.....	72
Figura 75 - Preparação da fixação da posição 1 para ensaio de arrancamento.	73
Figura 76 - Preparação da fixação da posição 1 para ensaio corte na direção C.....	73
Figura 77 - Gráfico força <i>versus</i> deslocamento para cada posição, ensaiada ao arrancamento (direção A), referente à 1ª fixação.	74
Figura 78 - Gráfico força <i>versus</i> deslocamento para cada posição, ensaiada segundo ao corte (direção B), referente à 1ª fixação.	74
Figura 79 - Gráfico força <i>versus</i> deslocamento para cada posição, ensaiada ao corte (direção C), referente à 1ª fixação.	75
Figura 80 – Região afetada pela pré tensão provocada pelos elementos fixadores nas fixações das posições ensaiadas ao corte segundo a direção B.....	76
Figura 81 – Zonas do porta agrafos onde se inicia a rotura no ensaio de arrancamento.....	77
Figura 82 – Fixação da posição 3 após ensaio de arrancamento.	77
Figura 83 - Gráfico força <i>versus</i> deslocamento para cada posição ensaiada, segundo a direção A, referente à 2ª fixação.	78
Figura 84 - Gráfico força <i>versus</i> deslocamento para cada posição ensaiada, segundo a direção B, referente à 2ª fixação.	78
Figura 85 - Gráfico força <i>versus</i> deslocamento para cada posição ensaiada, segundo a direção C, referente à 2ª fixação.	79

Figura 86 – Detalhe das condições de fixação num dos pontos do modelo da posição 3, referente à 2ª posição.....	79
Figura 87 - Rotura da zona superior do porta agrafos na 2ª posição de estudo, após ensaio de arrancamento.	80
Figura 88 – Zona lateral danificada da fixação da 2ª posição de estudo, após ensaio de corte na direção B.	81
Figura 89 – Rotura lateral das três posições de estudo segundo a direção C.	81
Figura 90 - Gráfico força <i>versus</i> deslocamento para cada posição ensaiada, segundo a direção F1, referente à 3ª fixação.	82
Figura 91 - Gráfico força <i>versus</i> deslocamento para cada posição ensaiada segundo a direção B, referente à 3ª fixação.	82
Figura 92 - Gráfico força <i>versus</i> deslocamento para cada posição ensaiada segundo a direção C, referente à 3ª fixação.	83
Figura 93 - Fixações após o ensaio de arrancamento.....	84
Figura 94 – Fixações ensaiadas ao corte segundo a direção B.	84
Figura 95 – Parâmetros de malha relativos às partes deformáveis dos modelos sólidos das três fixações.	86
Figura 96 - Parâmetros de malha das partes rígidas dos modelos sólidos das três fixações: a) elementos “R3D4” utilizados na ferramenta e na placa; b) elementos “R3D3” utilizados na ferramenta.	87
Figura 97 – Interação do tipo “ <i>General contact</i> ”: a) janela de definição da interação no Abaqus; b) parâmetros da interação.	87
Figura 98 - Definição dos parâmetros relativos à interação do tipo “ <i>Surface to surface</i> ”.	88
Figura 99 - Ativação do parâmetro de suavização de superfícies na interação do tipo “ <i>Surface to surface</i> ”.....	89
Figura 100 – Parâmetros relativos às propriedades dos contatos: a) comportamento tangencial; b) comportamento normal.	89
Figura 101 – Parâmetros “ <i>Step-1</i> ”.....	90
Figura 102 - Variáveis requeridas no “ <i>History Output Request</i> ”.	91
Figura 103 - Variáveis requeridas no “ <i>Field Output Request</i> ”.	92
Figura 104 - Preparação do modelo 3D da posição 1 para simulação numérica da 1ª fixação.	93
Figura 105 - Dimensões dos furos incorporados no modelo 3D da 1ª fixação para simulação numérica.	93
Figura 106 - Remoção dos frisos de retenção do porta agrafos.	94
Figura 107 - Conversão do modelo sólido da 1ª fixação em superfícies.	94

Figura 108 - Partições realizadas no porta agrafado da 1ª fixação, identificadas a diferentes cores, nas zonas onde existe variação de espessura.	95
Figura 109 – Modelo em superfícies com a ferramenta posicionada.	95
Figura 110 - Geração da malha de duas dimensões (2D) no modelo em superfícies da 1ª fixação no <i>software</i> ANSA.	96
Figura 111 - Atribuição de espessuras às superfícies do modelo da 1ª fixação no <i>software</i> ANSA.	97
Figura 112 - Importação do modelo em superfícies da 1ª fixação no <i>software</i> Abaqus.	97
Figura 113 - Processo de importação da ferramenta no Abaqus: a) geometria da ferramenta sólida; b) parâmetros de importação.	98
Figura 114 - Modelação da placa rígida da 1ª fixação no Abaqus: a) parâmetros de definição da parte; b) dimensões da placa rígida.	98
Figura 115 - Montagem do conjunto da 1ª fixação para simulação numérica pela primeira abordagem.	99
Figura 116 - Referencial local criado na ferramenta da 1ª fixação.	99
Figura 117 - Interação fornecida entre a ferramenta e os frisões de cima do porta agrafado da 1ª fixação.	100
Figura 118 - Parâmetros utilizados no contato entre a ferramenta e os frisões de cima do porta agrafado para o ensaio de arrancamento.	100
Figura 119 - 1ª interação entre a ferramenta e o porta agrafado nos ensaios ao corte em ambas as direções (direções B e C).	101
Figura 120 - 2ª interação entre a ferramenta e o porta agrafado nos ensaios ao corte em ambas as direções (direções B e C).	101
Figura 121 - 3ª interação entre a ferramenta e o porta agrafado nos ensaios ao corte em ambas as direções (direções B e C).	102
Figura 122 - Restrição do tipo “ <i>Coupling</i> ” nos nós abrangidos pelo diâmetro das quatro anilhas para a simulação na direção ao arrancamento.	103
Figura 123 – Zonas restringidas nas direções de ensaio ao corte (direções B e C).	103
Figura 124 - Constrangimento do tipo “ <i>Rigid body</i> ”: a) aplicado na ferramenta do modelo em superfícies da 1ª fixação; b) parâmetros definidos.	104
Figura 125 – Condições fronteira aplicadas no ensaio de arrancamento no modelo em superfícies da 1ª fixação: a) nos quatro pontos de referência criados; b) parâmetros definidos.	104
Figura 126 – Condição fronteira aplicada segundo o eixo local z: a) aplicação da condição fronteira no ponto de referência; b) parâmetros da aplicação da condição fronteira.	105
Figura 127 - Condição fronteira aplicada segundo o eixo local x: a) aplicação da condição fronteira no ponto de referência; b) parâmetros da aplicação da condição fronteira.	106

Figura 128 – Malhas geradas nos corpos rígidos do conjunto da 1ª fixação: a) placa; b) ferramenta.	106
Figura 129 – Malha gerada no modelo da 1ª fixação em superfícies: a) parâmetros dos elementos “S8R”; b) parâmetros dos elementos “STRIG5”	107
Figura 130 – Processo de importação no Abaqus a) modelo sólido da 1ª fixação; b) parâmetros de importação.....	108
Figura 131 – Partições no modelo sólido da 1ª fixação referentes à área abrangida pelas anilhas.....	108
Figura 132 - Montagem do conjunto da 1ª fixação para simulação numérica pela segunda abordagem.	109
Figura 133 – Malha gerada no modelo sólido da 1ª fixação.	109
Figura 134 – Criação de um referencial local na ferramenta da 1ª fixação.....	110
Figura 135 - Pontos de referência criados no modelo sólido.	111
Figura 136 - Ponto de referência criado na ferramenta.	111
Figura 137 - Restrições de todas as áreas particionadas pela área circunferencial das anilhas.	112
Figura 138 – Constrangimento do tipo “Rigid body”: a) aplicado na ferramenta do modelo sólido da 1ª fixação; b) parâmetros definidos.	112
Figura 139 – Preparação do modelo 3D referente à posição 1 da 2ª fixação.	113
Figura 140 – Dimensionamento dos furos responsáveis pela fixação do modelo da 2ª fixação à mesa da máquina de tração.	113
Figura 141 – Processo de importação no Abaqus a) modelo da 2ª fixação; b) parâmetros de importação.	114
Figura 142 - Importação da ferramenta no Abaqus: a) geometria da ferramenta da 2ª fixação; b) parâmetros de importação.	114
Figura 143 - Modelação da placa rígida da 2ª fixação no Abaqus: a) parâmetros de definição da parte; b) dimensões da placa rígida.....	115
Figura 144 - Partições realizadas no modelo da 2ª fixação: a) na zona dianteira do porta agrafó; b) na zona traseira do porta agrafó.	115
Figura 145 - Montagem do conjunto da 2ªfixação no módulo “Assembly” do Abaqus.	116
Figura 146 - Malha gerada no modelo da 2ªfixação.....	116
Figura 147 - Malhas geradas nos corpos rígidos do conjunto da 2ª fixação: a) placa; b) ferramenta.	117
Figura 148 – Criação do referencial local na ferramenta da 2ª fixação.....	117
Figura 149 - Contato do tipo “Surface to surface” fornecido entre uma das faces da ferramenta e uma das paredes laterais do desenganador, segundo a direção B (direção ao corte).	118

Figura 150 - Contato do tipo “ <i>Surface to surface</i> ” fornecido entre a face inferior do modelo da 2ª fixação e a face superior da placa, segundo a direção B (direção ao corte).	118
Figura 151 - Contato do tipo “ <i>Surface to surface</i> ” fornecido entre uma face da ferramenta e uma face interior do modelo, segundo a direção C (direção ao corte).	119
Figura 152 – Criação pontos de referência no conjunto da 2ª fixação.....	119
Figura 153 – Restrições do tipo “ <i>coupling</i> ” aplicadas nas zonas abrangidas pelas anilhas no modelo da 2ª fixação.....	120
Figura 154 – Restrição do tipo “ <i>Rigid body</i> ”: a) aplicada na ferramenta; b) parâmetros da restrição.	120
Figura 155 - Restrição do tipo “ <i>Rigid body</i> ”: a) aplicada na placa; b) parâmetros da restrição.	121
Figura 156 - Condições fronteira: a) aplicadas no modelo da 2ª fixação; b) parâmetros.	121
Figura 157 - Condição fronteira: a) aplicada na placa da 2ª fixação; b) parâmetros.....	122
Figura 158 – Condição fronteira aplicada na simulação ao arrancamento: a) no ponto de referência “RP1” segundo o eixo local z; b) definição dos parâmetros.	122
Figura 159 - Condição fronteira aplicada na simulação ao corte (direção B): a) no ponto de referência “RP1” segundo o sentido negativo do eixo local x; b) definição dos parâmetros.	123
Figura 160 - Condição fronteira aplicada na simulação ao corte (direção C): a) no ponto de referência “RP1” segundo o sentido positivo do eixo local x; b) definição dos parâmetros.	123
Figura 161 – Preparação do modelo 3D da 3ª fixação para ensaio numérico.....	124
Figura 162 - Remoção da aba do pilar no modelo 3D.	125
Figura 163 - Dimensionamento do furo responsável pela fixação do modelo da 3ª fixação à mesa da máquina de tração.	125
Figura 164 - Processo de importação no Abaqus a) modelo da 3ª fixação; b) parâmetros de importação.	126
Figura 165 - Importação da ferramenta no Abaqus: a) geometria da ferramenta da 3ª fixação; b) parâmetros de importação.	126
Figura 166 - Modelação da placa rígida da 3ª fixação no Abaqus: a) parâmetros de definição da parte; b) dimensões da placa rígida.....	127
Figura 167 - Partição do formato da anilha no modelo da 3ª fixação.	127
Figura 168 - Partição do formato retangular do calço no modelo da 3ª fixação.	128
Figura 169 - Partição lateral do formato retangular do calço no modelo da 3ª fixação.	128
Figura 170 – Imagens alusivas às zonas de criação de momentos no modelo da 3ª fixação nas simulações numéricas ao corte: a) na direção C; b) na direção B.	129
Figura 171 - Montagem do conjunto da 3ª fixação no módulo “ <i>Assembly</i> ” do Abaqus.	129

Figura 172 - Malhas geradas nos elementos constituintes do conjunto da 3ª fixação.	130
Figura 173 – Criação do referencial local na ferramenta da 3ª fixação.....	130
Figura 174 – Criação dos pontos de referência no conjunto.....	131
Figura 175 – Restrições do tipo “ <i>Coupling</i> ” no modelo da 3ª fixação: a) zona da anilha; b) zona do calço.	131
Figura 176 - Restrições do tipo “ <i>Coupling</i> ” aplicada na zona lateral do modelo da 3ª fixação para simulações ao corte.	132
Figura 177 - Restrições do tipo “ <i>Rigid body</i> ” nas partes rígidas do conjunto da 3ª fixação: a) ferramenta; b) placa.....	132
Figura 178 – Condições fronteira: a) aplicadas no modelo da 3ª fixação na simulação ao arrancamento; b) definição dos parâmetros.....	133
Figura 179 - Condições fronteira: a) aplicadas no modelo da 3ª fixação nas simulações ao corte; b) definição dos parâmetros.	133
Figura 180 - Condição fronteira: a) aplicada na placa; b) definição dos parâmetros.	134
Figura 181 - Condição fronteira: a) aplicada na ferramenta no ensaio ao arrancamento; b) definição dos parâmetros.	134
Figura 182 – Condições fronteira: a) aplicadas na ferramenta no ensaio ao corte segundo a direção B; b) aplicadas na ferramenta no ensaio ao corte segundo a direção C.	135
Figura 183 – Janela de introdução do regime elástico dos materiais no <i>software</i> Abaqus.	137
Figura 184 – Janela de introdução do regime plástico dos materiais no <i>software</i> Abaqus com referência ao detalhe do primeiro ponto.....	138
Figura 185 - Curvas nominais do material Exxtral CNU011.	139
Figura 186 - Conversão da curva média nominal para a curva real do material Exxtral CNU011.	139
Figura 187 – Determinação do módulo de elasticidade longitudinal do material Exxtral CNU011 com base nos dados reais.	140
Figura 188 - Cálculo da tensão de cedência do material Exxtral CNU011.....	140
Figura 189 – Introdução da zona elástica e plástica do material Exxtral CNU011 no Abaqus.	141
Figura 190 - Curva nominal do material Exxtral CMV101A.	142
Figura 191 – Curvas de tensão/deformação nominal e real do material Exxtral CMV101A.	142
Figura 192 - Determinação do módulo de elasticidade longitudinal do material Exxtral CMV101A com base nos dados reais.....	143
Figura 193 - Cálculo da tensão de cedência do material Exxtral CMV101A.	143
Figura 194 - Introdução da zona elástica e plástica do material Exxtral CMV101A no Abaqus.	144

Figura 195 - Curva nominal do material Hostakom EKC330N.	145
Figura 196 - Curvas de tensão/deformação nominal e real do material Hostakom EKC330N.....	145
Figura 197 - Determinação do módulo de elasticidade do material Hostakom EKC330N com base nos dados reais.....	146
Figura 198 - Cálculo da tensão de cedência do material Hostakom EKC330N.....	146
Figura 199 - Introdução da zona elástica e plástica do material Hostakom EKC330N no Abaqus.	147
Figura 200 – Nó selecionado para estudo de convergência de malha no modelo sólido da 1ª fixação. .	148
Figura 201 - Estudo de convergência de malha relativo às tensões para o nó definido para estudo no modelo sólido da 1ª fixação.....	149
Figura 202 - Nó selecionado para estudo de convergência de malha no modelo sólido da 2ª fixação. ..	150
Figura 203 - Estudo de convergência de malha relativo às tensões de Von Mises para o nó definido para estudo no modelo sólido da 2ª fixação.....	150
Figura 204 – Nó selecionado para estudo de convergência de malha no modelo sólido da 3ª fixação. .	151
Figura 205 - Estudo de convergência de malha relativo às tensões para o nó definido para estudo no modelo sólido da 3ª fixação.....	152
Figura 206 – Exemplo descritivo da metodologia utilizada para efetuar as correlações.	154
Figura 207 - Restrição das curvas ao 1º patamar.	154
Figura 208 - Obtenção dos declives das curvas no primeiro patamar.	155
Figura 209 - Restrição das curvas ao 2º patamar.	156
Figura 210 – Curvas força <i>versus</i> deslocamento resultantes dos ensaios físicos e das simulações numéricas para a 1ªfixação segundo a direção de ensaio ao arrancamento.	156
Figura 211 - Curvas força <i>versus</i> deslocamento resultantes dos ensaios físicos e das simulações numéricas para a 1ª fixação segundo a direção de ensaio ao corte (direção B).	159
Figura 212 - Curvas força <i>versus</i> deslocamento resultantes dos ensaios físicos e das simulações numéricas para a 1ª fixação segundo a direção de ensaio ao corte (direção C).	161
Figura 213 - Curvas força <i>versus</i> deslocamento resultantes dos ensaios físicos e das simulações numéricas para a 2ª fixação segundo a direção de ensaio ao arrancamento.	163
Figura 214 - Curvas força <i>versus</i> deslocamento resultantes dos ensaios físicos e das simulações numéricas para a 2ª fixação, segundo a direção de ensaio ao corte (direção B).	165
Figura 215 - Curvas força <i>versus</i> deslocamento resultantes dos ensaios físicos e das simulações numéricas para a 2ª fixação, segundo a direção de ensaio ao corte (direção C).	167
Figura 216 - Curvas força <i>versus</i> deslocamento resultantes dos ensaios físicos e das simulações numéricas para a 3ª fixação segundo a direção de ensaio ao arrancamento.	169

Figura 217 - Curvas força <i>versus</i> deslocamento resultantes dos ensaios físicos e das simulações numéricas para a 3ª fixação, segundo a direção de ensaio ao corte (direção B).	170
Figura 218 - Curvas força <i>versus</i> deslocamento resultantes dos ensaios físicos e das simulações numéricas para a 3ª fixação, segundo a direção de ensaio ao corte (direção C).	171
Figura 219 – Estabelecimento dos limites mínimos e máximos de deformação para a direção de ensaio ao arrancamento da 1ª fixação.	173
Figura 220 – Zonas que se encontram plastificadas para um valor de força de 200 N no modelo em superfícies da 1ª fixação, segundo a direção de ensaio ao arrancamento.	174
Figura 221 - Zonas que se encontram plastificadas para um valor de força de 200 N no modelo sólido da 1ª fixação, segundo a direção de ensaio ao arrancamento.	174
Figura 222 - Zona interior da 1ª fixação plastificada do modelo sólido para um valor de força de 200 N, segundo a direção de ensaio ao arrancamento.	175
Figura 223 - Zonas que se encontram plastificadas para um valor de força de 150 N no modelo sólido da 1ª fixação, segundo a direção de ensaio ao corte (direção B).	175
Figura 224 - Zonas interiores da 1ª fixação plastificadas do modelo sólido para um valor de força de 150 N, segundo a direção de ensaio ao corte (direção B).	176
Figura 225 - Zonas que se encontram plastificadas para um valor de força de 150 N no modelo em superfícies da 1ª fixação, segundo a direção de ensaio ao corte (direção C).	176
Figura 226 - Estabelecimento dos limites mínimos e máximos de deformação para a direção de ensaio ao arrancamento da 2ª fixação.	177
Figura 227 - Zonas críticas para um valor de força de 200 N no modelo sólido da 2ª fixação, segundo a direção de ensaio ao arrancamento.	178
Figura 228 – Regiões críticas da 2ª fixação no interior do porta agrafos para um valor de força de 200 N, segundo a direção de ensaio ao arrancamento, no modelo sólido.	178
Figura 229 – Deformação plástica na zona de impacto entre o <i>clip</i> e o porta agrafos: a) na direção B; b) na direção C.	179
Figura 230 - Estabelecimento dos limites mínimos e máximos de deformação para a direção de ensaio ao arrancamento da 2ª fixação.	179
Figura 231 – Regiões plastificadas no modelo da 3ª fixação, na direção de ensaio ao arrancamento, para um valor de força de 400 N.	180
Figura 232 – Início da plastificação no modelo de ensaio ao arrancamento da 3ª fixação.	180
Figura 233 - Regiões plastificadas na zona superior do modelo da 3ª fixação, na direção de ensaio ao arrancamento para uma força de 400 N.	181

Figura 234 – Zonas de plastificação de plástico no raio interior do porta agrafado do modelo da 3ª fixação, para o ensaio ao arrancamento.....	181
Figura 235 – Região de deformação plástica localizada na parte de trás do porta agrafado do modelo da 3ª fixação, para o ensaio ao arrancamento.....	182
Figura 236 - Regiões de plastificação do plástico localizadas na zona superior do porta agrafado para uma força de 150 N no modelo da 3ª fixação, para o ensaio na direção ao corte (direção B).....	182
Figura 237 – Deformação plástica nos raios internos do modelo da 3ª fixação para a direção de ensaio ao corte (direção B).	183
Figura 238 - Regiões de plastificação do plástico no porta agrafado do modelo da 3ª fixação para um valor de força de 150 N, relativamente ao ensaio na direção ao corte (direção C).	183
Figura 239 – Deformação plástica nos raios internos do modelo da 3ª fixação para a direção de ensaio ao corte (direção C).	184
Figura 240 - Modificações geométricas realizadas na 1ª fixação relativas à 1ª iteração.	185
Figura 241 - Vista frontal da 1ª fixação relativa à 1ª iteração.	186
Figura 242 - Deslocação dos frisos laterais da 1ª fixação na 1ª iteração.	186
Figura 243 – Início da deformação plástica nos frisos traseiros para uma valor de força de 220 N, após simulação segundo a direção de arrancamento, referentes à 1ª iteração da 1ªfixação.	187
Figura 244 - Início da deformação plástica na zona interior do porta agrafado para uma valor de força de 210 N, após simulação segundo a direção de arrancamento, referentes à 1ª iteração da 1ªfixação.	187
Figura 245 – Zonas plastificadas para uma força de 120 N no exterior do porta agrafado da 1ª fixação, segundo a direção de ensaio B, relativamente à 1ª iteração.	188
Figura 246 – Zonas plastificadas para uma força de 120 N no interior do porta agrafado da 1ª fixação, segundo a direção de ensaio B, relativamente à 1ª iteração.	188
Figura 247 – Modificações geométricas realizadas na 1ª fixação relativas à 2ª iteração.	189
Figura 248 – Vista frontal do porta agrafado da 1ª fixação referente à 2ª iteração.	189
Figura 249 – Aumento da inclinação para 50° dos frisos traseiros na 2ª iteração da 1ª fixação.	190
Figura 250 – Análise de desmoldagem: a) segundo o eixo y; b) parâmetros da análise.	190
Figura 251 – Análise de desmoldagem: a) segundo o eixo z; b) parâmetros da análise.	191
Figura 252 – Início da deformação plástica nos frisos traseiros para uma valor de força de 350 N, após simulação segundo a direção de arrancamento, referentes à 2ª iteração da 1ªfixação.	191
Figura 253 - Início da deformação plástica na zona interior do porta agrafado para uma valor de força de 250 N, após simulação segundo a direção de arrancamento, referentes à 2ª iteração da 1ªfixação.	192

Figura 254 - Modificações geométricas realizadas na 2ª fixação relativas à 1ª iteração.	192
Figura 255 - Vista frontal da 2ª fixação relativa à 1ª iteração.	193
Figura 256 – Modificações geométricas realizadas na 3ª fixação relativas à 1ª iteração.	194
Figura 257 – Modificações realizadas na zona interior do porta agrafos da 3ª fixação relativamente à 1ª iteração.	194
Figura 258 – Vista lateral seccionada da 3ª fixação para demonstração do fim do raio e do <i>clip</i>	195
Figura 259 – Adição de material plástico na zona superior do porta agrafos da 3ª fixação relativamente à 1ª iteração.	195
Figura 260 – Incorporação dos frisos traseiros na 1ª iteração da 3ª fixação.	196
Figura 261 – Zonas de deformação plástica, referentes à 1ª iteração da 3ª fixação, para um valor de força de 400 N após simulação segundo a direção de arrancamento.	197
Figura 262 – Zonas de deformação plástica, referentes à 1ª iteração na direção de arrancamento, para um valor de força de 400 N no interior do porta agrafos da 3ª fixação.	197
Figura 263 – Valores de PE para o início da plastificação, aproximadamente 200 N, na zona superior do porta agrafos da 3ª fixação.	198
Figura 264 – Modificações referentes à 2ª iteração da 3ª fixação.	198
Figura 265 – Adição de material na zona superior do porta agrafos da 3ª fixação relativamente à 2ª iteração.	199
Figura 266 – Início da plastificação, referente à simulação ao arrancamento, na zona frontal inferior da 3ª fixação, a rondar os 210 N após implementação da solução híbrida na 2ª iteração.	199
Figura 267 – Início da plastificação para valores de força de aproximadamente 240 N na zona do batente do <i>clip</i> com o porta agrafos referente à 2ª iteração da 3ª fixação.	200
Figura 268 – Modificações referentes à 3ª iteração da 3ª fixação.	200
Figura 269 – Modificações implementadas na zona superior do porta agrafos da 3ª fixação referentes à 3ª iteração.	201
Figura 270 – Início da plastificação na zona frontal inferior da 3ª fixação a rondar os 210 N após simulação numérica ao arrancamento da 3ª iteração.	202
Figura 271 – Início da plastificação para valores de força de aproximadamente 250 N na zona do batente do <i>clip</i> com o porta agrafos da 3ª fixação após simulação numérica ao arrancamento da 3ª iteração.	202
Figura 272 – Deformação inelástica ao arrancamento para uma força de 400 N no modelo da 3ª fixação após as modificações resultantes da 3ª iteração.	203
Figura 273 – Modificações referentes à 4ª iteração da 3ª fixação.	203

Figura 274 – Modificações na zona superior do porta agrafo da 3ª fixação relativamente à 4ª iteração.	204
Figura 275 – Início da plastificação na zona frontal inferior da 3ª fixação a rondar os 300 N após simulação numérica ao arrancamento da 4ª iteração.....	205
Figura 276 – Início da plastificação para valores de força de aproximadamente 300 N na zona do batente do <i>clip</i> com o porta agrafo da 3ª fixação após simulação numérica ao arrancamento da 4ª iteração.	205
Figura 277 – Zonas plastificadas para um valor de força de 400 N na direção ao arrancamento no porta agrafo da 3ª fixação relativamente à 4ª iteração.	206
Figura 278 – Modificações referentes à 5ª iteração da 3ª fixação.	206
Figura 279 – Vista frontal do porta agrafo da 3ª fixação referente à 5ª iteração.	207
Figura 280 – Modificações na zona superior do porta agrafo da 3ª fixação relativamente à 5ª iteração.	207
Figura 281 – Vista em corte do <i>clip</i> inserido no porta agrafo para verificação da folga entre o <i>clip</i> e a face inclinada do porta agrafo.....	208
Figura 282 – Vista em corte da 3ª fixação após a alteração da inclinação da face do porta agrafo.	208
Figura 283 – Valores de deformação plástica registados para uma força de 300 N ao arrancamento no porta agrafo da 3ª fixação relativamente à 5ª iteração.....	209
Figura 284 – Zonas deformadas irreversivelmente para um valor de força mínimo de 120 N, após simulação numérica na direção B da 3ª fixação, relativamente à 5ª iteração.	210
Figura 285 – Zonas traseiras deformadas irreversivelmente para um valor de força mínimo de 120 N, após simulação numérica na direção B da 3ª fixação, relativamente à 5ª iteração.	210
Figura 286 – Zonas deformadas irreversivelmente para um valor de força mínimo de 120 N, após simulação numérica na direção C da 3ª fixação, relativamente à 5ª iteração.	211
Figura 287 – Zonas traseiras deformadas irreversivelmente para um valor de força mínimo de 120 N, após simulação numérica na direção C da 3ª fixação, relativamente à 5ª iteração.	211
Figura 288 – Modificações referentes à 6ª iteração da 3ª fixação.	212
Figura 289 – Espaçamento mínimo a ser garantido entre paredes para evitar fragilidades no aço.	213
Figura 290 – Vista frontal da zona interior do porta agrafo da 3ª fixação referente à 6ª iteração.....	213
Figura 291 – Vista de trás do porta agrafo da 3ª fixação referente à 6ª iteração.	214
Figura 292 – Vista superior seccionada para demonstrar o detalhe da espessura do porta agrafo.	214
Figura 293 – Análise de desmoldagem: a) segundo o eixo y; b) parâmetros da análise.	215
Figura 294 – Análise de desmoldagem: a) segundo o eixo z; b) parâmetros da análise.	215

Figura 295 – Valores de deformação plástica registados para uma força de 310 N ao arrancamento no porta agrafos da 3ª fixação relativamente à 6ª iteração.....	216
Figura 296 – Zonas traseiras deformadas irreversivelmente para um valor de força entre os 100-110 N, após simulação numérica na direção C da 3ª fixação, relativamente à 6ª iteração.	216
Figura 297 – Zonas deformadas irreversivelmente para um valor de força de 130 N, após simulação numérica na direção C da 3ª fixação, relativamente à 6ª iteração.....	217
Figura 298 - Evolução da geometria da 1ª fixação.	218
Figura 299 - Evolução da geometria da 1ª fixação.	219
Figura 300 – Evolução da geometria da 3ª fixação.....	220
Figura 301 - <i>Mass scaling</i> no Abaqus.	222
Figura 302 - Parâmetros a ser definidos para a inicialização do dano no Abaqus.	223
Figura 303 - Parâmetros relacionados com a resposta evolutiva do dano: a) deslocamento na rotura; b) energia na fratura.	224
Figura 304 – Equações para determinação da tensão de von Mises.	225
Figura 305 – Divisão da área relativa ao dano do material Exxtral CNU011.	227
Figura 306 – Curvas forças <i>versus</i> deslocamento para diferentes valores de <i>mass scaling</i> relativamente à direção de ensaio ao arrancamento na 1ª fixação.	228
Figura 307 – Diferentes energias acumuladas do sistema para um valor de <i>mass scaling de</i> 1E-6.....	228
Figura 308 – Diferentes energias acumuladas do sistema para um valor de <i>mass scaling de</i> 1E-5.....	229
Figura 309 – Simulação numérica dinâmica de arrancamento para a 1ª fixação ao final dos 5 s de ensaio.	230

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Estudos realizados sobre o efeito do coronavírus no setor automóvel.....	10
Tabela 2 - Importância do setor do fabrico de componentes para a economia portuguesa à data de Novembro de 2021 [9].....	12
Tabela 3 – Principais pilares da indústria automóvel.	13
Tabela 4 – Funcionalidades e gama de materiais plásticos aplicados a componentes automobilísticos [17].....	15
Tabela 5 – Tecnologias mais comuns no processamento de componentes para a indústria automóvel. .	16
Tabela 6 – Funcionalidade das etapas constituintes de um ciclo de injeção [30].	18
Tabela 7 -Defeitos típicos nos componentes fabricados pelo processo de moldação por injeção.	19
Tabela 8 – Espessuras de parede recomendada para diferentes materiais poliméricos (adaptado de [54]).	27
Tabela 9 – Principais vantagens e desvantagens das ligações mecânicas [64, 68, 69].....	31
Tabela 10 - Principais vantagens e desvantagens dos <i>integral snap-fit joints</i> [70, 73, 74].	33
Tabela 11 – Vantagens e desvantagens mais importantes das ligações adesivas [80].	34
Tabela 12 – Técnicas de soldadura mais utilizadas na ligação de componentes poliméricos.....	34
Tabela 13 – Critérios de falha segundo o comportamento mecânico do material, do seu modo de falha e do tipo de carga aplicado (adaptado de [90]).....	35
Tabela 14 – Valores dos parâmetros utilizados no cálculo do fator de segurança (adaptado de [90])	37
Tabela 15 – Tipos de análise [99].	39
Tabela 16 – Explicação da razão do empreendimento do MEF em algumas aplicações no setor automóvel.....	40
Tabela 17 – Estado de arte relativo à otimização de componentes poliméricos para o setor automóvel.	41
Tabela 18 - Objetivos delineados para a dissertação de mestrado.	48
Tabela 19 - Valores das marcas relativos à resistência das fixações nos seus componentes.	62
Tabela 20 - Condições de ensaio relativas ao ensaio de arrancamento e de corte	69
Tabela 21 - Forças máximas registadas para cada posição da 1ª fixação, segundo as direções de ensaio estipuladas.....	76

Tabela 22 - Forças máximas registadas para cada posição da 2ª fixação, segundo as direções de ensaio estipuladas.	80
Tabela 23 - Forças máximas registadas para cada posição da 2ª fixação, segundo as direções de ensaio estipuladas.	83
Tabela 24 - Comparação das propriedades da ficha técnica e as calculadas para o material Exxtral CNU011.	141
Tabela 25 - Comparação das propriedades da ficha técnica e as calculadas para o material Exxtral CMV101A.	144
Tabela 26 - Comparação das propriedades da ficha técnica e as calculadas para o material Hostakom EKC330N.	147
Tabela 27 – Diferenças percentuais entre os diferentes tamanhos de malha estudados para o modelo sólido da 1ª fixação.	149
Tabela 28 – Diferença percentual entre os diferentes tamanhos de malha estudados para o modelo sólido da 2ª fixação.	151
Tabela 29 – Diferença percentual entre os diferentes tamanhos de malha estudados para o modelo sólido da 3ª fixação.	152
Tabela 30 – Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 1º patamar da 1ª fixação na direção de ensaio ao arrancamento.	157
Tabela 31 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 2º patamar da 1ª fixação na direção de ensaio ao arrancamento.	158
Tabela 32 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 1º patamar da 1ª fixação na direção de ensaio ao corte (direção B).	159
Tabela 33 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 2º patamar da 1ª fixação na direção de ensaio ao corte (direção B).	160
Tabela 34 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 1º patamar da 1ª fixação na direção de ensaio ao corte (direção C).	161
Tabela 35 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 2º patamar da 1ª fixação na direção de ensaio ao corte (direção C).	162
Tabela 36 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 1º patamar da 2ª fixação na direção de ensaio ao arrancamento.	164
Tabela 37 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 2º patamar da 2ª fixação na direção de ensaio ao arrancamento.	164
Tabela 38 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 1º patamar da 2ª fixação na direção de ensaio ao corte (direção B).	166

Tabela 39 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 2 ^a patamar da 2 ^a fixação na direção de ensaio ao corte (direção B).	166
Tabela 40 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 1 ^a patamar da 2 ^a fixação na direção de ensaio ao corte (direção C).	167
Tabela 41 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 2 ^a patamar da 2 ^a fixação na direção de ensaio ao corte (direção C).	168
Tabela 42 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 1 ^a patamar da 3 ^a fixação na direção de ensaio ao arrancamento.	169
Tabela 43 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 1 ^a patamar da 3 ^a fixação na direção de ensaio ao corte (direção B).	170
Tabela 44 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 2 ^a patamar da 3 ^a fixação na direção de ensaio ao corte (direção B).	171
Tabela 45 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 1 ^a patamar da 3 ^a fixação na direção de ensaio ao corte (direção C).	172
Tabela 46 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 2 ^a patamar da 3 ^a fixação na direção de ensaio ao corte (direção C).	172
Tabela 47 - Resumo dos valores de força mínima com margem de segurança suportados pelas diferentes iterações, antes do início da plastificação, relativamente à 1 ^a fixação.	218
Tabela 48 - Resumo dos valores de força mínima com margem de segurança suportados pelas diferentes iterações, antes do início da plastificação, relativamente à 2 ^a fixação.	220
Tabela 49 - Resumo dos valores de força mínima com margem de segurança suportados pelas diferentes iterações, antes do início da plastificação, relativamente à 3 ^a fixação.	221
Tabela 50 – Comparação dos tempos da CPU com os dois valores de <i>mass scaling</i> utilizados na simulação.	229

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Estrutura da dissertação	4
1.4	Empresa acolhedora.....	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Indústria automóvel.....	9
2.1.1	Caracterização da indústria mundial.....	9
2.1.2	Caracterização da indústria portuguesa.....	11
2.1.3	Pilares da indústria automóvel.....	12
2.1.4	Componentes poliméricos	14
2.1.4.1	Aplicação dos polímeros nos automóveis.....	14
2.1.4.2	Processos de fabrico para componentes poliméricos	16
2.2	Injeção de plásticos.....	17
2.2.1	Caracterização do processo.....	17
2.2.2	Constituição de um molde	20
2.2.3	Projeto de moldes	22
2.2.4	Dimensionamento de moldes	24
2.2.4.1	Força de fecho	24
2.2.4.2	Número de cavidades	24
2.2.4.3	Entrada de injeção	24
2.2.4.4	Contração do material	25
2.3	Projeto de componentes poliméricos para a indústria automóvel	25
2.3.1	Regras de projeto	26

2.3.1.1	Espessura de parede.....	26
2.3.1.2	Frisos (ribs).....	27
2.3.1.3	Raios.....	28
2.3.1.4	Ângulos de saída.....	29
2.3.2	Soluções para fixações de componentes.....	30
2.3.2.1	Ligações mecânicas.....	30
2.3.2.2	Ligações adesivas.....	33
2.3.2.3	Ligações soldadas.....	34
2.3.3	Método de dimensionamento.....	35
2.3.4	Método dos elementos finitos.....	38
2.3.4.1	Caracterização geral do método.....	38
2.3.4.2	Vantagens da utilização em projeto.....	40
2.3.5	Estado de arte.....	41
3	DESENVOLVIMENTO.....	47
3.1	Caracterização da entidade acolhedora.....	47
3.2	Objetivos do trabalho a realizar.....	48
3.3	Caracterização dos elementos em análise.....	49
3.3.1.1	1ª fixação.....	49
3.3.1.2	2ª fixação.....	54
3.3.1.3	3ª fixação.....	57
3.4	Requisitos impostos pelo cliente.....	60
3.5	Metodologia de trabalho a seguir.....	63
3.6	Ensaio experimentais realizados.....	64
3.6.1	Preparação dos modelos para ensaio.....	64
3.6.1.1	1ª fixação.....	64
3.6.1.2	2ª fixação.....	66
3.6.1.3	3ª fixação.....	67
3.6.2	Condições e <i>set-up</i> de ensaio.....	69

3.6.2.1	1ª fixação	69
3.6.2.2	2ª fixação	71
3.6.2.3	3ª fixação	72
3.6.3	Resultados do ensaio.....	74
3.6.3.1	1ª fixação	74
3.6.3.2	2ª fixação	78
3.6.3.3	3ª fixação	82
3.7	Simulações numéricas estáticas.....	85
3.7.1	Condições da análise numérica estática.....	85
3.7.1.1	1ªfixação	92
3.7.1.1.1	Modelo superfícies.....	92
3.7.1.1.2	Modelo sólido	107
3.7.1.2	2ª fixação	113
3.7.1.3	3ªfixação	124
3.7.2	Modelos materiais plásticos.....	135
3.7.2.1	1ª fixação	138
3.7.2.2	2ª fixação	142
3.7.2.3	3ª fixação	144
3.7.3	Convergência de malha	147
3.7.3.1	1ª fixação	148
3.7.3.2	2ª fixação	150
3.7.3.3	3ª fixação	151
3.7.4	Resultados obtidos e comparação com os ensaios experimentais	153
3.7.4.1	1ª fixação	156
3.7.4.2	2ª fixação	163
3.7.4.3	3ª fixação	168
3.7.5	Discussão crítica	173
3.7.5.1	1ª fixação	173
3.7.5.2	2ª fixação	177
3.7.5.3	3ª fixação	179

3.8	Melhoria da geometria das fixações	184
3.8.1	<i>Brainstorming</i> de ideias de melhoria	184
3.8.1.1	1ª fixação	185
3.8.1.1.1	1ª iteração	185
3.8.1.1.1.1	Quantificação das melhorias obtidas – 1ª iteração	186
3.8.1.1.2	2ª iteração	188
3.8.1.1.2.1	Quantificação das melhorias obtidas – 2ª iteração	191
3.8.1.2	2ª fixação	192
3.8.1.2.1	1ª iteração	192
3.8.1.2.2	Quantificação das melhorias obtidas – 1ª iteração	193
3.8.1.3	3ª fixação	193
3.8.1.3.1	1ª iteração	193
3.8.1.3.1.1	Quantificação das melhorias obtidas – 1ª iteração	196
3.8.1.3.2	2ª iteração	198
3.8.1.3.2.1	Quantificação das melhorias obtidas – 2ª iteração	199
3.8.1.3.3	3ª iteração	200
3.8.1.3.3.1	Quantificação das melhorias obtidas – 3ª iteração	201
3.8.1.3.4	4ª iteração	203
3.8.1.3.4.1	Quantificação das melhorias obtidas – 4ª iteração	204
3.8.1.3.5	5ª iteração	206
3.8.1.3.5.1	Quantificação das melhorias obtidas – 5ª iteração	209
3.8.1.3.6	6ª iteração	212
3.8.1.3.6.1	Quantificação das melhorias obtidas – 6ª iteração	216
3.8.2	Proposta de geometrias finais	217
3.8.2.1	1ª fixação	217
3.8.2.2	2ª fixação	219
3.8.2.3	3ª fixação	220
3.9	Simulações numéricas dinâmicas	222
3.9.1	Modelos materiais de dano	223
3.9.2	Condições da análise numérica dinâmica	226

4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	233
4.1	Conclusões	233
4.2	Propostas de trabalhos futuros.....	235
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	239
6	ANEXOS.....	249
6.1	Anexo1	249
6.2	Anexo2	251
6.3	Anexo3	253

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Estrutura da dissertação
- 1.4 Empresa acolhedora

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O setor automóvel tem vindo a experienciar um crescimento na sua atividade na última década. Esta mudança de paradigma fez com que os fabricantes e os fornecedores adotassem estratégias e práticas que lhes permitam serem competitivos e eficientes em relação à concorrência. O estabelecimento de práticas padrão no seio de uma empresa, desde o surgimento da ideia, passando pela fase de desenvolvimento, até à fase da venda do produto, significam muitas vezes rapidez na execução das tarefas, economia de recursos e qualidade para os clientes. Desta forma canalizam-se os esforços num único sentido impedindo a difusão de procedimentos distintos para executar a mesma tarefa, o que diminui a repetibilidade do fabrico e a qualidade dos componentes fabricados. A implementação destas práticas deve estar em conformidade com os requisitos do cliente, o que conduz à necessidade, por parte das empresas, em despender recursos para estudar todos os cenários possíveis. Em muitos ambientes empresariais nem sempre isto é possível, ou devido à falta de recursos ou à indisponibilidade desses mesmos recursos. No que à fase de desenvolvimento do automóvel diz respeito, o aparecimento de ferramentas numéricas, como o método dos elementos finitos, vieram não só auxiliar no desenvolvimento do produto, mas também facilitar a implementação de práticas *standard* internas, na medida em que com a empregabilidade destas é possível obter uma primeira impressão do comportamento do produto sem recorrer a ensaios físicos, o que se traduz em poupança de tempo e dinheiro. Com base nestes conceitos, é também possível melhorar o desempenho de componentes automóveis e garantir que estes cumprem com os requisitos impostos pelos clientes no setor automóvel (fabricantes automóveis) e com a normalização em vigor.

1.2 Objetivos

O principal objetivo com a realização da dissertação de mestrado reside no estudo de esforços nos pontos de fixação de componentes poliméricos concessionados pela Simoldes plásticos à carroçaria do automóvel, de forma a desenvolver fixações *standard* que cumpram com as especificações dos clientes. Numa primeira fase, são escolhidas as fixações para estudo, de entre um leque de opções que a Simoldes Plásticos neste momento possui. Seguidamente, são realizados ensaios físicos de

tração e de corte nestas fixações. Numa fase posterior, com o auxílio de ferramentas numéricas, são replicadas as condições dos ensaios físicos para correlação entre ambos os ensaios e feita a respetiva avaliação das zonas que necessitam de ser reforçadas. Após validação e melhoria da geometria das fixações, o intuito do trabalho passa pela incorporação destas numa biblioteca virtual de modelos *computer aided design* (CAD) de forma a auxiliar os projetistas na fase de desenvolvimento dos componentes.

1.3 Estrutura da dissertação

O documento encontra-se dividido em seis capítulos principais: introdução, revisão bibliográfica, desenvolvimento, conclusões e propostas de trabalhos futuros, bibliografia e outras fontes de informação e, por fim, anexos.

Na introdução é feita uma primeira abordagem ao tema a desenvolver, onde se contextualiza o leitor acerca do meio onde está inserido o tema da dissertação e se destacam de uma forma genérica os principais objetivos a serem atingidos. Apresenta-se a divisão a ser adotada para o documento e a empresa que acolheu e possibilitou a realização desta dissertação.

Segue-se a revisão bibliográfica, que contempla a recente documentação publicada em artigos científicos conceituados e livros, e cujo conteúdo está diretamente ligado ao tema da dissertação. Inicialmente, este capítulo baseia-se na caracterização da indústria automóvel. Numa segunda parte é focado o processo de injeção de plásticos. Para concluir a revisão bibliográfica é incluído um subcapítulo final de projeto de componentes poliméricos, com foco na indústria automóvel e destaque para as ligações mecânicas, e descreve-se o método dos elementos finitos. Conclui-se este subcapítulo com um estado de arte que contempla estudos realizados no âmbito da otimização da geometria de componentes poliméricos por técnicas numéricas.

Na terceira parte do documento é focado todo o procedimento utilizado para cumprir os objetivos inicialmente propostos. Inicia-se este capítulo pela caracterização da entidade acolhedora e expõem-se em detalhe os objetivos a serem cumpridos com a realização da dissertação. Segue-se uma caracterização das fixações a ser alvo de estudo, e descrevem-se em detalhe os componentes onde estas estão inseridas, considerando aspetos relacionados com a sua geometria, sequências de montagem, entre outros. Apresentam-se os requisitos impostos pelos clientes referentes à resistência que as três fixações devem suportar segundo os esforços de arrancamento e corte. Num capítulo seguinte, exhibe-se ao leitor a metodologia de trabalho a adotar. No capítulo 3.6 dá-se início aos ensaios experimentais realizados, e descreve-se toda a preparação dos modelos para ensaio, condições e *set-up* de ensaio, e no final demonstram-se os resultados obtidos. Após os ensaios experimentais sucedem as

simulações numéricas estáticas, subcapítulo no qual se apresentam as condições de simulação para cada fixação, os modelos materiais plásticos, o estudo de convergência de malha, os resultados obtidos com a respetiva comparação entre os ensaios experimentais e, no final do capítulo, apresenta-se uma discussão crítica onde se identificam as principais zonas de melhoria nas fixações. Com base no conteúdo do subcapítulo anterior prossegue-se num subcapítulo seguinte à melhoria da geometria das fixações, no qual se detalham as propostas idealizadas para cada iteração. Finaliza-se com a evolução da geometria em relação ao modelo original de cada fixação e um apresenta-se um resumo em forma de tabela dos valores suportados para cada iteração em cada fixação. Para finalizar esta terceira parte do documento, enuncia-se num último capítulo um estudo com o intuito de perceber o efeito que diferentes valores de *mass scaling* possuem nas simulações numéricas dinâmicas.

A quarta parte diz respeito às conclusões e propostas de trabalhos futuros, onde se faz o resumo de todo o procedimento adotado no desenvolvimento e se alude às principais dificuldades, objetivos cumpridos e não cumpridos e com uma referência a propostas de trabalho futuros.

A quinta parte dirige-se à bibliografia, onde se expõem todas as referências consultadas. Numa sexta e última parte, os anexos, encontra-se toda a informação auxiliar à dissertação.

1.4 Empresa acolhedora

A dissertação de mestrado foi realizada em ambiente empresarial na empresa Simoldes plásticos, localizada em Oliveira de Azeméis, durante um período de nove meses – entre Setembro de 2021 e Junho de 2022.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Indústria automóvel
- 2.2 Injeção de plásticos
- 2.3 Projeto de componentes poliméricos para a indústria automóvel

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Indústria automóvel

Com o decorrer dos anos e o progresso da tecnologia, os automóveis tornaram-se um meio de transporte imprescindível ao ser humano. De acordo com a *Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles* (OICA), em 2020 foram produzidos 77 621 582 milhões de veículos em todo o mundo [1]. A indústria automóvel desempenha assim um papel fulcral no desenvolvimento socioeconómico dos países [2].

2.1.1 Caracterização da indústria mundial

A produção e venda de automóveis, a nível mundial, tem vindo a registar ao longo dos últimos anos uma tendência crescente (Figura 1).

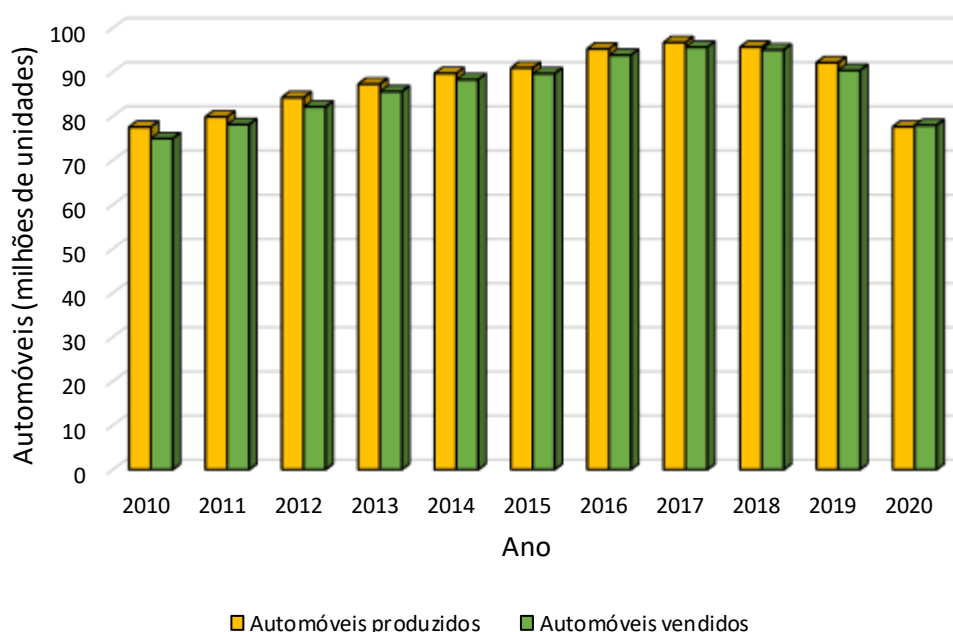


Figura 1 – Estimativa da quantidade de automóveis produzidos e vendidos no mundo, entre os anos de 2010-2020 (dados retirados de [1]).

Através da Figura 1 é perceptível um pico máximo de automóveis vendidos e produzidos no ano de 2017, com um subsequente decréscimo de 2017 a 2020. Nesse período de retrocesso, destaca-se a transição do ano de 2019 para o de 2020, onde a queda de

automóveis produzidos e vendidos foi de aproximadamente 16% e 14%, respetivamente. A principal razão deste decréscimo deveu-se à situação pandémica provocada pelo vírus SARS-CoV-2, cuja origem remonta ao final do ano de 2019 [3]. Na Tabela 1 apresentam-se algumas pesquisas relacionadas com as consequências da epidemia no setor automóvel.

Tabela 1 – Estudos realizados sobre o efeito do coronavírus no setor automóvel.

Referência	Descrição do estudo
Karagöz Özenç [4]	Este estudo teve como objetivo avaliar os potenciais efeitos que a pandemia provocou na economia mundial. No que diz respeito ao setor automóvel, este foi severamente afetado devido à complexidade e imensidão da sua cadeia de fornecimento. Grandes produtores como Volkswagen, Toyota, BMW, Fiat Chrysler, Peugeot e Renault decidiram encerrar as suas fábricas, localizadas em vários pontos da Europa, devido ao impacto económico vivido neste continente.
Xu et al. [5]	Este artigo estudou o impacto da pandemia na resposta e eficiência das cadeias globais de fornecimento. O estudo concluiu que a cadeia global de fornecimento ao setor automóvel experienciou desafios como nunca antes vivenciados. É expectável que a fonte de receita mundial do setor sofra uma queda de 13%. Produtores como a Volkswagen, General Motors e Hyundai viram-se afetados pela escassez de componentes e pelas restrições impostas no seu transporte.

As medidas tomadas pelos países, com vista a impedirem a transmissão do vírus, impactaram severamente a economia mundial. Como consequência dessas medidas, as redes de fornecimento para a indústria automóvel foram substancialmente influenciadas, muito devido à grande dependência que este setor possui da China como fornecedor de componentes. Wuhan, região onde se registou o primeiro caso por Covid-19, é uma das maiores fabricantes de componentes para automóveis e fornece-os a marcas produtoras de viaturas como Volkswagen, General Motors, Hyundai e Toyota. Apesar de tudo, o setor identificou algumas estratégias que futuramente podem mitigar os efeitos provocados pelo vírus a curto prazo. Um estudo levado a cabo por Belhadi et al. [6] nomeou como melhores estratégias:

- Criar postos de fornecimento localizados;
- Utilizar tecnologias avançadas da Indústria 4.0.

Relativamente à primeira estratégia, esta impossibilitará quebras na produção devido a falta de material. No que toca à segunda, esta permitirá às empresas analisar dados em tempo real do estado das atividades das cadeias de abastecimento para ultrapassar os desafios impostos.

2.1.2 Caracterização da indústria portuguesa

A nível nacional, a produção e vendas de automóveis seguiu a tendência da Figura 2.

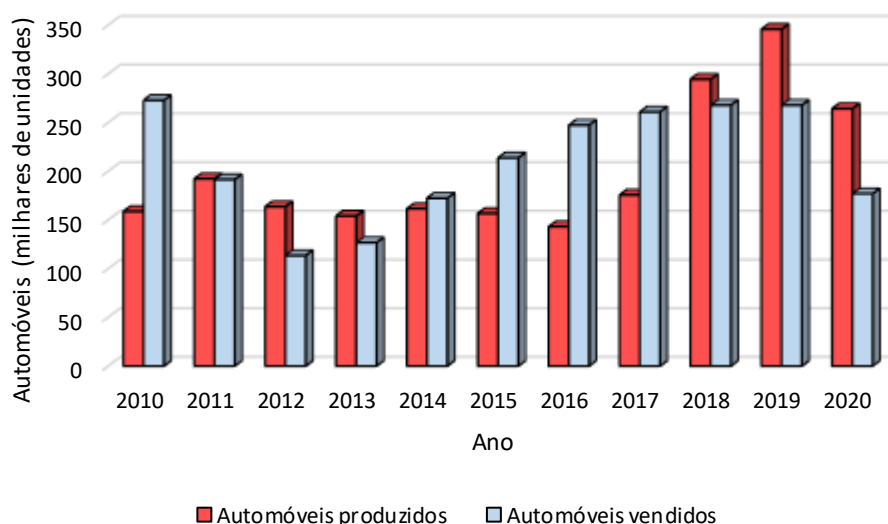


Figura 2 - Estimativa da quantidade de automóveis produzidos e vendidos em Portugal, entre os anos de 2010-2020 (dados retirados de [1]).

No que toca à produção de automóveis, esta seguiu uma tendência oscilatória entre os anos de 2010 e 2016. Após este período, o número foi crescendo a cada ano, atingindo um pico máximo de 345 688 automóveis produzidos em 2019. Pelas mesmas razões mencionadas no capítulo 2.1.1, em 2020, tanto a produção como as vendas sofreram uma queda nos seus números. O ano de 2010 foi o mais vendedor com 272 754 automóveis vendidos.

Um dos setores que se distingue na indústria automóvel portuguesa diz respeito ao fabrico de componentes [7]. Efetivamente, de forma a maximizar a produtividade e os preços envolvidos no processo produtivo, os fabricantes de automóveis optam por incorporar os componentes desenvolvidos por outras entidades nos seus veículos [8]. Através de dados fornecidos pela Associação de Fabricantes para a Indústria Automóvel (AFIA), foi possível elaborar a Tabela 2, que reúne as principais informações relativas à contribuição do setor de fabrico de componentes para a economia portuguesa.

Tabela 2 - Importância do setor do fabrico de componentes para a economia portuguesa à data de Novembro de 2021 [9].

	± 350 empresas	Correspondem a 0,9% das empresas de fabrico a nível nacional. Estão mais concentradas na zona norte do país (Aveiro, Porto e Braga).
	10,4 biliões de euros	Relativamente a 2020, a queda das receitas foi de 12,8%. Ainda assim, este valor contribui com 5,2% para o produto interno bruto (PIB).
	62 000 trabalhadores	Comparativamente a 2020, o setor emprega menos 0.1% dos trabalhadores. Entre 2015 e 2019, foram criados 14 000 postos de trabalho.
	8,6 biliões de euros	As exportações correspondem a 80% do volume de vendas e sofreram uma redução de 10,7% em relação a 2020. A Europa é a destinatária de 90,9% dessas exportações e 9,1% o resto do mundo.

2.1.3 Pilares da indústria automóvel

Por forma a ir de encontro às expetativas e exigências dos clientes, as empresas regem-se segundo indicadores que lhes permitem avaliar e comparar o seu desempenho à escala global. Os três principais pilares da indústria automóvel são competitividade, qualidade e prazos de entrega (Tabela 3).

Tabela 3 – Principais pilares da indústria automóvel.

Pilar	Descrição
Competitividade	<p>O conceito de competitividade tem sido alvo de grande foco ao longo das últimas décadas. Pode ser interpretada por níveis: micro, meso e macro. A micro competitividade consiste na capacidade de uma empresa produzir produtos/serviços que vão de encontro às expectativas do mercado em termos de preço, qualidade, entre outras. A meso competitividade está relacionada com a capacidade de uma região oferecer um ambiente atrativo e sustentável para as empresas e os residentes viverem e trabalharem. A macro competitividade é a capacidade de uma economia nacional produzir um ambiente propício às empresas para criarem, utilizarem e venderem os seus produtos/serviços, indo ao encontro dos requisitos competitivos internacionais. Tomando como referência estas definições, pode-se concluir que o setor automóvel é extremamente competitivo devido ao facto de ser um dos que mais contribuem para a economia nacional dos países [10].</p>
Qualidade	<p>Não existe uma definição única para qualidade, sendo um dos pilares bastante discutíveis na literatura. Existe autores que definem qualidade como sendo derivativa da perceção do cliente, isto é, tendo em conta a opinião destes em relação ao produto/serviço em questão. Outros interpretam-na como a quantidade e a natureza de recursos incorporados no produto/serviço. Ainda existem outros que definem qualidade como a capacidade de produzir produtos que estejam em conformidade com as especificações, sem a deteção de defeitos. Num setor competitivo como é o automóvel, não chega vender veículos com “zero defeitos”. De facto, outros fatores como a marca, a estética, entre outros, também influenciam a escolhas dos clientes. Portanto, um dos focos nesta área na procura da excelência passa por perscrutar a perceção de qualidade dos clientes [11].</p>
Prazos de entrega	<p>Os cumprimentos dos prazos de entrega no setor automóvel estão dependentes do esforço conjunto de todos os envolvidos no processo produtivo do veículo. Atualmente, a indústria vê os seus prazos de entrega de veículos influenciados pela falta de semicondutores, o que se irá traduzir na perda de dinheiro para as marcas [12].</p>

2.1.4 Componentes poliméricos

Os progressos significativos realizados pelos químicos durante o século XX na área dos polímeros sintéticos levaram à produção de materiais como os plásticos. Estes materiais, devido às suas propriedades únicas, são frequentemente a primeira escolha a ser considerada em muitas aplicações e ocupam um lugar de destaque no desenvolvimento tecnológico do mundo moderno [13].

2.1.4.1 Aplicação dos polímeros nos automóveis

A aplicação de materiais de cariz polimérico na estrutura de um automóvel tem vindo a revelar-se ao longo do tempo um fator imperial neste setor. A principal razão de o ser deve-se à possibilidade de redução da massa dos componentes, o que se traduz em automóveis mais leves e económicos. Estima-se que cada diminuição em 10% da massa total do automóvel resulta numa poupança entre 5 a 7% dos consumos de combustível [14].

Na Figura 3 visualizam-se alguns dos componentes de natureza polimérica do exterior e interior de um automóvel.

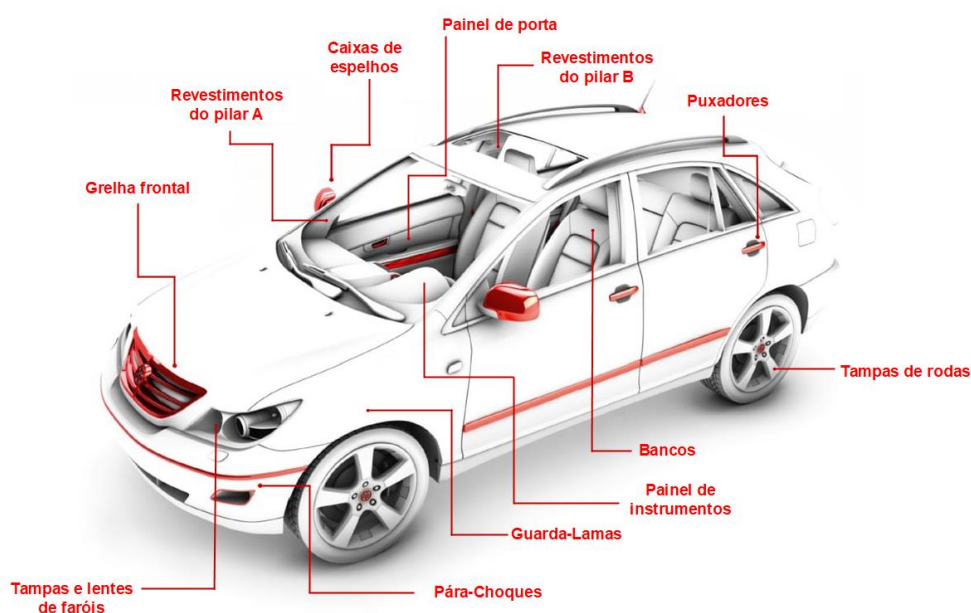


Figura 3 – Componentes de cariz polimérico na estrutura de um automóvel (adaptado de [15]).

Cada um destes componentes irá desempenhar uma determinada função na estrutura, o que servirá como primeiro passo para determinar qual o material plástico mais apropriado a ser utilizado em cada um deles [16]. Na Tabela 4 apresentam-se sucintamente essas funcionalidades/requisitos para alguns dos componentes mais relevantes, bem como o leque de materiais que os podem constituir.

Tabela 4 – Funcionalidades e gama de materiais plásticos aplicados a componentes automobilísticos [17].

Componente	Função	Requisitos	Materiais
Para-choques	Limitar os danos provocados por um eventual acidente. Melhorar a estética do automóvel. Servir como proteção para a maior parte dos componentes do corpo do veículo como grelha do radiador, motor, entre outros [18].	Resistente ao impacto. Deformável e resiliente. Leve. Reciclável.	Polipropileno (PP), <i>Acrylonitrile butadiene styrene</i> (ABS) – alto impacto, Poliuretano (PU), Policarbonato (PC), Polietileno de baixa densidade (PEBD), <i>Thermoplastic polyolefin</i> (TPO), compósitos de matriz polimérica.
Tampas de rodas	Proteger a roda e os seus elementos contra condições atmosféricas adversas. Melhorar a estética do automóvel.	Resistentes à corrosão. Leves. Facilmente decoráveis.	ABS (Material preferencial), ABS/PC, TPO, Poliamida 6 (PA 6), <i>Acrylonitrile styrene acrylate</i> (ASA).
Tampas e lentes de faróis	Manter intacto o feixe luminoso do automóvel.	Resistentes à corrosão, à temperatura e ao impacto. Tenazes. Possuir boas propriedades óticas. Devem ser transparentes.	Polimetilmetacrilato (PMMA), Polieterimida (PEI) e PC com revestimento (lentes). ABS, ASA e PP (tampas).
Painel de instrumentos	Compreende vários componentes (velocímetro, indicador do nível do combustível, entre outros) que fornecem um conjunto de informações acerca do estado de condução [19].	Rigidez elevada. Resistência a temperaturas elevadas e à radiação ultravioleta (UV). Leve. Resiliente.	PP, TPO, ABS, ABS/PC, PU, <i>Polyvinyl chloride</i> (PVC)/ABS.
Revestimento de painel de porta	Absorver ruídos e vibrações externas. Providenciar conforto e espaço de armazenamento aos passageiros. Melhor a estética do automóvel. Ajudar na proteção dos passageiros contra acidentes laterais [20, 21]	Rígidos. Bons absorsores de energia. Leves. Resistentes à corrosão. Boa integridade estrutural [20, 21].	PVC, Espuma de PU com revestimento têxtil, PP suportado por têxteis, ABS, TPO e compósitos de matriz polimérica.
Revestimentos de pilares	Minimizar o risco de lesões na zona cerebral do passageiro em caso de incidente [22].	Elevada resistência ao impacto. Elevada absorção de energia cinética [22].	PP, Politereftalato de etileno (PET), mistura de PET-Poliamida (PA).
Coberturas de bancos	Providenciar conforto ao passageiro.	Resistência à abrasão, temperatura, radiação UV, humidades, ao choque e à fadiga.	Poliéster/PU.

2.1.4.2 Processos de fabrico para componentes poliméricos

São várias as tecnologias utilizadas no processamento de materiais poliméricos. No que diz respeito à produção de componentes poliméricos para um automóvel, existem alguns processos que são mais comuns: moldação por injeção, moldação por sopro, moldação por compressão e extrusão (Tabela 5).

Tabela 5 – Tecnologias mais comuns no processamento de componentes para a indústria automóvel.

Tecnologia	Descrição
Moldação por injeção	A moldação por injeção corresponde a um dos processos mais predominantes no setor automóvel, devido à sua versatilidade produtiva, capacidade de automatização, elevadas taxas de produção e elevada precisão dimensional dos componentes produzidos. O processo consiste na injeção de material fundido sob pressão na cavidade de um molde com a geometria do produto final. Alguns dos componentes de um veículo produzidos a partir deste processo são para-choques, guarda-lamas, grelhas frontais, painéis de porta, puxadores, <i>dashboards</i> , entre outros.
Moldação por sopro	Esta técnica é considerada a terceira tecnologia mais utilizada no fabrico de componentes poliméricos, a seguir à moldação por injeção e extrusão. É frequentemente utilizada na indústria automóvel para a produção de componentes ocios, como por exemplo reservatórios de combustível [23]. O seu princípio de funcionamento consiste na insuflação de ar comprimido para o interior de uma pré-forma até esta tomar a forma do molde. Podem ser distinguidos dois tipos: moldação por sopro via extrusão e moldação por sopro via injeção. O processo é semelhante nos dois tipos, a única diferença está na maneira de produzir a pré-forma e na qualidade superficial dos produtos (via injeção, a qualidade é superior). Outros exemplos de componentes produzidos por este processo são <i>dashboards</i> , <i>spoilers</i> , vasos de expansão, consolas, guarda-lamas, entre outros [24].
Moldação por compressão	Este processo é um dos primeiros métodos utilizados no processamento de materiais poliméricos. O seu princípio de funcionamento consiste no aquecimento de uma resina termoendurecível, sob pressão, dentro da cavidade de um molde até que a resina cure através de reações químicas. Através da pressão do macho, a resina liquidifica e flui, tomando a forma da cavidade do molde. A utilização desta técnica é adequada para o fabrico de componentes em que é necessária boa resistência mecânica e durabilidade. Comparada com as outras técnicas, a moldação por compressão possui capacidade de ser automatizada, e apresenta um custo de ferramentas e um tempo de ciclo moderados. Algumas aplicações em automóveis são: painéis exteriores, para-choques, capôs, entre outros [25].
Extrusão	O processo envolve forçar um fundido polimérico através de uma fiação com uma geometria particular para produzir componentes contínuos e de secção constante [24]. A extrusão é utilizada no revestimento de cabos, tubos, borrachas de vedação da porta e dos vidros, entre outros.

2.2 Injeção de plásticos

Introduzida pelos irmãos Hyatt para a produção de bolas de bilhar, a injeção de plásticos é, nos dias que decorrem, a tecnologia utilizada para a produção de mais de um terço dos produtos poliméricos a nível mundial [26]. Este processo encontra-se entre os preferidos da indústria por possibilitar a conceção de produtos com geometrias complexas, num curto tempo e com boa precisão dimensional [27].

2.2.1 Caracterização do processo

A moldação por injeção tem como princípio de funcionamento a injeção de material polimérico fundido no interior da cavidade de um molde (Figura 4).

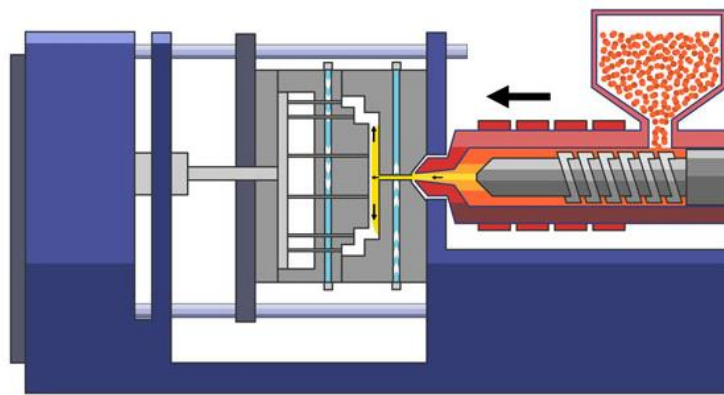


Figura 4 – Princípio de funcionamento do processo de moldação por injeção [28].

Um ciclo típico neste processo envolve quatro etapas principais: plasticização, injeção, arrefecimento e ejeção [29]. Através da Figura 5, é possível perceber numa perspetiva temporal a sequência de etapas ocorridas durante um ciclo.

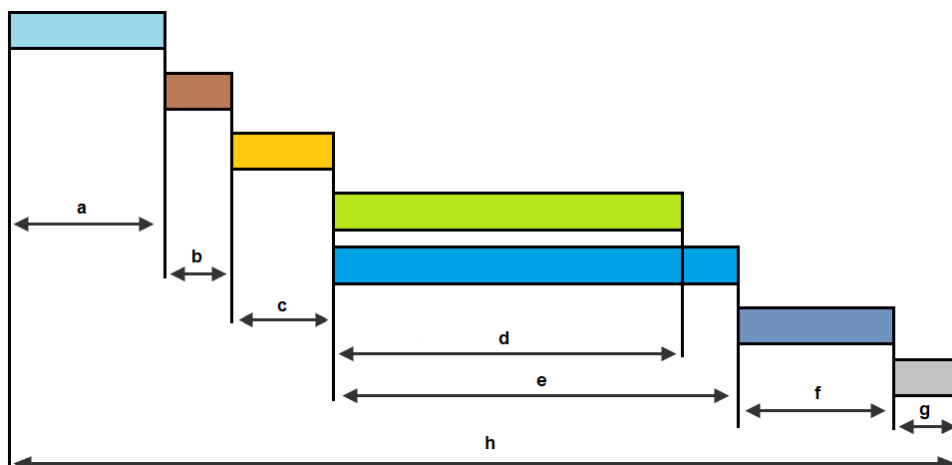


Figura 5 -Etapas ocorridas durante um ciclo de injeção: a) fecho do molde; b) injeção; c) pressão de compactação; d) plasticização; e) arrefecimento; f) abertura do molde e ejeção; g) tempo morto; h) tempo de ciclo.

Na Tabela 6 descreve-se a funcionalidade de cada etapa apresentada na Figura 5.

Tabela 6 – Funcionalidade das etapas constituintes de um ciclo de injeção [30].

Etapa	Função
Fecho do molde (a)	Deve ser feito no menor tempo possível, apesar das limitações impostas pela inércia dos moldes.
Injeção (b)	O material uma vez plastificado é injetado, sob a ação do parafuso, dentro da cavidade do molde com uma determinada pressão e velocidade.
Pressão de compactação (c)	Pressão aplicada com o intuito de contrariar a contração do produto no momento do arrefecimento. Varia entre 40 e 80% do valor da pressão de injeção.
Plasticização (d)	A matéria-prima é fundida e homogeneizada devido à ação de rotação do parafuso que faz com que os granulados entrem em contato com as paredes aquecidas do cilindro.
Arrefecimento (e)	Ocupa cerca de 70-80% do tempo de um ciclo de injeção [31].
Abertura do molde e ejeção (f)	Uma vez concluída a etapa de arrefecimento, a peça é extraída do molde.
Tempo morto (g)	Período de tempo entre o momento em que a peça está pronta a ser extraída do molde e o início do ciclo seguinte.
Tempo de ciclo (h)	Corresponde ao período constituído por todas as etapas anteriores.

Existem diversos fatores que podem influenciar a qualidade dos componentes injetados. Na generalidade dos casos, estes fatores estão diretamente relacionados com as condições utilizadas no processo de injeção e das propriedades dos materiais utilizados [32]. Algumas das condições mais importantes são:

- Temperatura do molde;
- Temperatura de fusão do material;
- Pressão de injeção;
- Velocidade de injeção;
- Tempo de injeção;
- Tempo de arrefecimento;
- Pressão de compactação;
- Tempo de ciclo;
- Força de fecho do molde.

Farotti e Natalini [33] realizaram um estudo com o objetivo de expor a influência que parâmetros como a temperatura de fusão do material, a temperatura do molde, a pressão de compactação e o tempo de arrefecimento possuem nas propriedades

mecânicas de provetes de PP comercial injetados para a realização de ensaios. Através de ensaios de tração, os autores concluíram que a resistência mecânica do material aumenta com o aumento da temperatura do molde. No entanto, temperaturas muito elevadas podem causar grandes volumes de contração na etapa de ejeção do componente, levando à criação de vazios no componente. Com o aumento da pressão de compactação, atinge-se o máximo da resistência mecânica numa fase intermédia. A correta otimização destes parâmetros é, portanto, a forma mais eficiente de produzir produtos de alta qualidade e precisão, reduzir a probabilidade do surgimento de defeitos frequentemente associados à injeção de plásticos, e desta forma evitar custos adicionais [34]. Na Tabela 7 encontram-se alguns defeitos típicos influenciadores da qualidade do produto final.

Tabela 7 - Defeitos típicos nos componentes fabricados pelo processo de moldação por injeção.

Defeito	Descrição	Imagem
Linhas de soldadura	As linhas de soldadura são marcas na superfície da peça resultantes da interseção de frentes de fluxo distintas na fase de enchimento da cavidade do molde (Figura 6). A eliminação destes defeitos, dependendo da complexidade da peça, pode tornar-se uma tarefa impossível, devido à necessidade de vários pontos de injeção. As linhas de soldadura provocam problemas estruturais e levam à redução da qualidade superficial da peça, constituindo um motivo para a rejeição de componentes injetados por parte dos clientes no setor automóvel [35].	
Rebarba	A rebarba surge da acumulação de excesso de material, geralmente na linha de divisão da cavidade moldante, nos canais de ventilação ou na zona dos extratores, devido à expulsão do material fundido para o exterior da cavidade do molde durante o processo de injeção (Figura 7). Este defeito resulta, normalmente, da baixa viscosidade do material, do desalinhamento das superfícies do molde, da elevada velocidade de injeção ou da insuficiente força de fecho do molde [37].	

Figura 6 - Linha de soldadura [36].

Figura 7 - Rebarba gerada num produto processado por moldação por injeção.

Os chupados são depressões ocorridas na superfície da peça devido a diferentes níveis de contração, durante a fase de arrefecimento. Este tipo de defeito é frequentemente visualizado em zonas do componente com diferentes espessuras de material (Figura 8). Os chupados impactam a qualidade estética do produto e requerem custos adicionais se forem detetados numa fase avançada da produção [38].

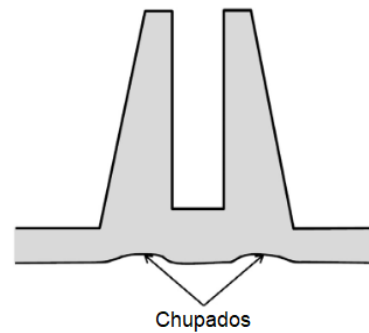


Figura 8 - Chupados ocorridos numa zona de reforço (adaptado de [38]).

Os empenos são considerados um dos principais defeitos de produtos processados através da moldação por injeção e são provocados devido à contração não uniforme em diferentes áreas ou direções no componente (Figura 9). A durabilidade e a aparência das peças moldadas são afetadas pelos defeitos de empeno [39].

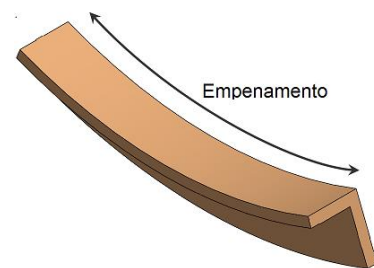


Figura 9 - Defeito de empenamento a uma escala exagerada.

2.2.2 Constituição de um molde

Um molde para injeção de plásticos é um sistema complexo que compreende múltiplos componentes sujeitos a ciclos repetitivos de temperatura e tensões. Os moldes de injeção mais simples e comuns são designados de moldes de “duas placas”, constituídos por uma parte móvel e uma parte fixa (Figura 10), e será a tipologia à qual se fará referência nos próximos subcapítulos [40].

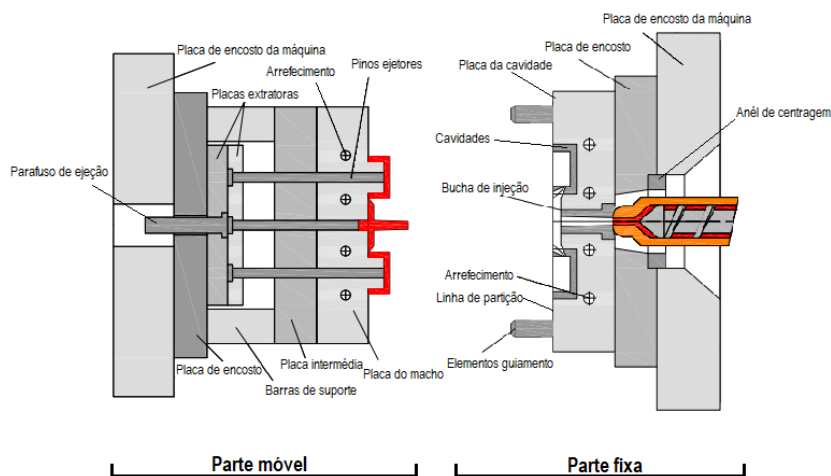


Figura 10 – Molde de duas placas e os seus vários componentes (adaptado de [40]).

Com base na Figura 10, apresentam-se de seguida mais detalhadamente os componentes e sistemas mais importantes integrantes da estrutura do molde.

Sistema de extração

O sistema de extração está inserido na parte móvel do molde, compreendido entre a placa de encosto, a placa intermédia e as barras de suporte, e é responsável por desmoldar as peças plásticas findado o processo de injeção. Dependendo da geometria e do tamanho das peças injetadas, vários sistemas de extração podem ser utilizados para realizar a desmoldagem, tais como pinos ejetores, placas extratoras, ejetor “cogumelo” e válvulas de ar [40, 41]. No entanto, quando se trata de componentes plásticos complexos que incorporem frisos (*ribs*) ou áreas de difícil remoção, é recomendada a utilização de pinos ejetores (Figura 11) [42].

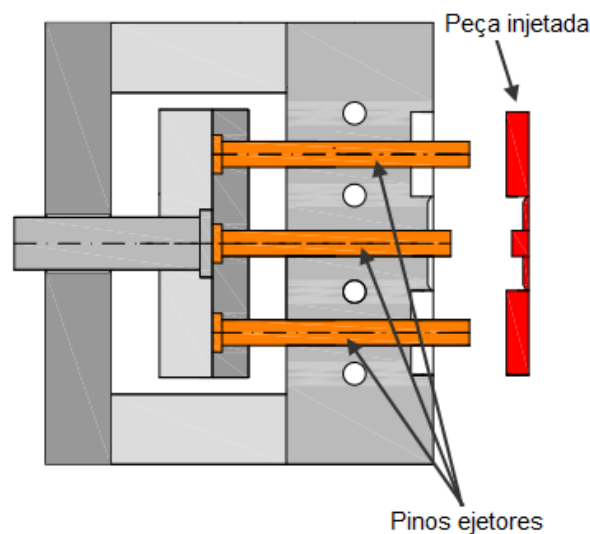


Figura 11 – Sistema de extração que utiliza pinos ejetores (adaptado de [40]).

Bucha de injeção

Este componente encontra-se na parte fixa e é responsável por interligar o bico da máquina injetora com o molde, pelo que se deve encontrar bem conectado de forma a não haver quedas de pressão no molde. A bucha de injeção deve ser selecionada de acordo com os diferentes tipos de bicos existente [43] (Figura 12).

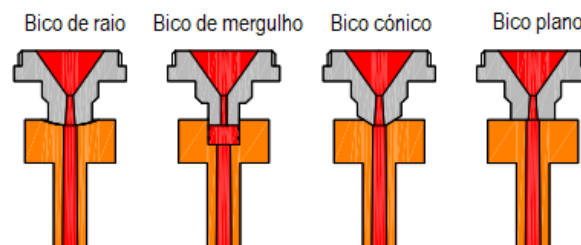


Figura 12 – Diferentes buchas de injeção de acordo com o tipo de bico de injeção (adaptado de [40]).

Sistema de alimentação

O sistema de alimentação é todo o conjunto de canais que o fluido percorre até chegar à cavidade e compreende a bucha, os canais de distribuição e o ponto de injeção. Dependendo do número de cavidades, do material utilizado e da geometria da peça, existem diferentes tipos de alimentação aos quais se pode recorrer [44]. Na Figura 13 estão demonstrados dois tipos de alimentação comuns em moldes com uma cavidade e múltiplas cavidades.

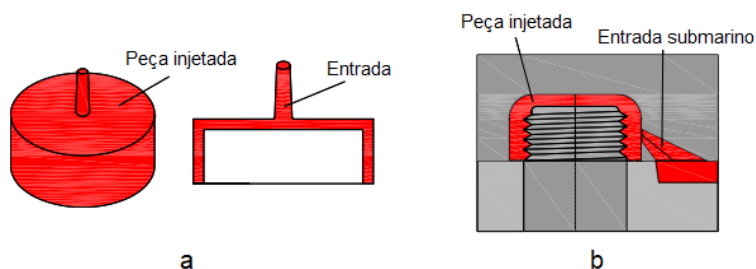


Figura 13 – Sistemas de alimentação: a) direta; b) submarino (sistema de injeção indireta) (adaptado de [40]).

Sistema de guiamento

O incorreto guiamento durante o fecho das duas partes do molde provoca diferentes espessuras nas peças injetadas. Atualmente, a maior parte dos moldes de injeção são retangulares, o que permite a colocação de elementos de guiamento nos quatro cantos da parte fixa, três deles com diâmetros iguais e um com diâmetro diferente para evitar montagens incorretas (Figura 14). A precisão do sistema de guiamento, um fator de grande relevância no processo, de tal forma que, se houver um desfasamento superior a 0,02 mm entre os elementos de guiamento, localizados na parte fixa e na parte móvel do molde, este terá dificuldade em realizar o fecho [45].

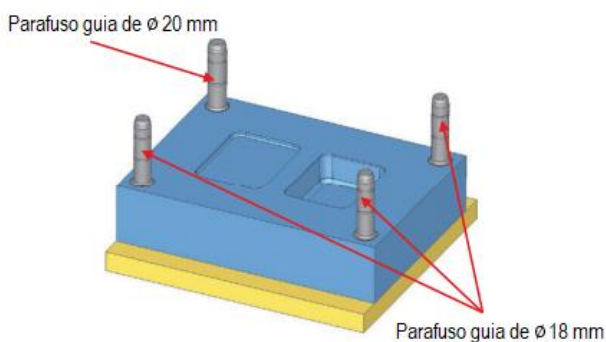


Figura 14 – Sistema de guiamento anti rotação (adaptado de [45]).

2.2.3 Projeto de moldes

O projeto de moldes é uma tarefa complexa e morosa e envolve um elevado número de intervenientes de diferentes áreas. Em muitas situações os projetistas recorrem a projetos bem sucedidos do passado para pouparem tempo e esforços acrescidos no

desenvolvimento de uma nova ferramenta [46]. Numa primeira fase, com o componente plástico definido em termos de geometria, material e dimensões, o responsável pelo projeto realiza uma análise geral dos desenhos técnicos com o intuito de validar se a peça cumpre os requisitos para ser produzida pelo molde. Segue-se a fase de dimensionamento, onde um dos primeiros aspetos a ter em conta é a determinação do número de cavidades, que influenciará diretamente as dimensões da máquina injetora e do molde. A definição da linha de partição deve ser escolhida cuidadosamente visto que esta restringe as zonas moldadas pela cavidade e pelo macho [47]. Outros fatores importantes no dimensionamento prendem-se com a escolha dos canais de alimentação, a seleção do tipo de ejeção, os sistemas de arrefecimento, as dimensões das placas, o padrão de furos, entre outros aspetos. Realizado o dimensionamento dos elementos constituintes do molde, o próximo passo passa pelo desenho e respetiva fase de simulações com o auxílio de ferramentas computacionais. Antes da produção final, é aconselhada a reunião com os clientes para esclarecimento de todos os detalhes associados ao projeto [40, 41, 45]. Na Figura 15 apresentam-se as etapas sequenciais mais importantes que integram o projeto de moldes.

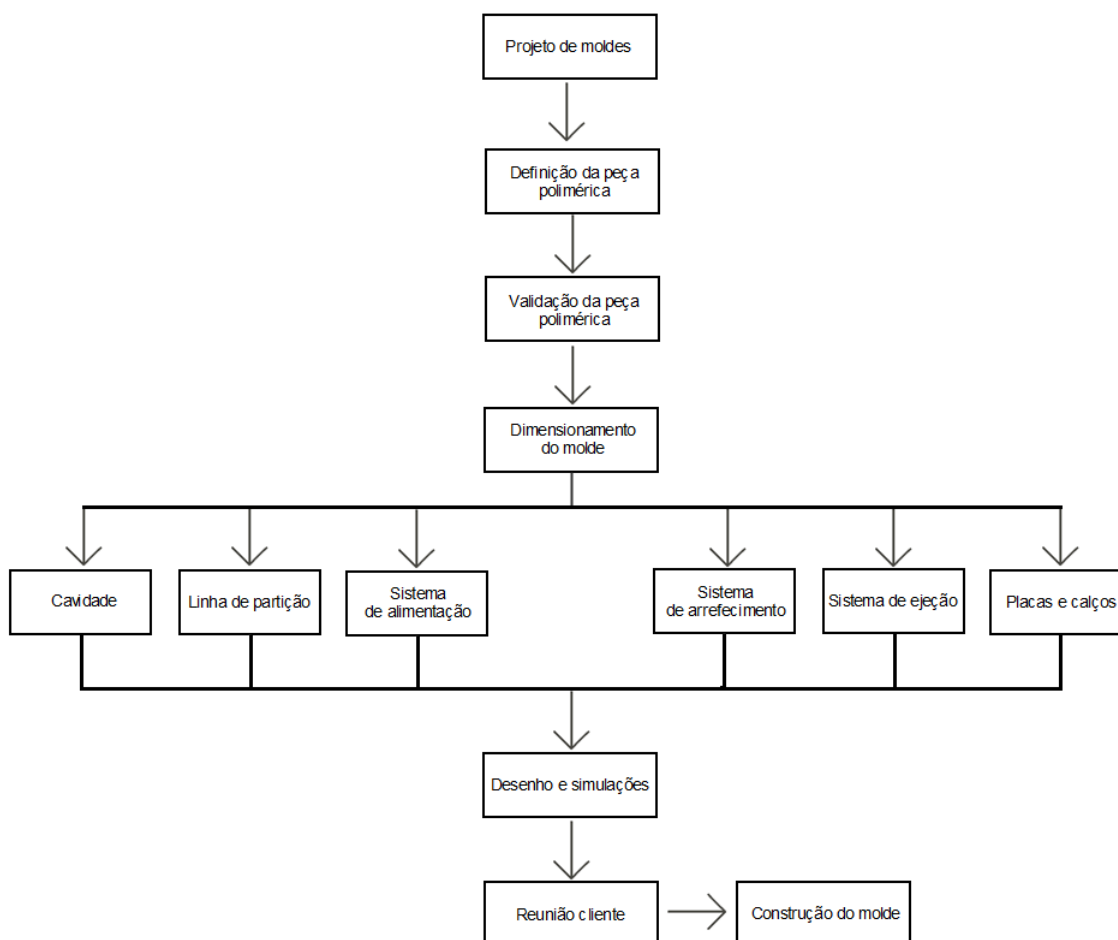


Figura 15 - Algumas etapas no projeto de moldes.

2.2.4 Dimensionamento de moldes

Devido à complexidade e imensidão de cálculos utilizados no dimensionamento de um molde, nos próximos subcapítulos serão apenas apresentadas algumas boas práticas.

2.2.4.1 Força de fecho

A força de fecho permite manter o molde fechado durante a injeção do material polimérico e pode ser obtida através da equação (1) [48]

$$F_f = A_p \times P_i \times N_{cav} \times k \times F_s, \quad (1)$$

onde:

F_f é a força de fecho do molde (N);

A_p é a área projetada da cavidade preenchida pelo material fundido (mm²);

P_i é a pressão de injeção na cavidade (MPa);

N_{cav} é o número de cavidades;

k é a constante relativa à viscosidade do material;

F_s é o fator de segurança.

2.2.4.2 Número de cavidades

O número de cavidades pode ser determinado através da capacidade de injeção da máquina injetora e é dado pela equação (2) [48]

$$N_{cav} = \frac{0,85 \times m}{C_i} \quad (2)$$

onde:

N_{cav} é o número de cavidades;

m é a massa do componente polimérico (kg);

C_i é a capacidade de injeção (kg).

2.2.4.3 Entrada de injeção

A entrada de injeção permite a entrada do material fundido na cavidade do molde vindo dos canais de alimentação (Figura 16).

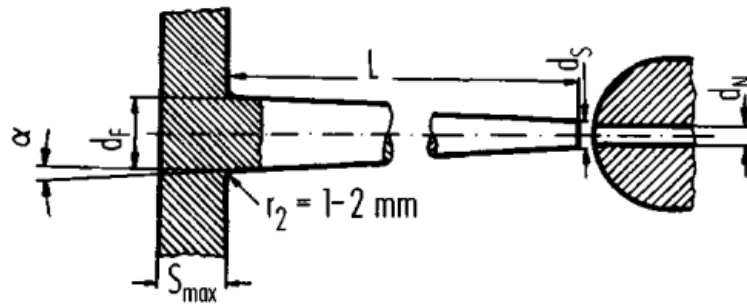


Figura 16 – Entrada de injeção mais simples ([49]).

Esta deve estar posicionada na secção transversal mais espessa do componente moldado. Simultaneamente, o diâmetro de entrada (d_F), que deve ser superior à espessura da secção transversal do componente moldado ($S_{m\acute{a}x}$), é dado pela equação (3) [49]

$$d_F \geq S_{m\acute{a}x} + 1,0 \text{ (mm)}. \quad (3)$$

De igual forma, o diâmetro do orifício do bico (d_N) deve ser inferior ao diâmetro em direção ao bocal (d_S) e é dado pela equação (4) [49]

$$d_S \geq d_N + 1,5 \text{ (mm)}. \quad (4)$$

Para facilitar a desmoldagem, a entrada de injeção deve apresentar um ângulo entre 1 e 4 graus [49].

2.2.4.4 Contração do material

O valor da contração do material é de crucial importância para o projetista do molde, pois é esta variável que vai definir a compensação a ser dada à cavidade em relação às dimensões da peça moldada final [50]. Segundo a norma DIN 16742 [51], a contração resultante do processo de injeção (VS) é calculada por meio da diferença relativa entre a dimensão do contorno da ferramenta (L_W) a $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ e as respectivas dimensões da peça plástica moldada (L_F), 16 a 24 h depois da produção, através da equação (5)

$$VS = \left(1 - \frac{L_F}{L_W}\right) \times 100\%. \quad (5)$$

2.3 Projeto de componentes poliméricos para a indústria automóvel

O projeto de componentes poliméricos para a indústria automóvel requer a coordenação e um esforço conjunto de todas as partes envolvidas na conceção do produto final. A falta de comunicação entre áreas pode levar ao não cumprimento dos requisitos de qualidade da peça final impostos/expectáveis pelo cliente.

2.3.1 Regras de projeto

Naquilo que diz respeito à fase de desenvolvimento, existem algumas regras básicas de *design* que devem ser tomadas em consideração pelos projetistas para no futuro evitar defeitos aquando do processamento dos componentes poliméricos. Alguns dos parâmetros mais importantes são:

- Espessura de parede;
- Frisos (*ribs*);
- Raios;
- Ângulos de saída.

2.3.1.1 Espessura de parede

A espessura de parede deve ser uniforme em toda a peça. Diferentes volumes de material resultam em diferentes tempos de arrefecimento na cavidade do molde, o que provocará diferentes níveis de contração (Figura 17) e conduz conseqüentemente à ocorrência de deformações e empenos na peça [52].

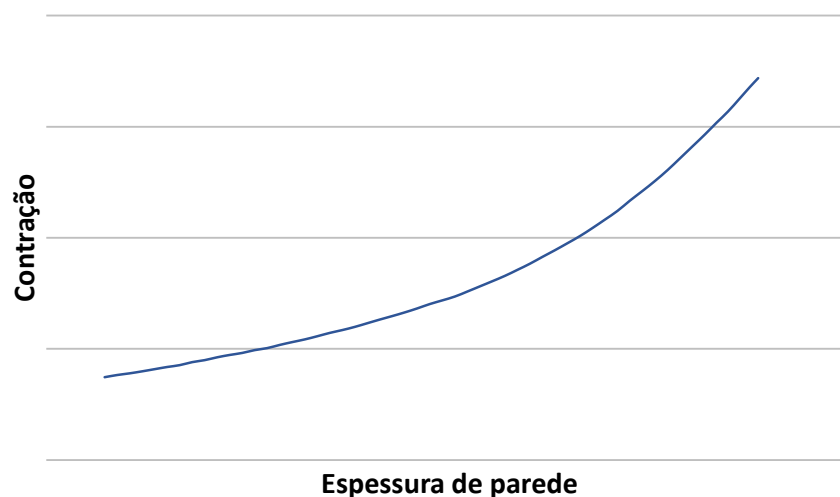


Figura 17 – Evolução da contração do material com o aumento da espessura de parede (adaptado de [52]).

Tipicamente, as espessuras da maioria dos produtos poliméricos situam-se entre os 0,5 mm e os 4 mm. No entanto, esta escolha não é linear e terá de ter em conta fatores como o comprimento da peça ou o material a ser utilizado (Tabela 8). Normalmente, espessuras de parede inferiores a 0,5 mm e superiores a 8 mm terão problemas no processo de enchimento [53, 54].

Tabela 8 – Espessuras de parede recomendada para diferentes materiais poliméricos (adaptado de [54]).

Material	Espessura de parede recomendada [mm]
ABS	1,14 - 3,56
Acrílico	0,64 - 12,7
Plásticos reforçados com fibras longas	1,91 - 25,4
Poliuretano	2,032 - 19,05
Polycarbonato	1,01 - 3,81
Poliéster	0,64 - 3,18
Poliétileno	0,76 - 5,08
Polipropileno	0,64 - 3,81
Poliestireno	0,89 - 3,81

2.3.1.2 Frisos (ribs)

Uma das desvantagens dos materiais poliméricos é a sua baixa resistência mecânica quando comparados, por exemplo, com os metais. Para colmatar esta limitação, os projetistas idealizam geometrias com vista a aumentar a rigidez dos componentes (Figura 18) [55].

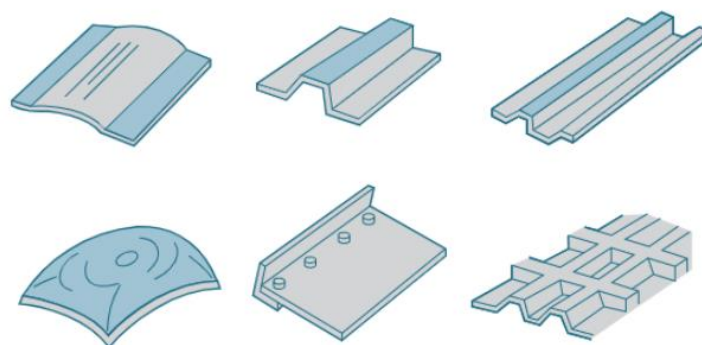


Figura 18 - Exemplos de geometrias utilizadas para aumentar a rigidez de componentes plásticos (adaptado de [56]).

Os frisos (*ribs*), apesar de aumentarem a rigidez do componente, acarretam custos associados à mudança dos contornos da cavidade do molde e potenciam a origem de

chupados na peça devido à variação de espessura na proximidade do friso [52]. Na Figura 19 demonstram-se algumas recomendações na concepção destes elementos, cuja maior eficiência pode ser obtida com o aumento da altura ao invés da largura [55].

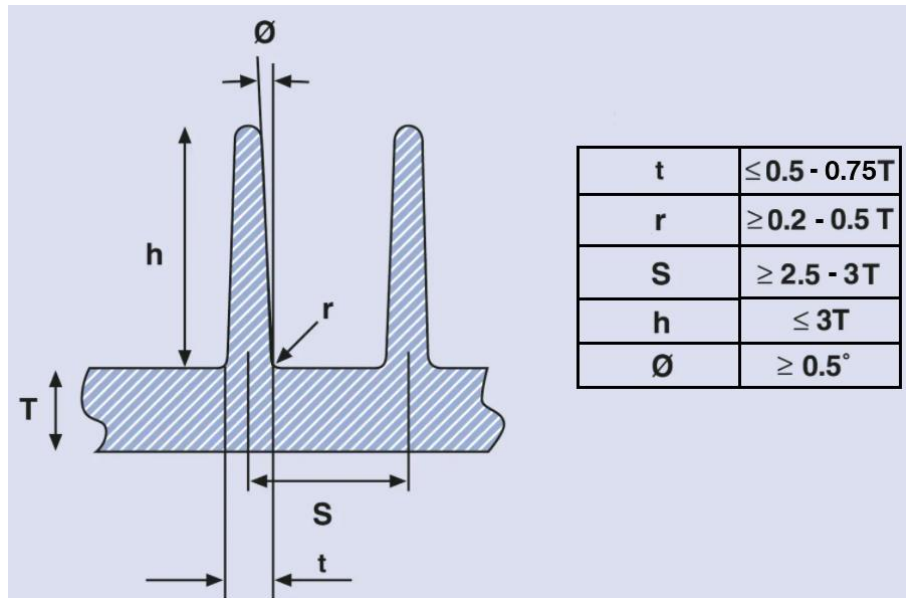


Figura 19 – Recomendações a seguir na concepção de frisos (adaptado de [55, 57]).

Segundo a Figura 19, devem ser cumpridas as seguintes recomendações:

1. A espessura do friso deve estar compreendida entre 50 e 75% da espessura de parede do componente;
2. A altura do friso não deve exceder três vezes a espessura de parede do componente;
3. Deve ser aplicado um ângulo de pelo menos $0,5^\circ$ por forma a facilitar a desmoldagem;
4. Devem ser aplicados na base do friso raios de valor compreendido entre 20 e 50% da espessura de parede da peça, com o intuito de reduzir a concentração de tensões nessa zona;
5. O espaçamento entre dois frisos paralelos deve ser pelo menos 2,5 a 3 vezes a espessura de parede da peça.

2.3.1.3 Raios

Devem ser evitadas arestas “vivas” uma vez que são zonas de concentração de tensões. Na Figura 20 apresenta-se a curva típica da variação do fator de concentração de tensões em função do rácio raio/espessura.

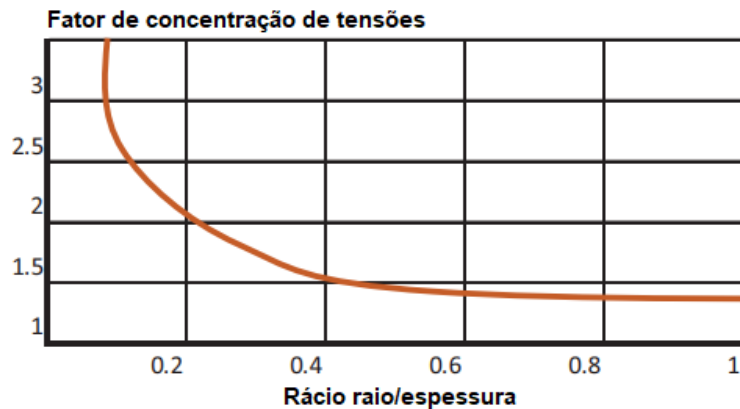


Figura 20 - Fator de concentração de tensões *versus* rácio raio/espessura (adaptado de [55])

Quanto menor for o raio utilizado maior será o fator de concentração de tensões. Deste modo, a colocação de raios é um parâmetro necessário, sendo as dimensões recomendadas em função da espessura de 0,25 a 0,50 mm para raios interiores (R1) e 1,25 a 1,50 mm para raios exteriores (R2) (Figura 21) [55].

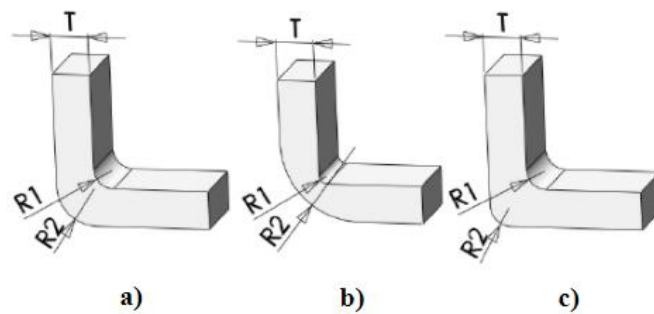


Figura 21 – Recomendações para a colocação de raios: a) bom *design*; b) muito fino; c) muito espesso (adaptado de [54]).

2.3.1.4 Ângulos de saída

Os ângulos de saída servem, geralmente, para facilitar a desmoldagem da peça na fase de ejeção do processo de injeção (Figura 22).

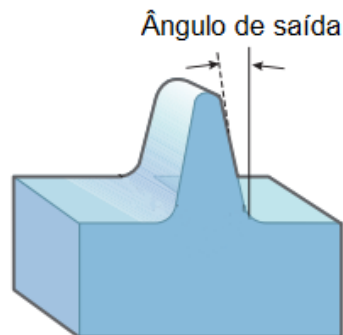


Figura 22 – Ilustração de um ângulo de saída (adaptado de [58]).

A escolha de um ângulo de saída depende de vários fatores, tais como o nível de contração do material, a textura da superfície ou a altura e forma da parede a aplicar o ângulo. Tipicamente ângulos compreendidos entre 1 e 3° são os recomendados. No entanto, para superfícies sem textura um ângulo mínimo de 0,5° é o aconselhado [59].

2.3.2 Soluções para fixações de componentes

A complexidade geométrica dos componentes poliméricos da estrutura de um automóvel requer metodologias de fixação eficientes, capazes de oferecer flexibilidade e garantias aos projetistas na fase de desenvolvimento dos produtos. Através de uma análise geral da literatura, são várias as tecnologias utilizadas e adequadas para a fixação de componentes poliméricos, podendo estas ser agrupadas em ligações mecânicas, ligações adesivas, ligações soldadas e ligações híbridas (Figura 23) [60].

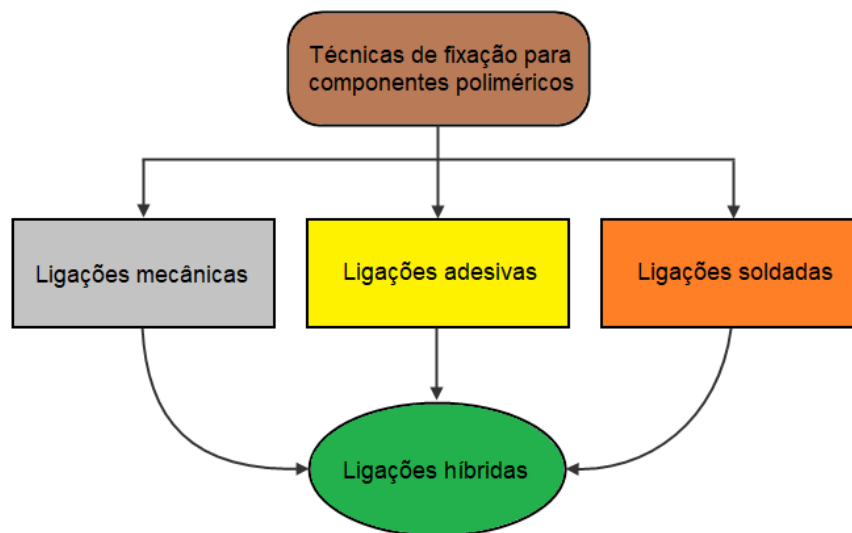


Figura 23 -Principais técnicas de fixação de componentes poliméricos.

A escolha da fixação para uma determinada aplicação deve ter em consideração vários aspetos importantes, tais como a intensidade e o tipo de carga aplicada na ligação, a geometria dos componentes, o ambiente a que vai estar sujeita a ligação, a necessidade de desmontagem para manutenção ou reparação dos componentes, os custos de montagem, entre outros [61]. Nos próximos subcapítulos, são abordadas as técnicas mencionadas na Figura 23, com especial incidência nas ligações mecânicas.

2.3.2.1 Ligações mecânicas

A utilização de ligações mecânicas para a fixação de materiais plásticos é cada vez mais recorrente no *design* dos novos automóveis [62]. Neste tipo de ligação, a conexão entre componentes (de material similar ou dissimilar) é feita recorrendo a elementos

auxiliares tais como parafusos, rebites, pinos, *clips*, *snap-fits*, entre outros [61, 63]. Na Figura 24 apresenta-se um exemplo prático de alguns elementos mecânicos frequentemente utilizados para interligar um painel à estrutura metálica da porta de um automóvel [64].

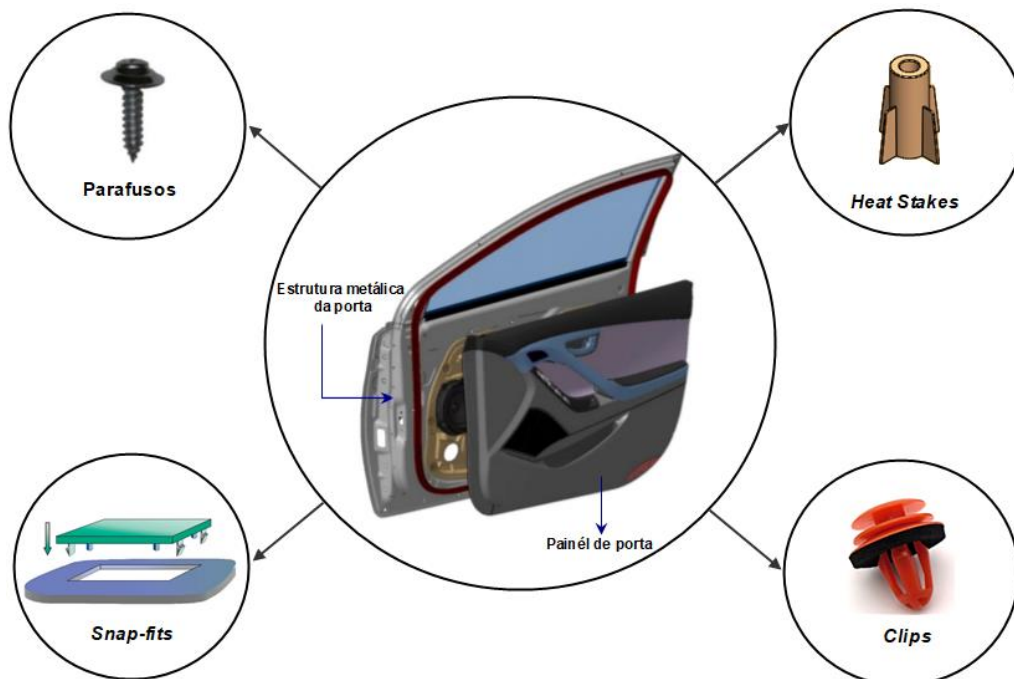


Figura 24 – Elementos mecânicos mais utilizados para a fixação do painel de porta à estrutura metálica da porta (adaptado de [21, 65-67]).

Na Tabela 9 enumeram-se as principais vantagens que favorecem a escolha de alguns elementos mecânicos por parte dos projetistas e as desvantagens que levam à necessidade de procura de alternativas.

Tabela 9 – Principais vantagens e desvantagens das ligações mecânicas [64, 68, 69].

Vantagens	Desvantagens
Permitem a junção de materiais dissimilares.	Pontos de concentração de tensões devido à necessidade de furos (parafusos, rebites, pinos, entre outros).
Permitem a desmontagem e a montagem sem comprometer a integridade do conjunto.	Contribuem para o aumento do peso, do custo e do tempo de montagem (parafusos, rebites, entre outros).
Apresentam <i>design</i> simples e são económicos no processo de montagem (<i>snap-fits</i>).	Necessidade de componentes auxiliares (<i>lifters</i>) no sistema de injeção (<i>snap-fits</i>).

Snap-fits

Na indústria automóvel, a maior parte dos componentes poliméricos do interior e do exterior do veículo são conectados recorrendo à metodologia *snap-fit*. Durante o processo de inserção um dos componentes possui elementos integrantes, disponíveis em diferentes configurações tais como ganchos, esferas, cones, entre outros, que deformam elasticamente até encontrarem um rebaixo (*undercut*), furo ou depressão no outro componente, altura em que o material retorna ao seu estado normal, o que permite assim a ligação do conjunto [70] (Figura 25).

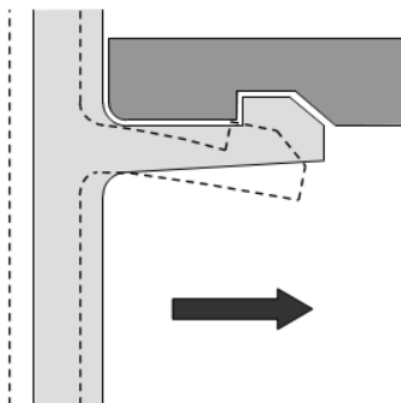


Figura 25 – Princípio de funcionamento da metodologia *snap-fit* (adaptado de [71]).

Esta categoria de *snap-fits*, denominados de “*integral snap-fit joints*”, segundo o conceito de *design for assembly* (DFA), deve ser uma alternativa utilizada em detrimento de elementos mecânicos, tais como parafusos, rebites, entre outros que eventualmente poderão apresentar folgas para a ligação [72]. Os três tipos mais comuns são: *cantilever snap-fit joints* (Figura 26 – a), *torsion snap-fit joints* (Figura 26 – b) e *annular snap-fit joints* (Figura 26 – c) [73].

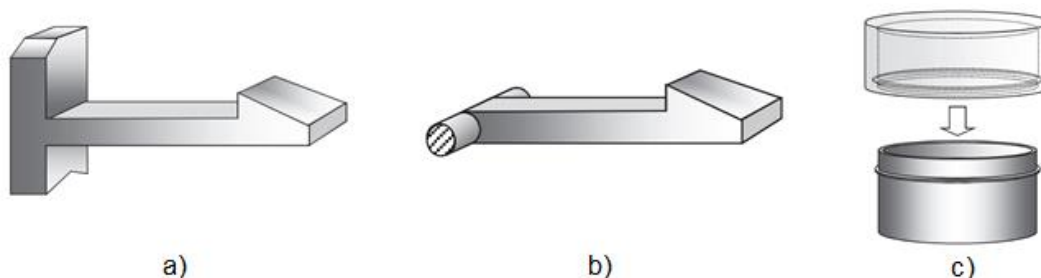


Figura 26 – Tipologias mais comuns dos *integral snap-fit joints* : a) *cantilever snap-fit joints*; b) *torsion snap-fit joints*; c) *annular snap-fit joints* (adaptado de [66]).

Na Tabela 10 mencionam-se as principais vantagens e desvantagens na utilização desta categoria de *snap-fits*.

Tabela 10 - Principais vantagens e desvantagens dos *integral snap-fit joints* [70, 73, 74].

Vantagens	Desvantagens
Método rápido, fácil e eficiente na junção de componentes poliméricos.	Apresentam menor capacidade de carga quando comparados com os clips metálicos.
Não necessitam de ferramentas ou elementos auxiliares no processo de montagem.	Apresentam menor resistência mecânica quando comparados com os <i>clips</i> .
Quando bem projetados, providenciam menos folgas comparativamente a outros elementos mecânicos.	Necessitam de elementos rígidos localizados que façam o guiamento.

Clips

Os *clips* são pequenos componentes, com diferentes geometrias e de diferentes materiais (metálicos, plásticos ou compósitos), frequentemente utilizados para conectar componentes poliméricos à estrutura metálica do automóvel [75] (Figura 27).

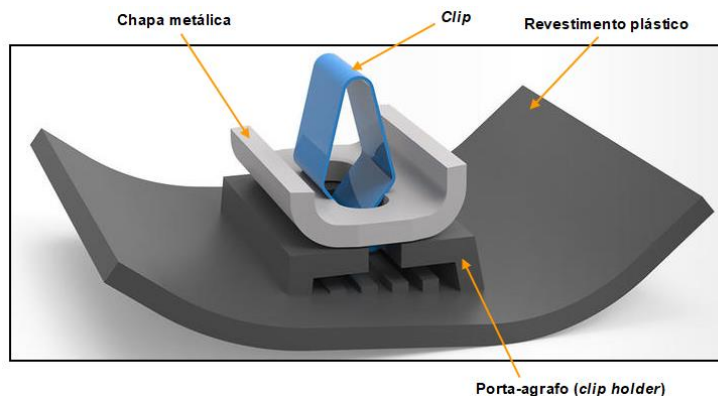


Figura 27 – Imagem esquemática da fixação através da utilização de um *clip* de uma porção de um revestimento de pilar à estrutura metálica do automóvel (adaptado de [76]).

Estes elementos mecânicos, denominados de *clips*, operam segundo o princípio de funcionamento dos *snap-fits*. No processo de montagem, os *clips* são normalmente pré-montados ao componente polimérico através de porta-agrafos, cujas funções principais serão alocar e imobilizar os *clips* quando sujeitos a vibrações e forças externas e compensar eventuais desalinhamentos. O pré conjunto (componente polimérico + *clip*) é posteriormente inserido na chapa metálica da estrutura para finalizar a montagem [70, 77].

2.3.2.2 Ligações adesivas

As ligações adesivas são uma técnica em expansão na indústria automóvel devido à capacidade que apresentam na junção de componentes compostos por materiais dissimilares [78]. Além disso, este método de fixação contribui para a redução da massa total da estrutura de um automóvel, o que aumenta a sua eficiência energética

e permite reduzir as emissões de carbono, um dos objetivos dos fabricantes de veículos. Algumas das aplicações das ligações adesivas nos automóveis têm lugar no para-choques, revestimentos de porta, revestimentos exteriores, tampas de faróis, *spoiler*, bancos, entre outros [79]. Na Tabela 11 apresentam-se as vantagens e desvantagens mais importantes das ligações adesivas.

Tabela 11 – Vantagens e desvantagens mais importantes das ligações adesivas [80].

Vantagens	Desvantagens
Apresentam elevada área de contacto quando comparadas com outras técnicas tradicionais (parafusos, rebites, entre outros) o que permite uma melhor distribuição das cargas.	Baixa resistência ao arrancamento e à clivagem.
Apresentam melhor aspeto visual quando comparadas com outras técnicas (ligações aparafusadas).	Baixa resistência quando expostas à temperatura e humidade.
Possibilidade de juntar materiais dissimilares.	Elevados tempos de cura e necessidade de preparação das superfícies.

2.3.2.3 Ligações soldadas

Vários processos de soldadura são utilizados para ultrapassar as limitações apresentadas pelos métodos referidos. Os mais utilizados na indústria automóvel, que permitem simultaneamente a junção de materiais similares e dissimilares (metais com polímeros ou diferentes polímeros), são a soldadura ultrassónica e a soldadura *laser* [60, 81]. Na Tabela 12 apresentam-se as principais vantagens e desvantagens destas técnicas de soldadura, bem como as suas aplicações na estrutura de um veículo.

Tabela 12 – Técnicas de soldadura mais utilizadas na ligação de componentes poliméricos.

Processo de soldadura	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Ultrassónica	Processo rápido, adequado para produções em massa e facilmente automatizado [82].	Processo limitado a espessuras de junta de 3 mm [82].	Painel de porta (chapa metálica com revestimento), para-choques, painel de instrumentos, entre outros [83, 84].
Laser	Permite a soldadura de geometrias complexas. Elevada qualidade e resistência da soldadura. Não necessita de contato entre o componente e a ferramenta de soldadura [85].	Altas temperaturas provocam degradação e formação de bolhas nos polímeros e na interface entre metais/polímeros.	Faróis dianteiros e traseiros, revestimentos do painel de instrumentos, entre outros [86, 87].

2.3.3 Método de dimensionamento

Um dos primeiros aspetos a ter em consideração no *design* estrutural de um componente plástico prende-se com a determinação do critério de falha. Esta seleção revela-se mais sensível e importante quanto o material em questão é de cariz termoplástico, já que estes materiais apresentam comportamento mecânico diferente dos materiais metálicos. A equação fundamental para o cálculo da resistência de uma determinada aplicação estrutural é dada pela equação (6), onde a tensão admissível (σ_{adm}) para um certo material deve ser superior ou igual à tensão máxima ocorrida no componente de estudo (σ_{max}) [88].

$$\sigma_{adm} = \frac{K}{S \times A} \geq \sigma_{max}, \quad (6)$$

onde:

K = resistência característica do material;

S = fator de segurança;

A = fator de redução do material.

Os critérios de falha surgiram assim da necessidade de estabelecer uma relação entre um estado complexo de tensão, numa determinada estrutura, e a tensão de cedência do material de modo a não se ultrapassar o domínio elástico do material [89]. Segundo mencionado por Mascarenhas et al. [90], o critério de falha deve ser selecionado de acordo com o comportamento mecânico do material juntamente com o modo de falha provável e o tipo de carga (Tabela 13).

Tabela 13 – Critérios de falha segundo o comportamento mecânico do material, do seu modo de falha e do tipo de carga aplicado (adaptado de [90]).

Comportamento do material	Tipo de carga	Modo de falha	Análise	Critério
Dúctil	Monótona, estática ou baixas taxas de deformação.	Deflexões excessivas	Deformação elástica: -Baixa deformação; -Elevada deformação.	Máxima deformação.
		Cedência	Deformação inelástica: -Elevada deformação.	von Mises, Tresca.

Frágil	Monótona, estática ou baixas taxas de deformação	Rotura.	Linear elástica	Tensão normal máxima, máxima deformação
Dúctil	Impacto	Desgaste dúctil.	Deformação elevada	Máxima deformação
Frágil	Impacto	Rotura	Linear elástica	Tensão normal máxima e critério de Sternstein
Dúctil	Cargas cíclicas	Rotura	Linear elástica	Tensão normal máxima
Frágil	Cargas cíclicas	Rotura	Linear elástica	Tensão normal máxima

Erhard [91] recomenda o critério de Tresca para o *design* de componentes plásticos. No entanto, os critérios mais adequados e utilizados no *design* de componentes poliméricos são aqueles que têm em consideração a influência da componente das tensões hidrostáticas, como é o caso do critério modificado de von Mises e o critério cônico ou parabólico. O critério modificado de Von Mises (σ'_{VM}) pode ser calculado analiticamente através da equação (7) [90]

$$\sigma'_{VM} = \sigma'_{oct} \pm \mu \times \sigma'_{hid}, \quad (7)$$

onde σ'_{oct} é a tensão crítica octaédrica calculada pela equação (8)[90]

$$\sigma'_{oct} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \times \frac{\sigma_{yc} \times \sigma_{yt}}{(\sigma_{yc} + \sigma_{yt})}, \quad (8)$$

σ'_{hid} é a tensão hidroestática dada pela equação (9) [90]

$$\sigma_{hid} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}, \quad (9)$$

e por fim μ representa o grau de sensibilidade da cedência do material à componente hidrostática da tensão, determinado pela equação (10) [90],

$$\mu = \frac{\sqrt{2} \times (\sigma_{yc} - \sigma_{yt})}{(\sigma_{yc} + \sigma_{yt})}, \quad (10)$$

em que σ_{yc} e σ_{yt} são as tensões limite de cedência à compressão e à tração, respetivamente, e na equação (9), σ_1, σ_2 e σ_3 dizem respeito às tensões principais.

Os critérios parabólico (σ_{parab}) e cônico ($\sigma_{cónico}$) são dados pelas equações (11) e (12), respetivamente, e oferecem a vantagem de não ser necessário conhecer o

comportamento do material. Ao invés, os critérios necessitam de dados relacionados com a resistência à compressão e tração do material [92].

$$\sigma_{parab} = \frac{m-1}{2m} \times (3 \times \sigma_{hid}) \pm \frac{m+1}{2\sqrt{2m}} \times \sqrt{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}, \quad (11)$$

$$\sigma_{cónico} = \frac{m-1}{2m} \times (3 \times \sigma_{hid}) \pm \sqrt{\left(\frac{m-1}{2m}\right)^2 \times 9 \times \sigma_{hid}^2 + \frac{1}{2m} \times [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}, \quad (12)$$

onde m é a razão entre a tensão limite de cedência à compressão (σ_{yc}) e à tração (σ_{yt}) do material.

A utilização de fatores de segurança é outra prática recorrente, não só na conceção de componentes plásticos mas também na engenharia em geral. Este deve ser escolhido dependendo da aplicação, dos materiais e dos tipos de falha associados ao material [93]. O fator de segurança (S) pode ser calculado através da equação (13) [59]

$$S = \frac{1}{S_1 \times S_2 \times S_3 \times S_4} \quad (13)$$

Na Tabela 14, apresenta-se os valores para cada variável presente na equação (13).

Tabela 14 – Valores dos parâmetros utilizados no cálculo do fator de segurança (adaptado de [90])

Parâmetro	Caso	Valor
S1 - Risco de perigo para as pessoas derivado da falha do componente.	- Sem risco de perigo.	1
	- Existe a possibilidade de perigo.	0,7
	- Provável ocorrência de perigo.	0,5
S2 – Fator de processamento.	- Material puro.	1
	- Fibras orientadas em direção à tensão máxima.	0,8
	- Fibras orientadas perpendicularmente à tensão máxima.	0,5
	- Orientação aleatória.	0,7
	- Orientação desconhecida.	0,5
S3 – Representa a precisão dos cálculos.	- Através de sistemas <i>computer aided engineering</i> (CAE).	1
	- Cálculos analíticos.	0,75
	- Estimativas.	0,5
S4 – Representa a degradação do material.	-	<1

2.3.4 Método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos (MEF) é uma ferramenta de análise numérica utilizada para obter soluções numéricas aproximadas de diversos problemas da engenharia. Durante as últimas décadas, com o aumento exponencial das capacidades de processamento dos computadores, o MEF tornou-se uma técnica indispensável no seio industrial no auxílio ao desenvolvimento de novos produtos e sistemas [94].

2.3.4.1 Caracterização geral do método

O princípio de funcionamento do MEF consiste na discretização de um determinado domínio de interesse em elementos finitos que por sua vez são constituídos por um conjunto de nós (Figura 28). A estes pontos do domínio estão associadas equações diferenciais parciais, que uma vez resolvidas, irão permitir conhecer as variáveis de campo (deslocamentos, deformações, tensões, entre outras) nos nós. Os restantes pontos do domínio e consequentemente a solução numérica final são obtidos posteriormente através de funções de interpolação [95].

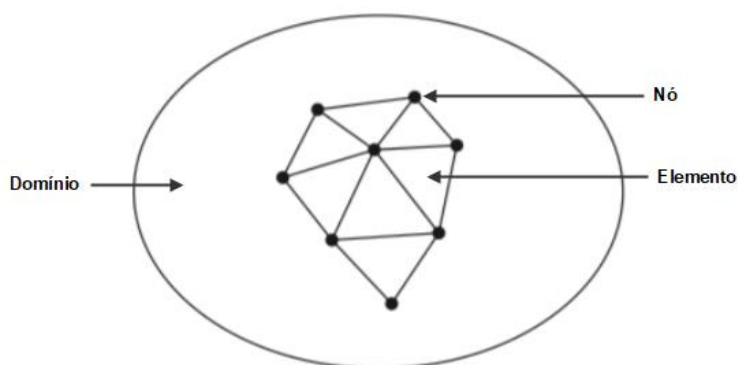


Figura 28 – Discretização de um determinado domínio (adaptado de [96]).

A escolha do tipo de elementos a serem utilizados na discretização do domínio é uma etapa importante e influenciadora na precisão dos resultados a serem obtidos. Na Figura 29 visualizam-se alguns elementos clássicos utilizados na análise por elementos finitos. O elemento triangular, (Figura 29 a), a par com o elemento tetraédrico (Figura 29 c), devido ao seu comportamento rígido à flexão, impossibilita a obtenção de resultados precisos das deformações e muito menos das tensões, a não ser que se utilize uma grande quantidade de elementos, o que provocará naturalmente um aumento do tempo de computação. A grande vantagem dos elementos triangulares e tetraédricos reside no facto de estes permitirem gerar automaticamente a malha em geometrias complexas. O elemento quadrilátero juntamente com o hexaédrico, ao contrário dos elementos triangulares e tetraédricos, requerem um esforço adicional no que diz respeito ao processo de preparação da malha e são os preferidos no meio industrial [97].

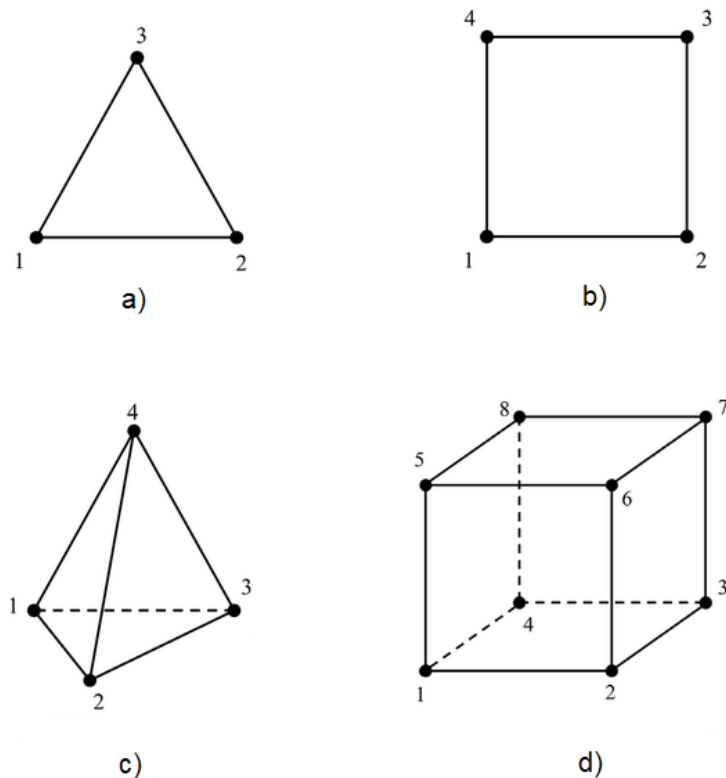


Figura 29 – Tipos de elementos de primeira ordem: a) triangular de 3 nós; b) quadrilátero de 4 nós; c) tetraédrico de 4 nós; d) hexaédrico de 8 nós (adaptado de [98]).

Além da escolha dos elementos, outro aspecto de grande importância no MEF prende-se com o tipo de análise a ser considerada num determinado estudo. No que concerne a análises estruturais, estas podem ser categorizadas em análises lineares e não lineares [99]. Na Tabela 15 realiza-se uma breve descrição acerca destes dois tipos de análise.

Tabela 15 – Tipos de análise [99].

Análise	Descrição
Linear	É frequentemente utilizada para simplificar a análise e fornece resultados aceitáveis, quando as geometrias dos modelos são simples e projetadas dentro do limite elástico do material. Na análise linear, a relação carga <i>versus</i> deformação apresenta comportamento linear, a matriz rigidez permanece constante e o modelo é sujeito a pequenas deformações.
Não linear	Este tipo de análise é utilizado na maior parte dos contextos industriais, onde os modelos apresentam geometrias complexas, são compostos por diferentes materiais, são sujeitos a altas temperaturas e pressões e o atrito gerado entre componentes necessita de ser considerado. São vários os tipos de não linearidade, como a não linearidade geométrica, devido à ocorrência de elevadas deformações, a não linearidade material, devido ao comportamento elástico-plástico, e a não linearidade de contato, devido à fricção entre corpos. A não linearidade de contato está ainda dependente do comportamento do material, do coeficiente de fricção, condições de carga e geometria dos componentes em contato.

2.3.4.2 Vantagens da utilização em projeto

A utilização do MEF na indústria automóvel tem vindo a ser gradualmente integrada no processo de desenvolvimento de novos automóveis. Esta aliança têm permitido reduzir a necessidade de ensaios destrutivos, para efeitos de validação, aumentar a velocidade do processo de desenvolvimento e, conseqüentemente, economizar recursos com vista a um setor mais eficiente. As áreas onde o MEF tem vindo a desempenhar um papel de relevo para o setor automóvel dizem respeito à segurança dos passageiros, ao impacto ambiental, ao conforto dos passageiros, ao estudo do comportamento dos componentes e ao método de validação [100] (Figura 30).

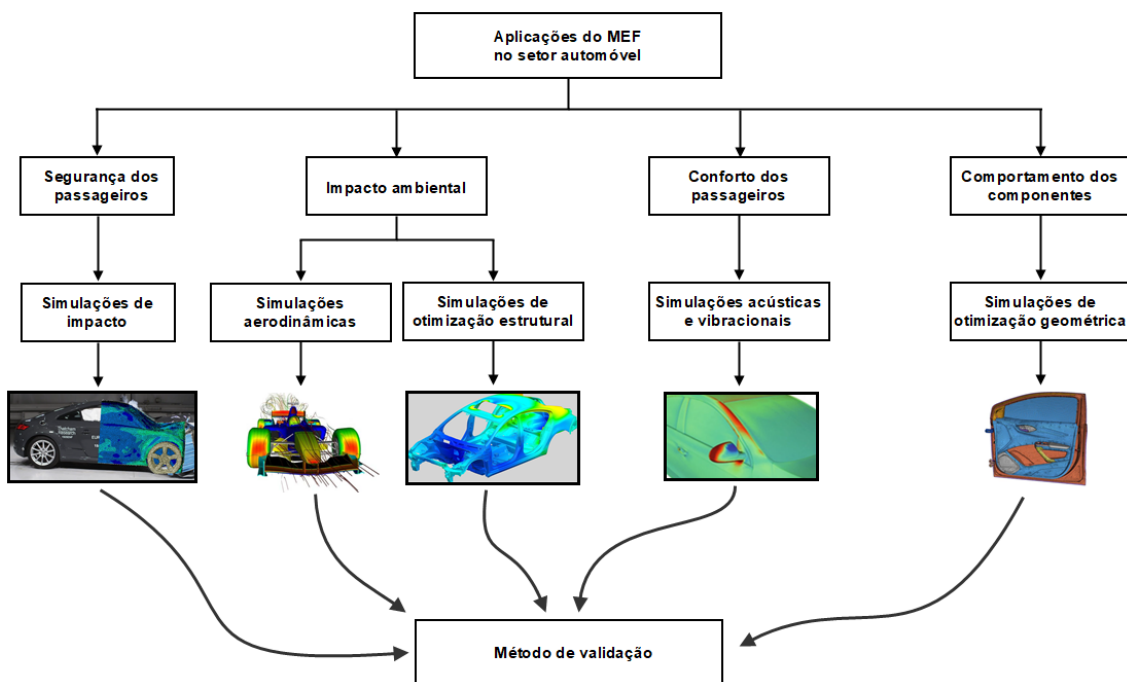


Figura 30 – Algumas aplicações do MEF no setor automóvel (adaptado de [20, 101-103]).

Na Tabela 16 explica-se algumas das aplicações apresentadas na Figura 30.

Tabela 16 – Explicação da razão do empreendimento do MEF em algumas aplicações no setor automóvel.

Aplicação	Descrição
Segurança dos passageiros	A segurança dos passageiros durante um acidente é um tema que tem merecido especial atenção devido à taxa de mortalidade e de incapacitados que provoca na população mundial. Estima-se que 1,2 milhões de pessoas são mortas e 10 milhões sofrem lesões, anualmente, na sequência de acidentes de trânsito a nível mundial [104]. Para contrariar este facto, são realizadas simulações de impacto para estudar a resposta estrutural do automóvel e desta forma garantir a segurança dos passageiros. O MEF permite estudar os inúmeros cenários de acidente de uma forma rápida e económica, ao contrário dos ensaios físicos convencionais, levando a uma redução do número de mortes na União Europeia (UE), entre 2010 e 2015, de cerca de 17% [105].

Conforto dos passageiros	Têm sido feitos vários esforços para providenciar conforto aos condutores de veículos de passageiros. Existem três aspetos que influenciam o conforto dos condutores, a percepção de barulho no ouvido e a vibração sentida no banco e no volante [106]. Através de simulações de modelos acústicos é possível identificar as fontes de ruído e assim atuar no desenvolvimento de soluções precisas e mais económicas [100, 107].
Impacto ambiental	Segundo Gates [108], os automóveis particulares representam menos de metade das emissões de gases com efeito de estufa do setor dos transportes, que por sua vez contribui com 16% das emissões globais. Duas das formas encontradas no setor para reduzir as emissões, nomeadamente a redução da massa da estrutura do carro e o aumento da eficiência aerodinâmica. Para o efeito, a utilização do MEF permite a otimização da força de arrasto sem a necessidade de túneis de vento e simular uma solução que permita reduzir a massa da estrutura sem comprometer a integridade estrutural, que de outra forma consumiria bastante tempo e uma quantidade elevada de protótipos a serem testados [100, 109].

2.3.5 Estado de arte

Seguidamente, na Tabela 17, são apresentados alguns estudos com especial foco no desenvolvimento estrutural de componentes poliméricos para a estrutura de um automóvel. Ao longo dos estudos são abordados aspetos relacionados com a utilização de frisos, a utilização do MEF como ferramenta auxiliar na análise estrutural, ensaios físicos, materiais, entre outros aspetos.

Tabela 17 – Estado de arte relativo à otimização de componentes poliméricos para o setor automóvel.

Referência	Descrição do estudo
Tiago Sartor [20]	Neste artigo os autores propuseram-se a estudar a integridade estrutural na interface entre componentes poliméricos que compõem um painel de porta, conectados entre si através da tecnologia “ <i>heat stake</i> ”. A metodologia abordada para prever o comportamento nestas zonas recorreu à combinação de ensaios físicos de tração para determinação da força máxima suportada nos pontos de fixação e simulações numéricas que utilizaram os valores dos ensaios físicos como referência. As zonas de fixação foram ensaiadas à tração em dois painéis de porta com duas combinações de materiais diferentes (na primeira combinação ambos os componentes eram compostos por um copolímero de PP sem carga e na segunda combinação por um composto de PP de médio impacto e um material compósito moldável com 20% de PP mais 80% de fibras de <i>kenaf</i> .) Para a primeira combinação de materiais registou-se uma força máxima suportada pelos <i>heat stakes</i> de 216 N e para a segunda combinação um valor de 168 N. A análise por MEF teve lugar na conexão entre o <i>carrier</i> e o <i>arm rest</i> , uma zona do painel de porta considerada crítica, onde foi aplicada uma força acima dos 600 N com o intuito de privilegiar o pior caso. Outras aspetos

importantes incorporados na simulação prenderam-se com a utilização de elementos de casca de 3 mm de aresta, curvas de não linearidade dos materiais, remoção de pequenos raios e aplicação de contatos do tipo “*node to surface*” para evitar penetrações entre os componentes. Para a zona de estudo mencionada anteriormente, composta por copolímeros de PP sem carga, referente ao primeiro painel de porta, quatro *heat-stakes* entraram em rotura aquando dos ensaios de tração o que motivou a simulação de 22 conexões entre o *carrier* e o *arm rest*. Todas estas simulações apresentaram resultados abaixo do limite estipulado pelos ensaios físicos (216 N), o que permitiu aos autores concluir que a razão da rotura estava no processo de fabrico e não no *design*. Relativamente ao segundo painel de porta, composto pela segunda combinação de materiais, foram simuladas 21 fixações e registou-se uma força de reação superior à permitida (168 N) em uma delas, o que coincidiu com a passagem da tensão limite de cedência do material (27,4 MPa) registada nesta zona. Considerando esta última correlação, os autores decidiram adicionar um novo *heat-stack* para gerar uma melhor distribuição das cargas.

Hyunkwon Jo [21]

Neste estudo os autores introduzem o processo de otimização para componentes plásticos do interior do automóvel, mais concretamente num componente polimérico integrante do painel de porta. Depois de estudarem a estrutura em detalhe, os autores concluíram que existem fatores como a posição das fixações e a disposição dos frisos de reforço que melhoram o desempenho do componente, sem haver necessidade de modificar o *design*. Os resultados das otimizações mostraram a melhoria do desempenho do componente provando assim a validade do método.

Manoranjan
Sahoo [83]

Este trabalho é a continuação do estudo anteriormente referenciado e tem como objetivo otimizar a rigidez de um painel de porta como um todo, com recurso ao MEF, através de propostas de *design* que abrangem diferentes conceitos estruturais. A não correta otimização da rigidez neste módulo complexo leva a origem de barulhos e vibrações e, em muitos casos, à falha da montagem. Os autores utilizaram o *software* de desenho NX (NX 9, Siemens, Alemanha) para a modelação dos modelos e para a respetiva validação dos resultados utilizaram o *software* Abaqus (Abaqus 6.10, Dassault Systèmes, USA). A primeira proposta prendeu-se com o aumento da espessura dos componentes plásticos do painel de porta, e esta revelou adequada apenas quando as deflexões na peça são altas e não existe possibilidade de adicionar reforços como frisos. Numa segunda abordagem foram iterativamente implementados um conjunto de frisos de reforço que permitiram obter um valor inferior de deflexão, o que faz desta técnica a mais viável economicamente quando comparada com as restantes. Através da soldadura ultrassónica, de um ou mais

componentes plásticos ao *design* existente, observam-se de igual forma que a rigidez pode ser otimizada com valores de deflexão máxima registados de 4,9 mm. Ainda assim esta técnica é dispendiosa e requer o desenvolvimento de novos componentes. Por fim, foi considerada a inserção de blocos de espuma entre os componentes poliméricos da porta e a chapa metálica juntamente com a incorporação de reforços e registou-se uma deflexão máxima de 2,4 mm, valor que se encontra abaixo do previamente estabelecido como critério de aceitação de 2,5 mm. Dependendo da área de aplicação, estas técnicas de otimização são boas opções para melhorar a rigidez de componentes plásticos.

Oliver-Ortega et
al. [110]

Através deste estudo, os autores tentaram demonstrar a viabilidade na substituição de reforços sintéticos por reforços à base de celulose (podem ser recicláveis e degradados), em materiais compósitos. Para o efeito utilizou-se um puxador do interior de uma porta de um automóvel, habitualmente fabricado com um compósito de matriz em PP reforçado com fibras de vidro, como caso de estudo. Os autores optaram por desenvolver uma *mock-up* do puxador com um material compósito de matriz à base de poliamida 11 (PA 11) reforçada com “*stone ground wood lignocellulosic*” de forma a estudar a potencialidade deste material como substituto. Através de ensaios mecânicos e de simulações numéricas, onde replicaram a carga resultante do funcionamento normal (20 N) e do pior caso (70 N), nos dois materiais, concluí-se que, do ponto de vista mecânico e ambiental, apenas materiais com altos teores de fibras naturais parecem conseguir substituir os materiais compósitos à base de PP. Não obstante, a elevada energia necessária para o fabrico da PA11 é um fator que pode colocar em causa as vantagens constatadas anteriormente dos materiais compósitos de base biodegradável.

DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Caracterização da entidade acolhedora
- 3.2 Objetivos do trabalho a realizar
- 3.3 Caracterização dos elementos em análise
- 3.4 Requisitos impostos pelo cliente
- 3.5 Metodologia de trabalho a seguir
- 3.6 Ensaios experimentais realizados
- 3.7 Simulações numéricas estáticas
- 3.8 Melhoria da geometria das fixações
- 3.9 Simulações numéricas dinâmicas

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Caracterização da entidade acolhedora

A presente dissertação de mestrado foi desenvolvida em âmbito empresarial e teve como entidade acolhedora a empresa Simoldes Plásticos (Figura 31), fundada em 1981 e sediada em Oliveira de Azeméis, Portugal.



Figura 31 – Logótipo da Simoldes Plásticos [111].

A Simoldes Plásticos tem como área de negócio principal o setor automóvel, e desenvolve e produz componentes poliméricos para as principais marcas de fabrico de automóveis, entre as quais se encontram a Renault, Peugeot, Volkswagen, Audi e SEAT (Figura 32).



Figura 32 – Interior de um veículo comercial do futuro desenvolvido pela Simoldes Plásticos [112].

Além do setor automóvel, a Simoldes Plásticos produz ainda diversificados produtos no setor não automóvel, também estes de origem polimérica, tais como coberturas para

botijas, capacetes, cadeiras de bebé, embalagens, entre outros, para entidades como a Amtrol-Alfa, NEXX, Dorel, DS Smith, respetivamente.

Atualmente a Simoldes Plásticos é composta por nove empresas distribuídas a nível global, incluindo a mais recente construção da Simoldes Plásticos Polska Zory, a segunda empresa do grupo na Polónia (Figura 33).

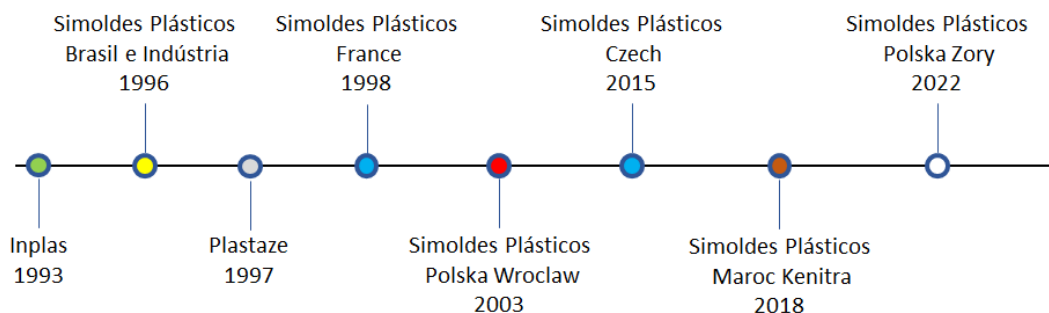


Figura 33 - Linha cronológica das empresas da Simoldes Plásticos.

3.2 Objetivos do trabalho a realizar

A dissertação de mestrado tem como principal objetivo estudar o comportamento e validar a geometria em alguns dos elementos de fixação que integram os componentes desenvolvidos pela Simoldes Plásticos e que são responsáveis pela sua fixação à carroçaria do veículo. Este tema surge da necessidade de haver um projeto mais rigoroso nestes pontos, através da utilização de ferramentas numéricas que permitam aproximar o comportamento dos modelos teóricos das fixações à realidade. Com este procedimento, pretende-se garantir as especificações das marcas em relação à resistência que as fixações devem apresentar. No final da dissertação é esperada a proposta de soluções de fixação *standard* para que, numa fase futura, estas sejam incluídas na base de dados da Simoldes Plásticos para inserção nos componentes a serem desenvolvidos para os clientes. Na Tabela 18 são delineados os objetivos a cumprir ao longo da dissertação.

Tabela 18 - Objetivos delineados para a dissertação de mestrado.

- | | |
|--|--|
| 1. Seleção das fixações para estudo. | 4. Correlação entre ensaios físicos e numéricos. |
| 2. Realização de ensaios físicos. | 5. Validação e melhoria da geometria das fixações. |
| 3. Realização de simulações numéricas. | 6. Arquivo dos resultados. |

Numa fase inicial do trabalho devem ser escolhidas as fixações para estudo de entre um leque de fixações normalizadas que estão inseridas na base de dados da Simoldes Plásticos. Após esta seleção, e tendo em conta as especificações do caderno de

encargos das marcas relativas à resistência das fixações, seguidamente devem ser realizados ensaios físicos, segundo as direções de arrancamento e de corte, ao mesmo tempo que se pretende replicar as condições de ensaio para efetuar análises numéricas através do MEF. Obtidos os resultados de ambos os ensaios, o objetivo passa por correlacionar os valores dos experimentos, através dos dados das curvas força *versus* deslocamento para fazer a respetiva validação da geometria dos modelos com base em critérios de falha que serão previamente discutidos. Na fase final devem ser apresentadas propostas de melhoria, caso seja necessário, e será feito o respetivo arquivo da documentação.

3.3 Caracterização dos elementos em análise

Neste capítulo são apresentadas as fixações a serem alvo de estudo, nomeadamente a 1ª fixação (Renault), 2ª fixação (Renault) e 3ª fixação (Audi).

3.3.1.1 1ª fixação

A 1ª fixação normalizada a ser foco de estudo é composta por um *clip* autocentrado estanque (Figura 34 – a) ou não estanque (Figura 34 – b) e um porta agrafado adaptável ao tipo de componente onde será inserido (Figura 34 - c), que pode alocar estas duas tipologias de *clips*.

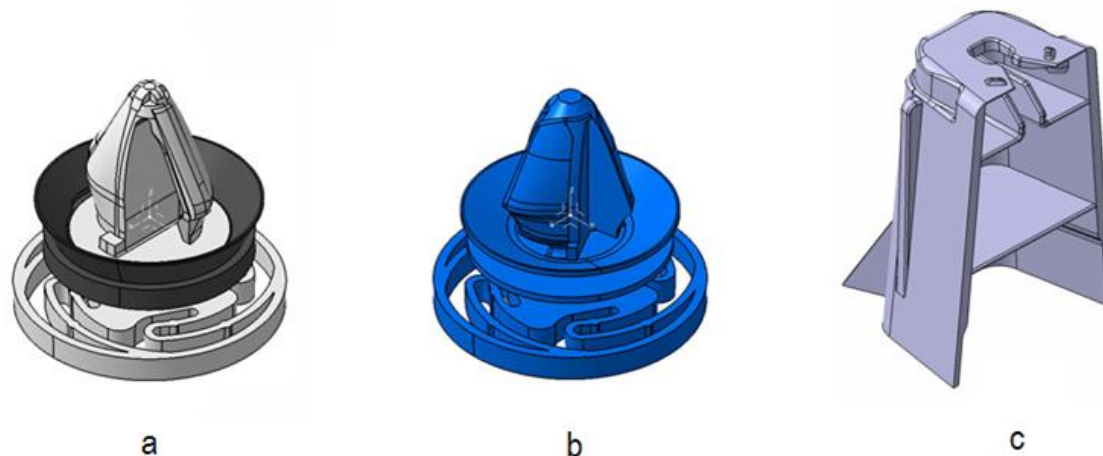


Figura 34 – 1ª fixação normalizada e os seus elementos: a) *clip* estanque; b) *clip* não estanque; c) porta agrafado da biblioteca Simoldes.

Tendo em conta o componente no qual estará inserida a fixação, nesta fase, o porta agrafado pode sofrer alterações a partir da geometria observada na Figura 34 c), mantendo-se inalterável a zona do encaixe para o *clip*. Para realizar o estudo do comportamento desta tipologia de fixação, utilizou-se um painel de porta lateral traseiro, desenvolvido para a Renault, constituído por dezasseis fixações (Figura 35).

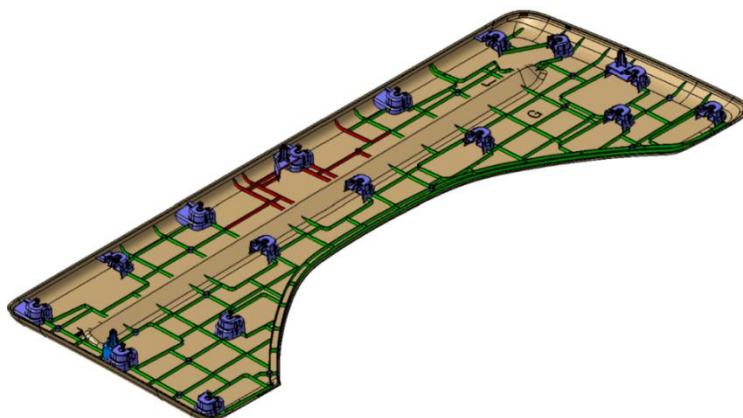


Figura 35 – Painel de porta lateral traseiro desenvolvido para a Renault.

Os porta agrafos incorporados no painel apresentam geometria idêntica ao demonstrado na Figura 36, onde é possível verificar algumas evoluções em relação ao *standard* apresentado na Figura 34 c). O material constituinte do painel e que foi utilizado para estudar o comportamento da fixação foi um PP, designado pela ExxonMobil de “*Extral Performance Polyolefin CNU011*”, uma poliolefina termoplástica especialmente adequada para componentes do interior automóvel processados via injeção, e com bom acabamento superficial e boa resistência aos raios UV. A ficha técnica do material em questão pode ser consultada no Anexo1.

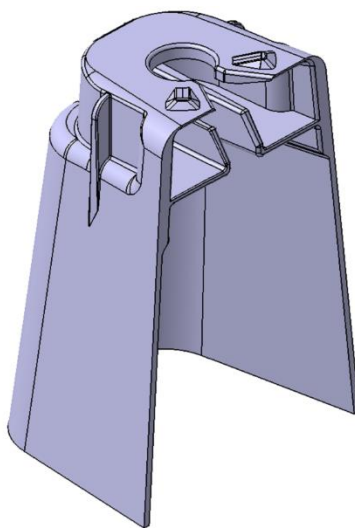


Figura 36 - Formato do porta agrafos incorporado no painel de porta traseiro desenvolvido para a Renault.

Tendo em conta que a espessura da peça do painel, apresentado na Figura 35, é de 2,5 mm, o porta agrafos apresenta uma redução de espessura na interface de 1,1 mm (40% a espessura do componente) de forma a não provocar chupados no componente. Na Figura 37 identifica-se a cor laranja a espessura de 2,5 mm da parede do porta agrafos e a cor verde a redução de espessura até ao valor de 1,1 mm.

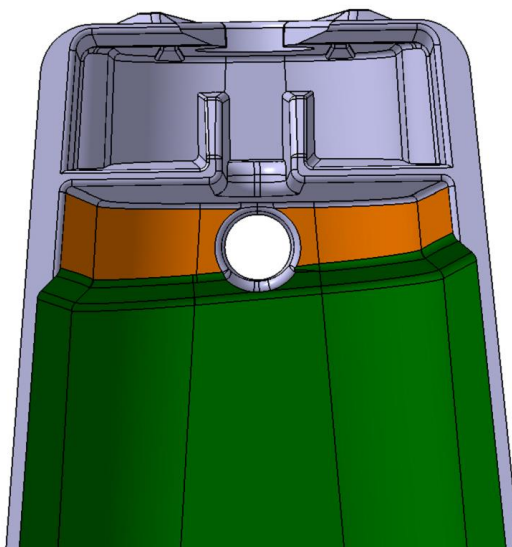


Figura 37 - Redução de espessura referente à 1ª fixação.

A zona lateral do porta agrafo, apresentada na Figura 36, tem incorporados dois frisos, destacados a cor laranja na Figura 38, que permitem o reforço da fixação quando esta é sujeita maioritariamente a esforços laterais de corte.

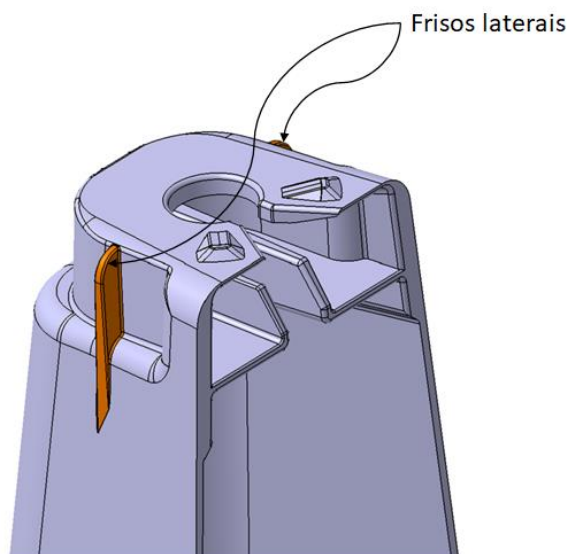


Figura 38 - Frisos laterais do porta agrafo da 1ª fixação.

Na parte de trás do porta agrafo, normalmente existe uma abertura para saída de gases resultantes do processo de desmoldagem (Figura 39).

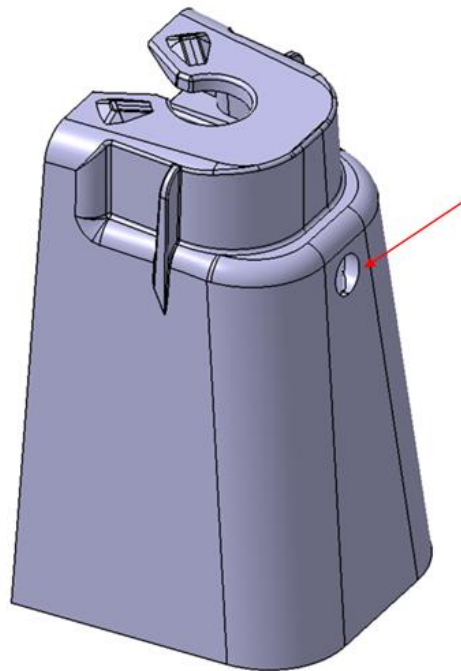


Figura 39 - Abertura para saída de gases.

A zona superior do porta agrafo possui duas nervuras de retenção, destacadas a cor verde na Figura 40, que impedem a remoção involuntária do *clip* do porta agrafo durante o transporte dos componentes.

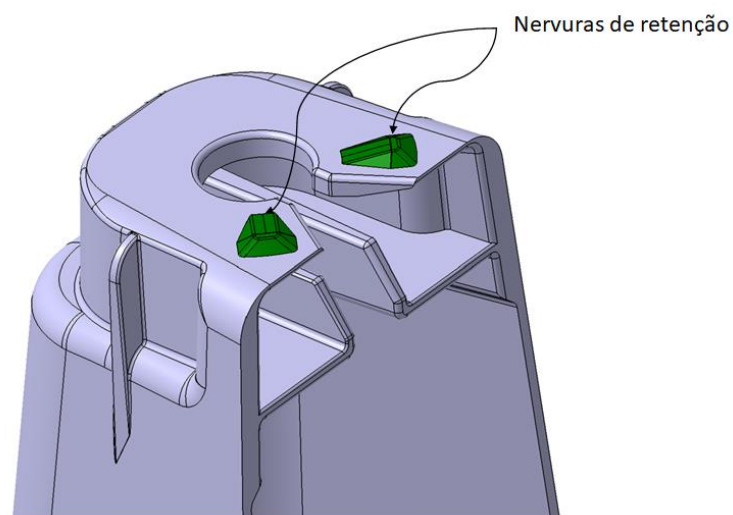


Figura 40 - Nervuras para retenção do *clip*.

A abertura do porta agrafo, com a cota assinalada na Figura 41, dependendo da matéria-prima da fixação, vê as suas dimensões alteradas devido a diferentes níveis de contração no molde. Este porta agrafo *standard* apresenta uma dimensão de abertura para a entrada do *clip* de 4,2 mm.

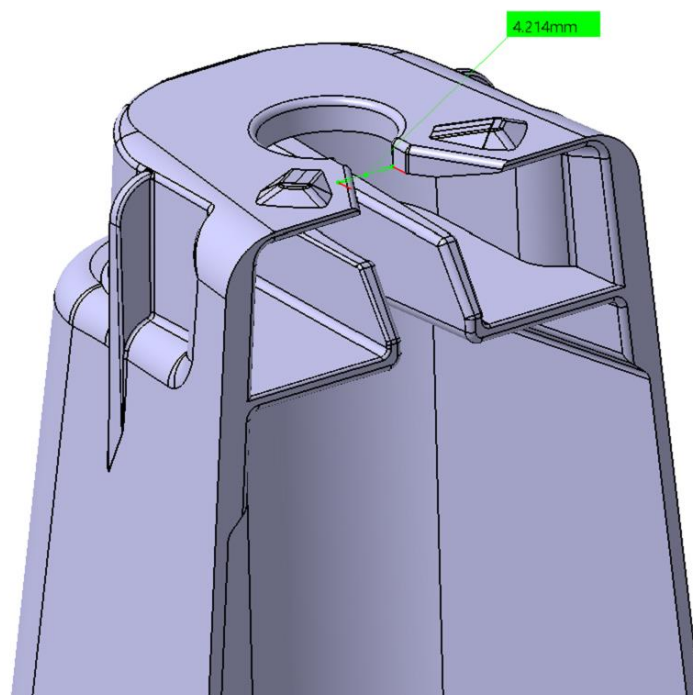


Figura 41 - Dimensão da abertura do porta agrafo da 1ª fixação para entrada do *clip*.

Na Figura 42 apresenta-se o sentido de montagem do *clip* no porta agrafo.

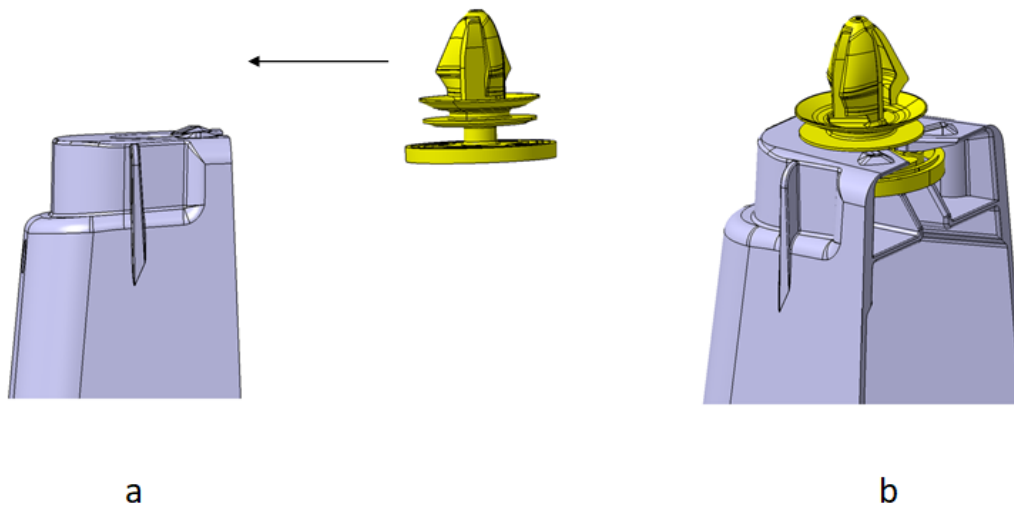


Figura 42 - Sequência de montagem: a) sentido de montagem do *clip*; b) *clip* montado no porta agrafo.

Quando montado no porta agrafo, o *clip* apresenta uma interferência propositada com o intuito de evitar folgas. Na Figura 43 apresenta-se uma secção em corte da montagem apresentada na Figura 42 b, para demonstrar o “efeito mola”.

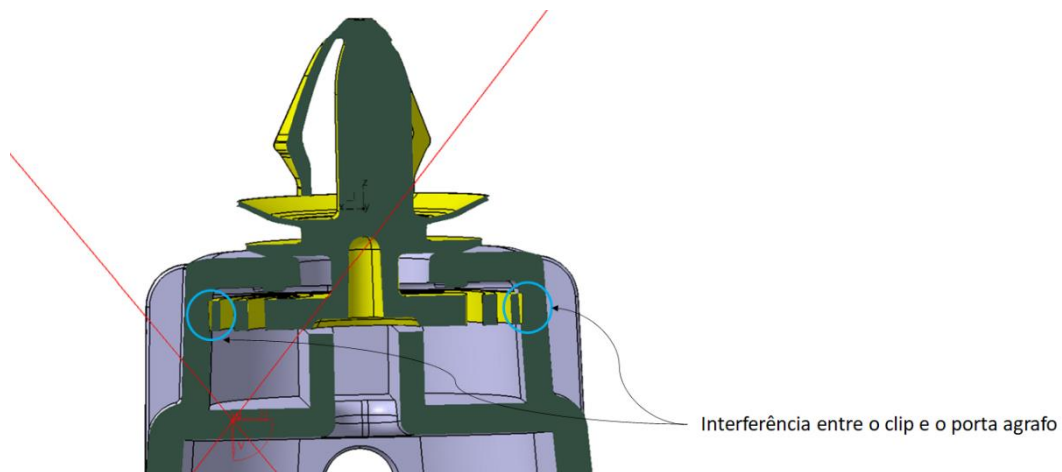


Figura 43 - Interferência entre o *clip* e o porta agrafo.

3.3.1.2 2ª fixação

A 2ª fixação a ser alvo de estudo é composta por dois *clips* (Figura 44 a e b) e o respetivo porta agrafo (Figura 44 c).

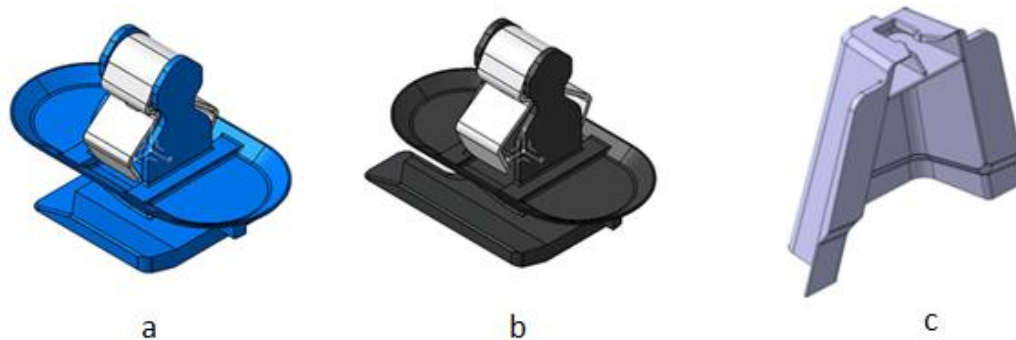


Figura 44 – 2ª fixação normalizada e os seus elementos: a) 1º *clip*; b) 2º *clip*; c) porta agrafo *standard* da biblioteca Simoldes.

O componente no qual está inserida esta tipologia de fixação diz respeito a uma soleira, também esta desenvolvida para a Renault (Figura 45).

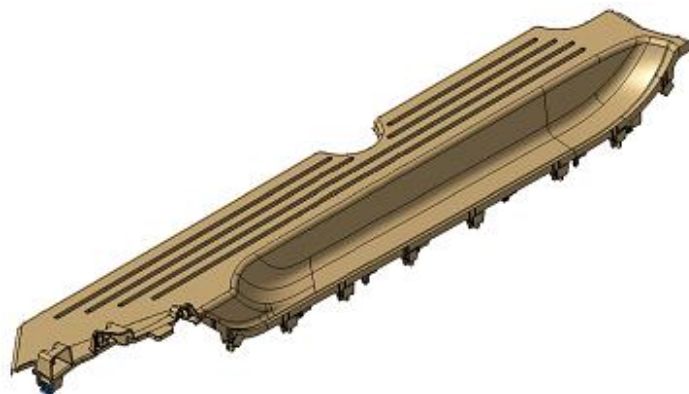


Figura 45 - Soleira desenvolvida para a Renault onde está incorporada a 2ª fixação a ser alvo de estudo.

O material constituinte da soleira e que foi utilizado para estudar o comportamento da fixação foi um PP, designado pela ExxonMobil de “*Exxtral Performance Polyolefin CMV101A*”, uma poliolefina termoplástica caracterizada por apresentar um bom equilíbrio rigidez/tenacidade e boa resistência aos raios UV, especialmente adequada para componentes do interior automóvel. A ficha técnica do material em questão pode ser consultada no Anexo2.

Esta tipologia de porta agrafado possui um rasgo na parte de trás (denominado de desenganador), cujo objetivo é guiar o *clip* no momento da sua inserção (Figura 46).

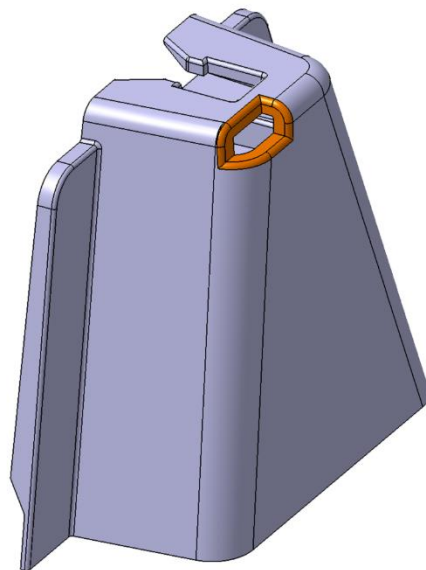


Figura 46 - Rasgo na zona de trás do porta agrafado para guiamento do *clip*.

Além do rasgo, a fixação possui dois frisos laterais (destacados a cor castanha na Figura 47) que permitem o seu reforço quando esta é sujeita a forças laterais.

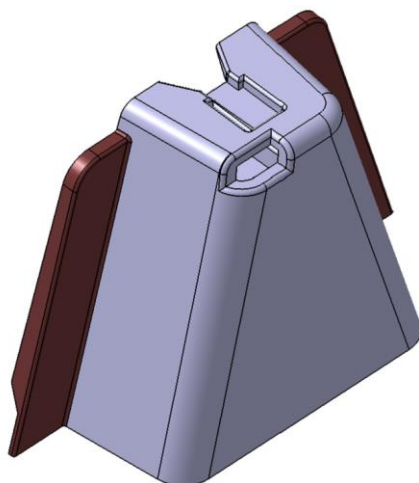


Figura 47 - Frisos laterais de reforço.

Este porta agrafo *standard* apresenta uma dimensão de abertura para a entrada do *clip* de 5,2 mm (Figura 48).

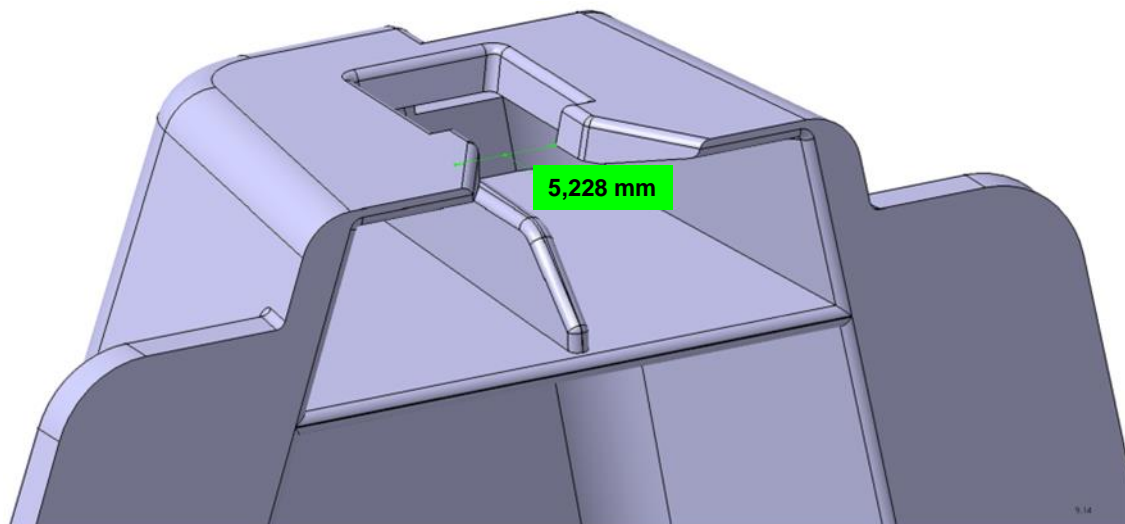


Figura 48 - Dimensão da abertura do porta agrafo da 2ª fixação para entrada do *clip*.

O porta agrafo desta fixação apresenta uma redução de espessura de 1,1 mm (zona de plástico identificado a cor azul na Figura 49). Esta espessura evolui para uma dimensão de 2,5 mm (zona identificada a cor castanha na Figura 49).

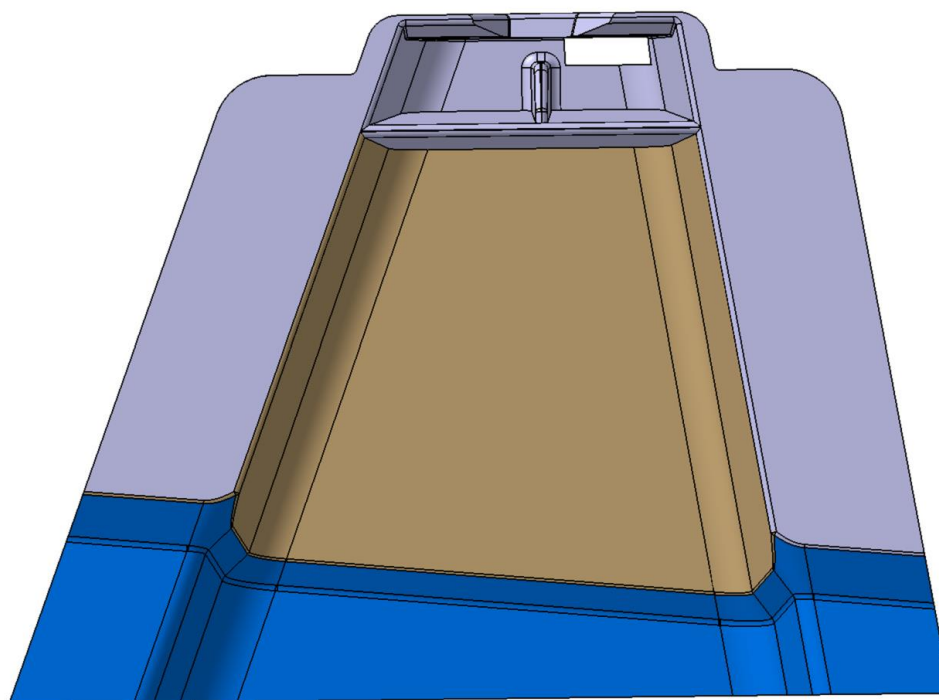


Figura 49 - Redução de espessura do porta agrafo da 2ª fixação.

3.3.1.3 3ª fixação

A 3ª fixação a ser alvo de estudo é composta por um *clip* metálico (Figura 50 a) e o respetivo porta agrafos (Figura 50 b).

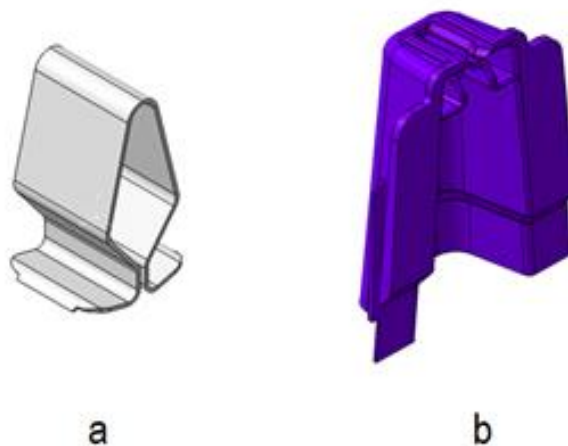


Figura 50 – 3ª fixação normalizada e os seus elementos: a) *clip* metálico; b) porta agrafos *standard* da biblioteca Simoldes.

O componente no qual está inserida esta fixação, e que foi utilizado para estudar o comportamento deste tipo de fixação foi um pilar B (Figura 51), desenvolvido para a Audi, cujo material é um PP carregado com 16% de talco, designado pela LyondellBasell de Hostacom EKC 330N.

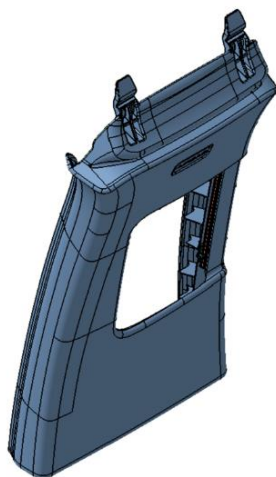


Figura 51 - Pilar B onde está inserida a 3ª fixação alvo de estudo.

O porta agrafos incorporado neste componente apresenta ligeiras diferenças em relação ao *standard* da biblioteca Simoldes, nomeadamente nos frisos frontais, que não estão implementados no componente de estudo (Figura 52).

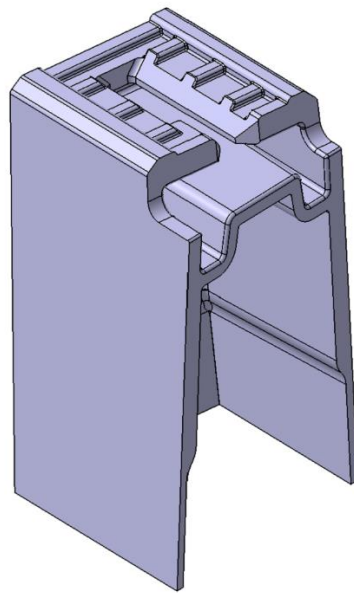


Figura 52 - Porta agrafado incorporado no pilar B da Audi.

O porta agrafado da Figura 52 possui uma face intermédia, distinguida a azul na Figura 53- a, que permite apoiar o *clip* e guiá-lo no momento de inserção. Para inserir o *clip* no porta agrafado é necessário, primeiramente, aproximar as duas partes laterais do *clip* enquanto se segue o movimento descrito na Figura 53 b. Após inserção do *clip* no porta agrafado, este recupera a sua forma original quando libertado (Figura 53- c) Na Figura 53 demonstra-se a sequência de montagem do *clip* no porta agrafado.

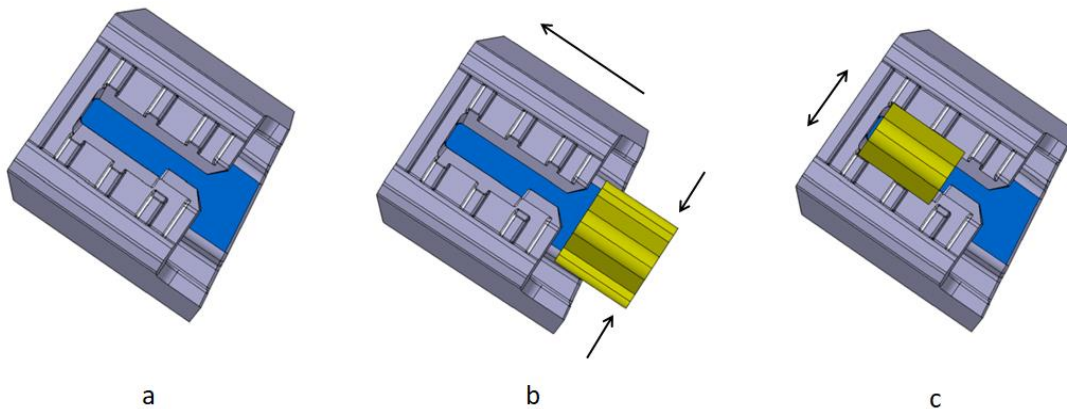


Figura 53 - Sequência de montagem do *clip* no porta agrafado: a) face de apoio do *clip* distinguida a azul no porta agrafado sem o *clip*; b) apoio do *clip* na face de apoio + movimento de inserção do *clip*; c) *clip* inserido + recuperação da forma original do *clip*.

Após a inserção do *clip* no porta agrafado, a chapa é posteriormente montada na fixação, ficando na disposição observada na Figura 54.

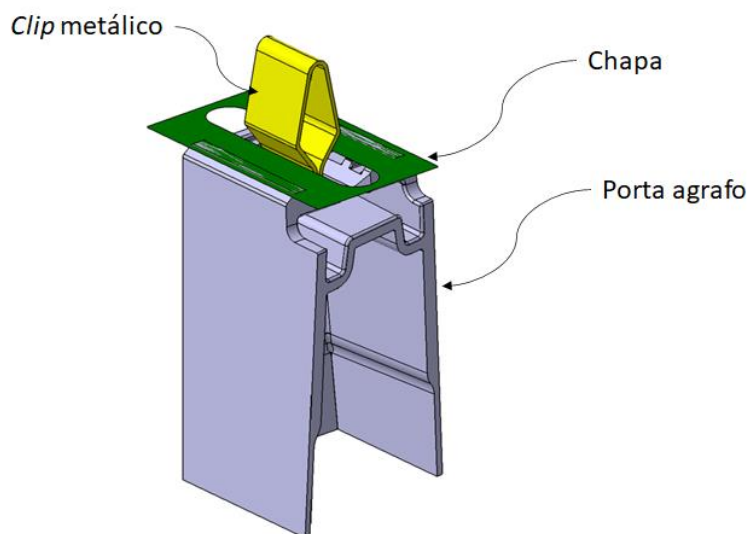


Figura 54 - Montagem da chapa na 3ª fixação.

O porta-agrafo possui seis nervuras para reforço da zona superior, distinguidas a cor laranja na Figura 55, com espessura de 1,5 mm e com uma altura que não permita a interferência com o plano de chapa, como demonstrado na Figura 54.

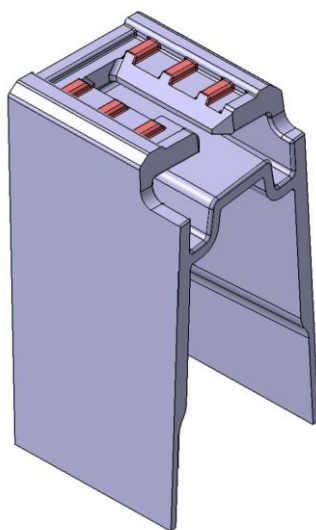


Figura 55 - Nervuras de reforço posicionadas na zona superior do porta-agrafo.

Uma vez que as fixações estão localizadas na extremidade do pilar B, a espessura nesta zona não é constante (varia entre os 2,2 mm e os 2,5 mm), pelo que a dimensão da redução de espessura é de 0,9 mm (40% a espessura do componente). Na Figura 56 apresenta-se a cor amarela a espessura do porta-agrafo de 2,2-2,5 mm e a cor castanha a respetiva redução para 0,9 mm.

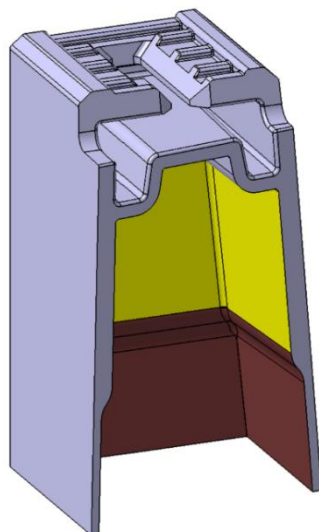


Figura 56 – Redução de espessura referente à 3ª fixação de estudo.

3.4 Requisitos impostos pelo cliente

Cada marca estabelece as especificações a cumprir em relação às fixações a serem incorporadas nos seus componentes. A Renault refere que a resistência das fixações deve ser obtida através de ensaios de corte, compressão, tração, torção, entre outros, dependendo dos elementos fixadores, ensaiadas na configuração do veículo. Segundo a secção 3.4.3 “*Assembly/disassembly force*” e a secção 3.5.3.2 “*Resistance of the fasteners*” do manual de especificações do produto (32-00-008/--L), a menos que esteja mencionado nas especificações ou no desenho técnico do componente, as fixações devem cumprir os seguintes requisitos:

- As zonas do porta agrafo, concebidas para receber elementos fixadores, devem aguentar forças originadas por estes elementos, durante o arrancamento, de pelo menos 200 N e no mínimo 120 N-150 N ao corte;
- A força de montagem deve ser menor ou igual a 30 N, quando o elemento fixador é pressionado com a ponta dos dedos, e inferior a 80 N quando pressionado com a palma ou com toda a mão;
- A força de desmontagem deve estar compreendida entre 100 N e 150 N;
- Os ensaios físicos são realizados à temperatura ambiente e a uma velocidade 100 mm/minuto;
- Todas as partes da peça visíveis pelo cliente não devem ser retrabalhadas e não devem apresentar sinais de impacto, perdas de material, deformação plástica permanente, entre outros;
- As direções de ensaio ao arrancamento e ao corte a serem exercidas nas fixações seguem os sentidos da Figura 57.

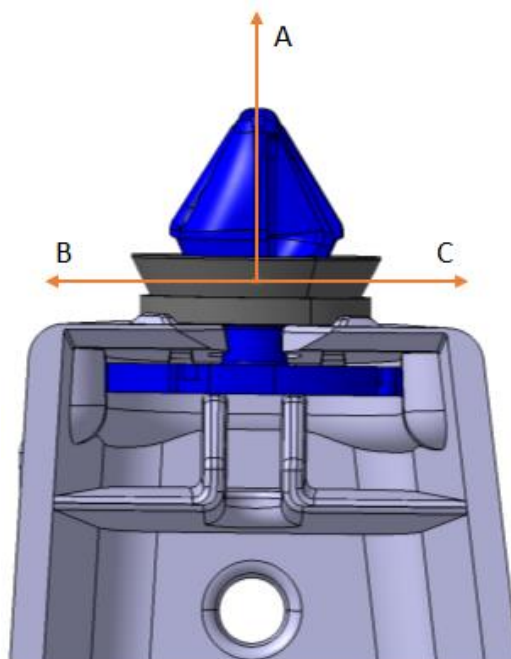


Figura 57 - Direções de ensaio ao arrancamento (A) e ao corte (B e C) a serem exercidas na fixação.

No que diz respeito ao caderno de encargos da Audi, relativamente aos elementos fixação incorporados nos seus componentes, este define os seguintes requisitos:

- A resistência dos elementos de fixação é obtida por meio de um ensaio de tração ou compressão;
- Para uma velocidade de ensaio de 100 mm/minuto, a fixação deve aguentar à tração e à compressão um valor de força mínimo de 400 N;
- Como critério de aceitação, os porta agrafos devem estar intactos 48 h após a realização do teste e não devem apresentar deformações plásticas permanentes, sinais de quebra ou fissuras;
- As direções de ensaio são definidas segundo os sentidos da Figura 58. A direção F1 representa a força a ser exercida no elemento de fixação ao arrancamento, F2 representa a força de compressão exercida por uma ferramenta com geometria adequada no elemento de fixação (por exemplo perfil em T) e F3 é a força de compressão exercida em toda a área de contato do porta agrafos sem o elemento de fixação inserido.



Figura 58 - Direções de ensaio, segundo o caderno de encargos da Audi, relativamente aos elementos de fixação serem incorporados nos seus componentes.

É importante referir que apesar de a Audi não estabelecer valores relativamente à resistência que as fixações devem suportar na direção do corte, realizou-se ensaios físicos e numéricos segundo esta direção, o que levou a adotar não só a nomenclatura definida pela Renault nestas direções (Figura 57), como também o valor de força ao qual as fixações devem suportar (200 N).

Na Tabela 19 apresenta-se o resumo dos valores que as diferentes marcas estabelecem relativamente à resistência das fixações a serem incorporadas nos seus componentes.

Tabela 19 - Valores das marcas relativos à resistência das fixações nos seus componentes.

Marca	Força de montagem	Força de desmontagem	Força de arrancamento	Força de corte
Renault	≤ 8 daN	10–15 daN	≥ 20 daN	$\geq 12-15$ daN
Audi	NA	NA	≥ 40 daN	NA

NA – não aplicável

3.5 Metodologia de trabalho a seguir

A metodologia abordada para desenvolver os objetivos do trabalho incidiu nas seguintes fases:

- Primeiramente, selecionou-se um conjunto de componentes nos quais estão inseridas as fixações que serão objeto de estudo;
- Após a seleção das fixações *standard*, procedeu-se à leitura do caderno de encargos das marcas de forma a interpretar os valores admissíveis que estas estipulam para a resistência das fixações a incorporar nos seus componentes, bem como as condições de ensaio necessárias para obter esses valores;
- Seguiram-se os ensaios físicos onde, primeiramente, para cada tipologia de fixação, se definiram as posições das fixações para ensaio no conjunto dos componentes previamente selecionados. Após a escolha das posições das fixações nos componentes, iniciou-se a preparação dos modelos das fixações para ensaio, através da marcação e respetivo corte em torno dessas zonas;
- Uma vez preparados os modelos, deu-se início aos ensaios físicos nas direções ao arrancamento (sentido perpendicular à direção de montagem da chapa no *clip*) e ao corte (sentido colinear à direção de montagem da chapa no *clip*), segundo especificado no caderno de encargos. Os ensaios físicos foram levados a cabo numa máquina universal de testes da marca Tinius Olsen. O *software* utilizado para a aquisição de dados é fornecido igualmente pela Tinius Olsen e a célula de carga utilizada nos ensaios suporta uma carga de 100 N;
- Obtidos os resultados dos ensaios físicos, o próximo passo prendeu-se com a preparação dos modelos a três dimensões (3D) para simulação numérica, conforme preparados e ensaiados na realidade;
- Finalizada a preparação dos modelos, seguiram-se as simulações numéricas, nas quais se utilizaram, inicialmente, duas abordagens distintas. A primeira utilizou superfícies para realizar a aproximação dos modelos e a segunda recorreu a modelos sólidos, com vista a perceber qual das duas fornece melhores resultados;
- As simulações numéricas dos modelos em superfícies foram pré-processados simultaneamente no *software* ANSA (ANSA V22.0, BETA CAE Systems, USA) pertencente ao grupo BETA CAE Systems, e no *software* Abaqus (Abaqus 2021, Dassault Systèmes, USA) comercializado pela SIMULIA. Para o pós processamento, foi empregue apenas o *software* Abaqus. No que diz respeito aos modelos sólidos, estes foram pré e pós processados inteiramente no Abaqus;
- Concluídas as simulações numéricas, teve lugar uma fase de tratamento de dados que consistiu na comparação com os dados obtidos dos ensaios físicos e

onde se afinou os modelos numéricos com base nessas comparações. O tratamento de dados foi feito com auxílio de folhas de cálculo;

- Executadas as correlações, retiram-se as devidas conclusões tendo em conta alguns critérios de falha previamente discutidos;
- Identificadas as zonas das fixações a serem melhoradas, organizam-se e discutem-se as principais melhorias a serem implementadas nas fixações;
- Seguiu-se um processo iterativo, resultante dessa implementação de ideias de melhoria;
- Implementadas as melhorias, arquivou-se toda a documentação;
- Para complementar a dissertação, procedeu-se à simulação de análises quase estáticas em algumas das fixações, com o intuito de não só perceber onde é mais provável a rotura das fixações ocorrerem, como também entender como o erro evolui em relação às análises estáticas;
- Através da realização de análises dinâmicas, surgiu a ideia de estudar o efeito do *mass scaling* nas simulações. Este parâmetro apenas se encontra disponível no modo explícito do Abaqus.

3.6 Ensaios experimentais realizados

Este capítulo terá como foco principal a apresentação de todo o processo relativo à fase de testes nas três fixações.

3.6.1 Preparação dos modelos para ensaio

O processo de preparação dos modelos para ensaio seguiu a mesma metodologia em todas as fixações. Primeiramente, selecionou-se nos componentes de estudo um conjunto de fixações alargado para análise de forma a haver uma maior amostragem no que diz respeito ao comportamento de cada uma. Após a definição das posições das fixações, seguiu-se a marcação nos componentes, em torno das posições selecionadas, com a finalidade de realizar a furação para a respetiva fixação dos modelos de estudo à mesa da máquina de tração. Cada modelo foi devidamente identificado com o número da posição arbitrada, para um posterior correto tratamento de dados.

3.6.1.1 1ª fixação

Iniciou-se o procedimento de preparação dos modelos para ensaio com a escolha de três das dezasseis fixações localizadas no painel (devido ao número de ensaios a ser realizado, optou-se por selecionar apenas três fixações), segundo as posições da Figura 59, num total de três painéis, o que perfaz um total de 9 porta agrafos para ensaio, segundo os requisitos estipulados pela Renault, mencionados no capítulo 3.4 (3

fixações ensaiadas na direção A + 3 fixações ensaiadas na direção B + 3 fixações ensaiadas na direção C).

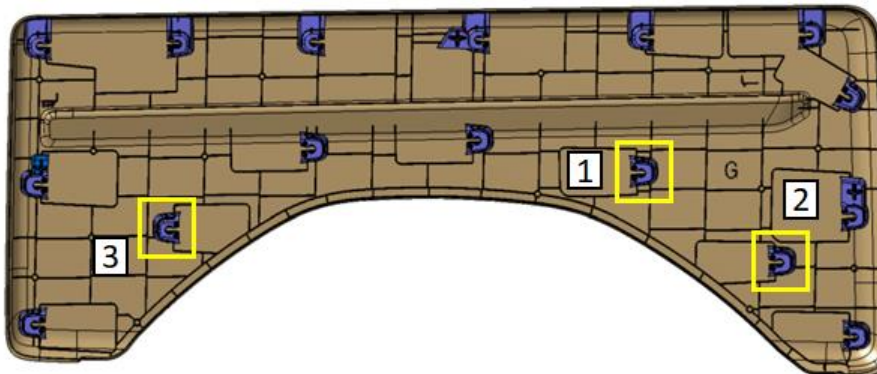


Figura 59 - Posições das fixações para estudo no painel de porta lateral traseiro, desenvolvido para a Renault, em formato CAD.

Arbitradas as posições das fixações para ensaio, efetuou-se de seguida a marcação no painel para realizar posteriormente a furação, com o intuito de fixar os modelos à mesa da máquina de tração. Estas marcações foram realizadas de forma a garantir que as zonas de furação se encontram o mais equidistantes possíveis dos porta agrafos, em todas as posições, para uma melhor distribuição dos esforços no momento dos testes (Figura 60).



Figura 60 - Marcação em torno das posições arbitradas de estudo para realização da furação: a) em torno das fixações da posição 1 e 2; b) marcações em torno da fixação da posição 3.

Seguidamente foram realizados os cortes e as respetivas furações dos modelos, em torno das posições delineadas em cada painel. Na Figura 61 apresentam-se alguns modelos preparados para ensaios físicos, cujo diâmetro dos furos efetuados para passagem de pernos roscados é de 7 mm.

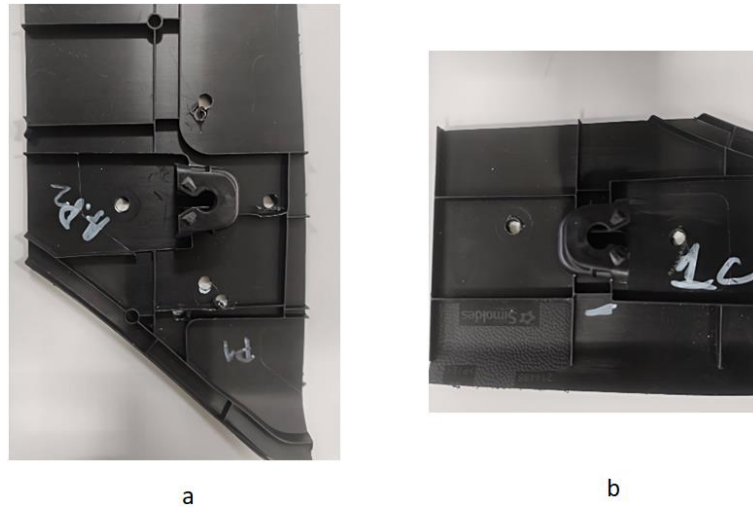


Figura 61 – Corte e furação de alguns modelos para ensaios físicos: a) modelo da posição 2 para ensaio de arrancamento, segundo a direção A; b); modelo da posição 1 para ensaio de corte, segundo a direção C.

3.6.1.2 2ª fixação

Para a segunda tipologia de fixação, o procedimento de preparação dos modelos para ensaio foi semelhante ao adotado para a 1ª fixação, com a escolha de três fixações posicionadas no componente (devido ao número de ensaios a ser realizado, optou-se por selecionar apenas três fixações), segundo a ordem da Figura 62, num total de três soleiras, o que totaliza nove fixações ensaiadas segundo as direções estipuladas pela Renault (3 fixações ensaiadas na direção A + 3 fixações ensaiadas na direção B + 3 fixações ensaiadas na direção C).

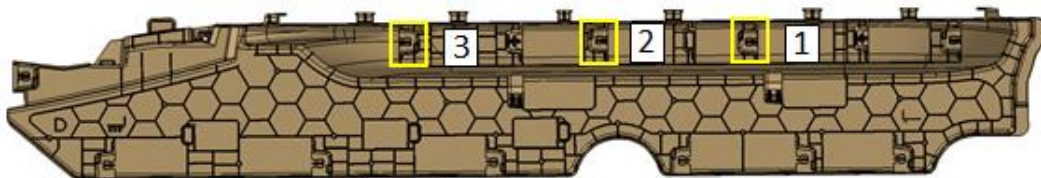


Figura 62 - Posições das fixações escolhidas para estudo na soleira, desenvolvida para a Renault, em formato CAD.

As posições arbitradas para estudo, demonstradas na Figura 62, podem ser visualizadas na Figura 63, já com a respetiva identificação no componente real.

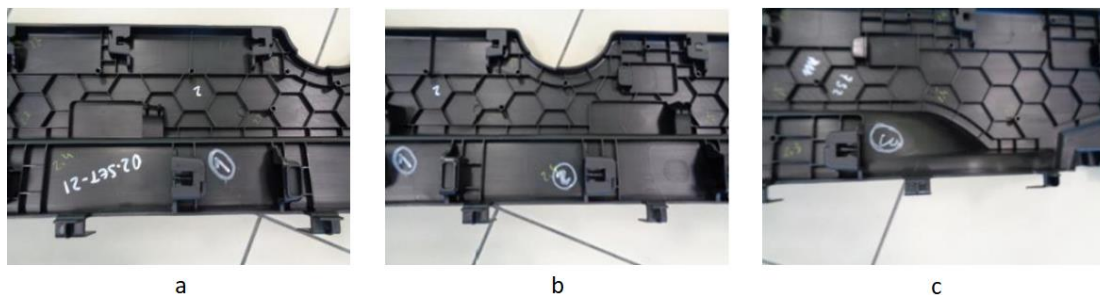


Figura 63 - Posições arbitradas para estudo no componente real: a) fixação da primeira posição; b) fixação da segunda posição; c) fixação da terceira posição.

Para estes modelos em concreto, foram realizados apenas dois furos para a respetiva fixação através de parafusos, anilhas e porcas, devido às limitações da geometria proveniente da localização das fixações. O diâmetro dos furos para passagem dos parafusos foi, à semelhança dos furos efetuados na 1ª fixação, igual a 7 mm. Na Figura 64 apresentam-se alguns exemplos de modelos, referentes às posições das fixações escolhidas, já preparados para ensaios físicos.



Figura 64 - Corte e furação de alguns modelos para ensaios físicos: a) modelo da posição 1 para ensaio de corte, segundo a direção B; b); modelo da posição 3 para ensaio de arrancamento, segundo a direção A.

3.6.1.3 3ª fixação

Para a tipologia de fixação incorporada no pilar b, desenvolvido para a Audi, foram escolhidas as duas fixações localizadas no fim de peça, segundo as posições da Figura 65, num total de seis fixações (dois pilares esquerdos + um pilar direito), conforme descrito no caderno de encargos da Audi, presente no capítulo 3.4.

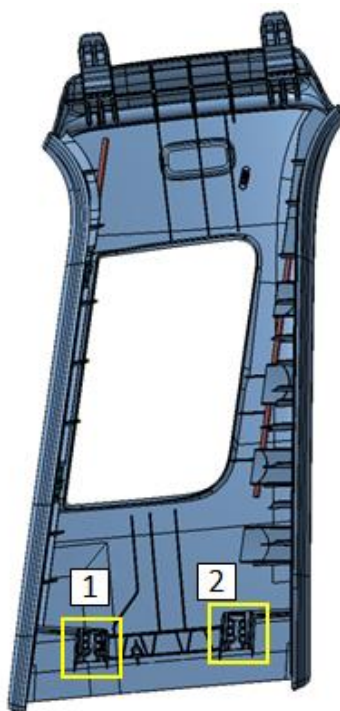


Figura 65 - Identificação das posições das fixações para estudo, no modelo CAD do pilar B, desenvolvido para a Audi.

Na Figura 66 apresentam-se as posições das fixações para estudo no componente real, identificadas na Figura 65.



Figura 66 - Posições das fixações arbitradas para estudo no componente real.

Neste caso em concreto não houve a necessidade de realizar o corte individual das fixações e realizou-se o corte numa zona intermédia do pilar (Figura 67). Uma vez que as fixações estão posicionadas na extremidade do pilar, apenas se realizou um furo a aproximadamente 20 mm da face de trás do porta agrafo. Na Figura 67 apresenta-se uma vista superior do pilar b, preparado para ensaio, devidamente furado e com marcações para posicionar um calço que será responsável pela estabilização do modelo do lado oposto ao furo realizado.

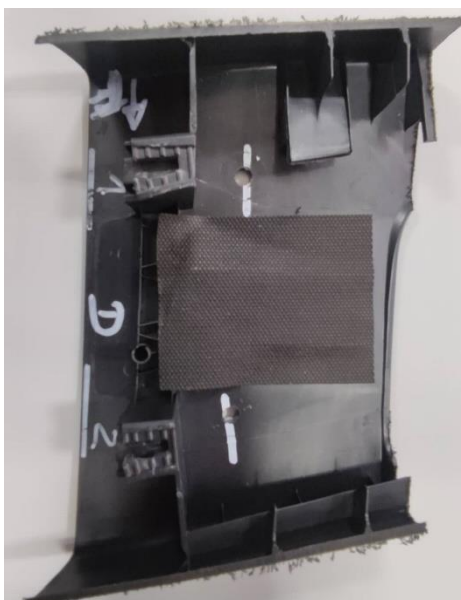


Figura 67 – Corte, furação e marcação do modelo do pilar b direito para realização de ensaios físicos de corte nas fixações da posição 1 e 2, segundo a direção C.

3.6.2 Condições e *set-up* de ensaio

Tanto as forças de tração (ensaio de arrancamento) como as de corte não foram previamente definidas, com o ensaio a ser interrompido na maior parte das vezes quando se deu a rotura dos porta agrafos. Na Tabela 20 apresentam-se os parâmetros definidos previamente relativamente aos ensaios de arrancamento e corte a serem efetuados nas fixações.

Tabela 20 - Condições de ensaio relativas ao ensaio de arrancamento e de corte

Velocidade de ensaio	Velocidade de aproximação	Força de arrancamento	Força de corte	Intervalo de extensão
100 mm/min	25 mm/min	Indefinida	Indefinida	1000 mm

Nos próximos subcapítulos serão abordadas as condições e o *set-up* de ensaio para cada tipo de fixação.

3.6.2.1 1ª fixação

Uma vez preparados os modelos para ensaio, prosseguiu-se com a realização dos ensaios físicos na 1ª fixação, onde a aplicação da força no porta agrafos, tanto ao corte como ao arrancamento, foi realizada por meio de uma ferramenta que replica a geometria do *clip* (Figura 68).



Figura 68 – Formato da ferramenta utilizado nos ensaios físicos que replica a geometria do *clip* incorporado na 1ª fixação.

Para o ensaio de arrancamento, segundo a direção A (Figura 57), posicionaram-se os modelos sobre a mesa da máquina de tração através da utilização de quatro pernos roscados e oito porcas, como se demonstra na Figura 69.



Figura 69 - Preparação da fixação da posição 1 para ensaio de arrancamento.

Ainda no que toca ao ensaio de arrancamento, as posições 2 e 3 tiveram as mesmas condições de teste às que se podem visualizar na Figura 69. No que diz respeito ao ensaio de corte, nas direções B e C, o posicionamento das fixações foi desta vez realizado apenas em dois pontos numa placa montada perpendicularmente à mesa de tração (Figura 70).



Figura 70 - Preparação da fixação da posição 2 para ensaio de corte.

No ensaio de corte, o porta agrafos da posição 3 apresenta uma disposição oposta no painel aos porta agrafos das posições 1 e 2, pelo que o modelo desta posição teve de ser devidamente posicionado na placa de apoio para que as direções de corte (direções B e C) estivessem em conformidade com os ensaios nas posições 1 e 2, e assim evitar erros aquando da interpretação dos dados.

3.6.2.2 2ª fixação

Para a 2ª fixação, foi utilizado um novo formato de ferramenta nos ensaios de arrancamento e corte (Figura 71).



Figura 71 - Formato da ferramenta utilizado nos ensaios físicos que replica a geometria do *clip* incorporado na 2ª fixação.

O posicionamento dos modelos para o ensaio de arrancamento é realizado por ligação aparafusada. O facto de a face superior do porta agrafo apresentar uma inclinação relativamente ao plano de assentamento do *clip* implicou a utilização de um calço para garantir que a força de arrancamento seja colinear à direção de montagem da chapa na fixação (Figura 72).

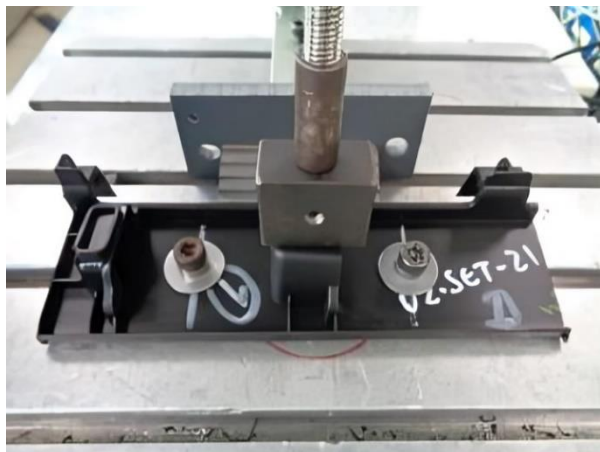


Figura 72 - Preparação da fixação da posição 1 para ensaio de arrancamento.

Em relação ao posicionamento dos modelos para os ensaios de corte, nas direções B e C, foi utilizada a mesma metodologia adotada para o posicionamento dos modelos ensaiados ao corte na 1ª fixação, com o apoio dos modelos a ser realizada com recurso a uma placa furada, posicionada perpendicularmente à mesa da máquina de tração. A utilização de calços foi mais uma vez necessária para garantir a perpendicularidade da força de corte em relação à direção de montagem da chapa na fixação (Figura 73).

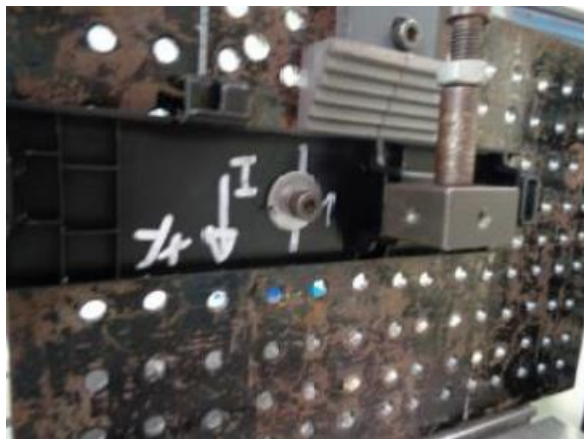


Figura 73 - Preparação da fixação da posição 3 para ensaio de corte.

3.6.2.3 3ª fixação

Para a realização dos ensaios físicos nesta terceira e última fixação foi utilizada outra geometria de ferramenta, igual à apresentada na Figura 74.



Figura 74 - Formato da ferramenta utilizada nos ensaios físicos que replica a geometria do *clip* incorporado na 3ª fixação.

Como referido e apresentado no capítulo 3.6.1.3, não foi necessário realizar o corte individual em redor de cada fixação, à semelhança do que se fez para as duas fixações anteriores, devido às dimensões do pilar B da Audi e à acessibilidade dos dois porta-agrafos dispostos no componente. Deste modo, em cada pilar, foram ensaiadas duas fixações individualmente para cada direção de ensaio, num total de três pilares. A nível de arrancamento na direção F1, foi utilizado um calço com formato retangular, centrado com o porta-agrafo e com uma sobreposição para fixação do pilar de 5 mm e

um parafuso roscado numa porca e uma anilha, todos eles alinhados com o centro do porta agrafo.

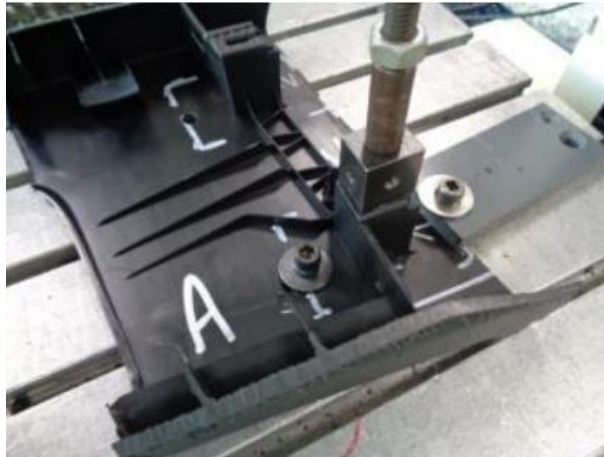


Figura 75 - Preparação da fixação da posição 1 para ensaio de arrancamento.

No que concerne aos ensaios de corte, apesar de a Audi não estabelecer especificações em relação à resistência das fixações nesta direção, procedeu-se aos testes físicos com o intuito de, posteriormente, fazer a correlação com as simulações numéricas e prevenir eventuais zonas frágeis. Os modelos foram posicionados, mais uma vez, sobre uma placa furada perpendicular à mesa da máquina de ensaios (Figura 76).

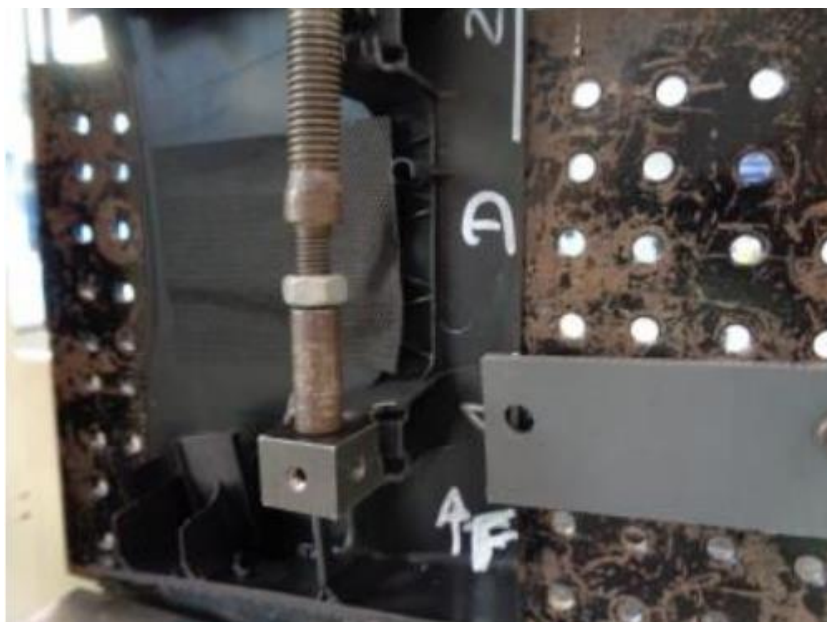


Figura 76 - Preparação da fixação da posição 1 para ensaio corte na direção C.

3.6.3 Resultados do ensaio

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados provenientes dos ensaios físicos realizados, em forma de gráficos força *versus* deslocamento, para cada fixação, nas três direções de ensaio, segundo as nomenclaturas referidas no caderno de encargos das marcas.

3.6.3.1 1ª fixação

Para a 1ª fixação, obtiveram-se os seguintes resultados referentes ao comportamento de cada posição ensaiada, segundo as direções A, B e C da Figura 57. Os resultados são demonstrados na Figura 77, Figura 78 e Figura 79.

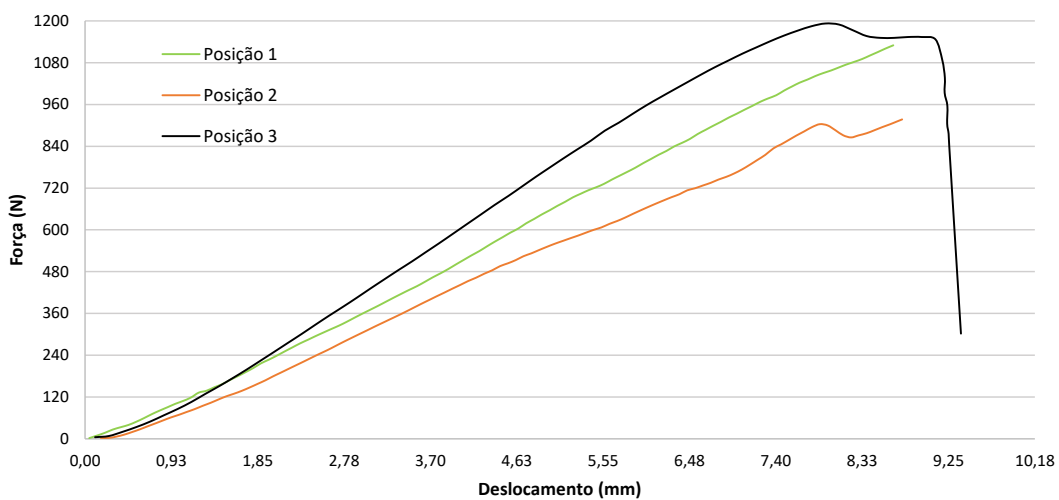


Figura 77 - Gráfico força *versus* deslocamento para cada posição, ensaiada ao arrancamento (direção A), referente à 1ª fixação.

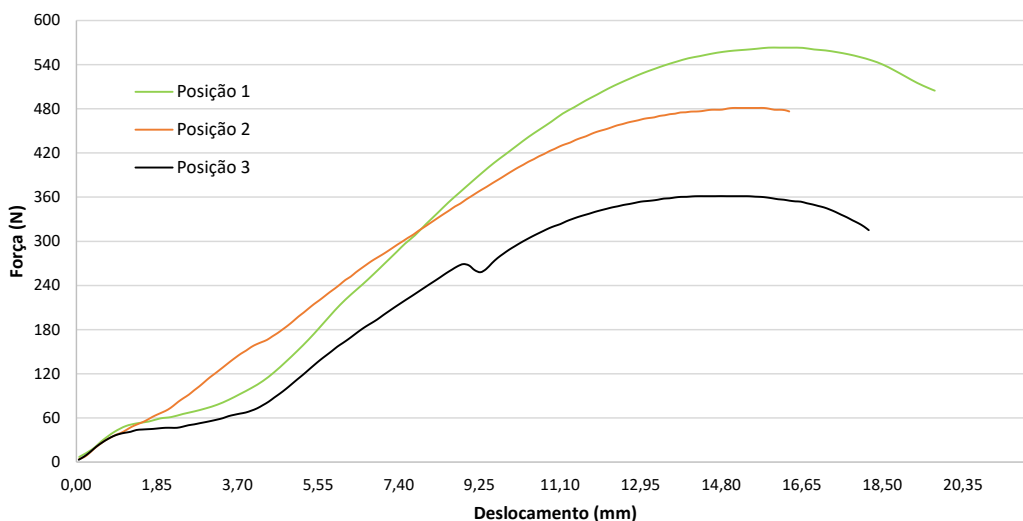


Figura 78 - Gráfico força *versus* deslocamento para cada posição, ensaiada segundo ao corte (direção B), referente à 1ª fixação.

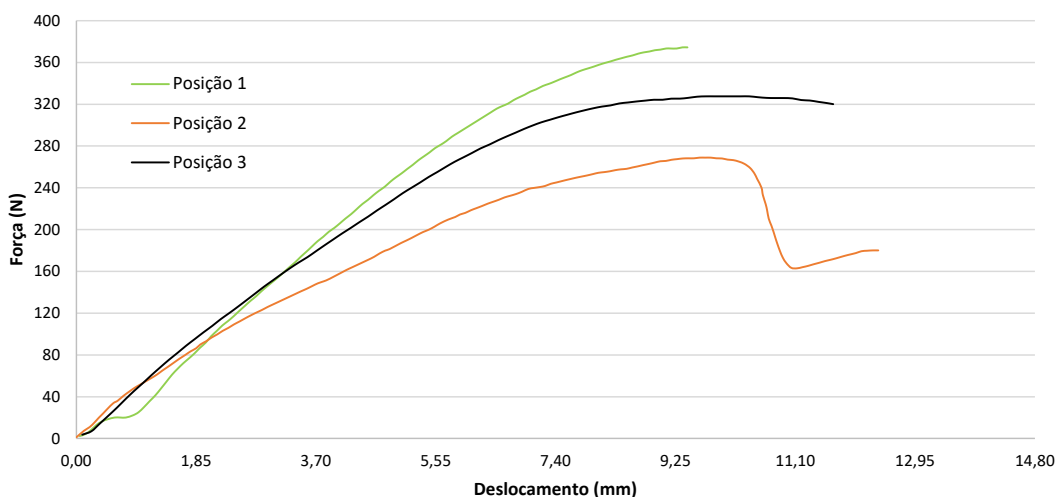


Figura 79 - Gráfico força *versus* deslocamento para cada posição, ensaiada ao corte (direção C), referente à 1ª fixação.

A partir dos gráficos apresentados na Figura 77, Figura 78 e Figura 79, é visível uma proximidade no comportamento das três posições em cada direção de ensaio. No ensaio de arrancamento, confirma-se que a fixação da posição de ensaio 3 é uma das que mais força aguenta antes da rotura, com valores até 1200 N (Figura 77). Relativamente aos ensaios de corte conclui-se que, tanto na direção de ensaio B como na direção de ensaio C, a posição 1 é a que mais força suporta antes da rotura, com valores respetivos de aproximadamente 375 N e 564 N. Em algumas situações, os ensaios não foram levados até à rotura dos porta agrafos. Um destes casos diz respeito à fixação da posição 1, ensaiada na direção do arrancamento (Figura 77), já que se denota que a curva força *versus* deslocamento não perde a rigidez esperada associada à rotura. A razão pela qual se parou o ensaio neste ponto deveu-se ao facto de a cedência do plástico já ser visível muito antes dos valores de força registados nesta altura, e que apontavam para magnitudes na ordem dos 1130 N, valor este muito acima do pretendido pela Renault (200 N ao arrancamento). Na Tabela 21 resumem-se as forças máximas suportadas por cada posição, em cada direção de ensaio, antes do início da rotura das fixações.

Salienta-se o facto de os ensaios ao corte, tanto na direção B como na direção C, poderem ter sido induzidos de algumas imprecisões, devido à tendência da ferramenta de ensaio escorregar gradualmente pela direção do movimento de extração à medida que o ensaio é realizado. Outro aspeto que deve ser minimizado ao máximo é o efeito da pré tensão provocado pelo aperto dos parafusos ou por outros elementos fixadores no início do ensaio, já que este constitui um dos fatores que pode influenciar a correlação com as simulações numéricas.

Tabela 21 - Forças máximas registadas para cada posição da 1ª fixação, segundo as direções de ensaio estipuladas.

Direção de ensaio	Posição	Força máxima (N)
A	Posição 1	1130
	Posição 2	915
	Posição 3	1190
B	Posição 1	375
	Posição 2	269
	Posição 3	327
C	Posição 1	564
	Posição 2	480
	Posição 3	361

Os ensaios realizados ao corte, segundo a direção B, em todas as posições de teste, são um bom exemplo deste efeito de pré tensão (Figura 80). A posição 1 ensaiada ao corte, segundo a direção C, é também influenciada por este efeito.

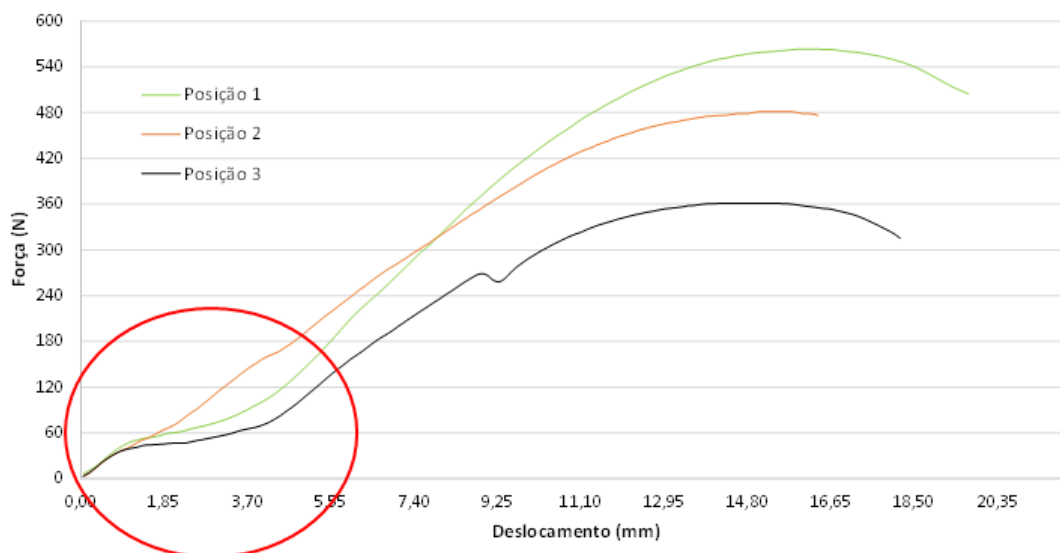


Figura 80 – Região afetada pela pré tensão provocada pelos elementos fixadores nas fixações das posições ensaiadas ao corte segundo a direção B.

Resultante do ensaio de arrancamento, uma das evidências comuns, não apenas nesta fixação em específico, mas em todas as fixações que serão alvo de estudo, reside no início da rotura ter lugar na zona frontal do porta agravo (Figura 81).

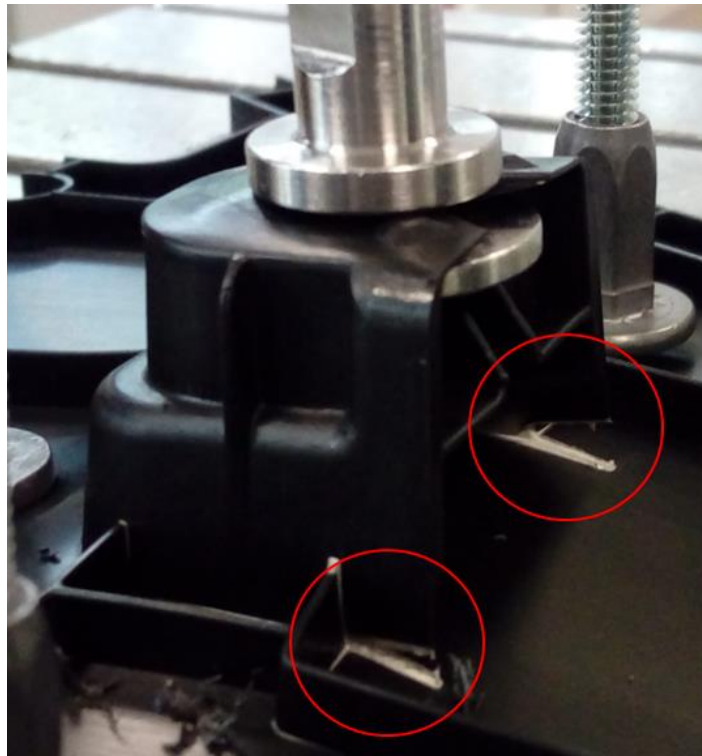


Figura 81 – Zonas do porta agravo onde se inicia a rotura no ensaio de arrancamento.

Na Figura 82 demonstra-se a fixação da posição de ensaio 3, após o ensaio de arrancamento, cujo porta agravo se desagrega do componente.

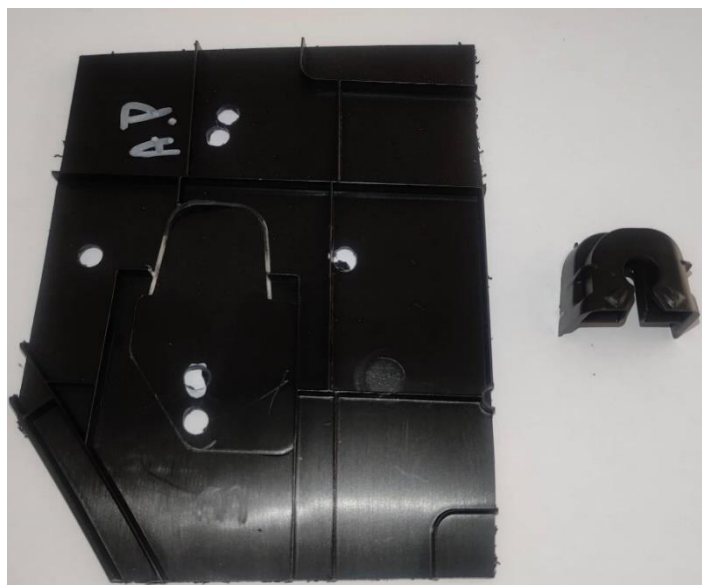


Figura 82 – Fixação da posição 3 após ensaio de arrancamento.

3.6.3.2 2ª fixação

Para a 2ª fixação, apresenta-se de igual forma os resultados referentes ao comportamento de cada posição nas direções de ensaio A, B e C (Figura 57), respetivamente (Figura 83, Figura 84 e Figura 85).

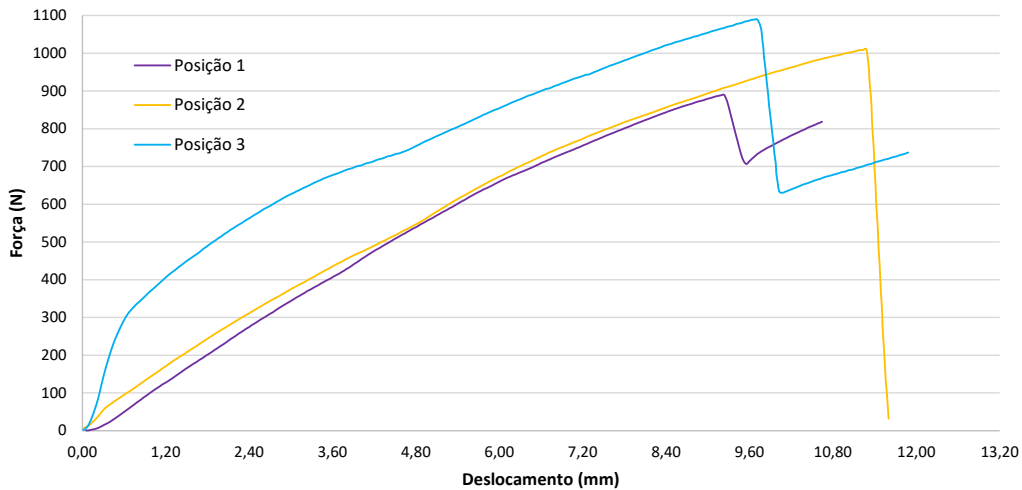


Figura 83 - Gráfico força versus deslocamento para cada posição ensaiada, segundo a direção A, referente à 2ª fixação.

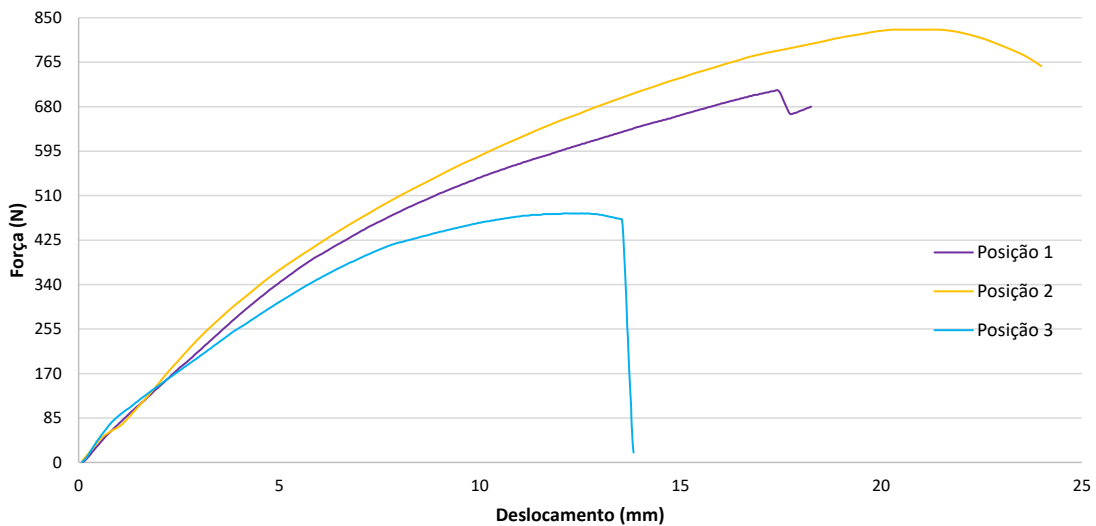


Figura 84 - Gráfico força versus deslocamento para cada posição ensaiada, segundo a direção B, referente à 2ª fixação.

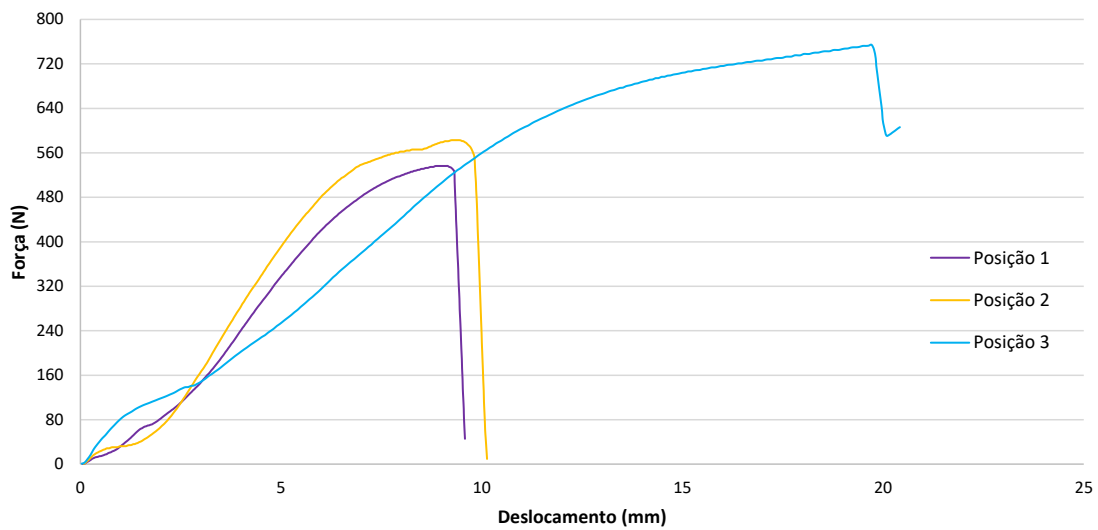


Figura 85 - Gráfico força *versus* deslocamento para cada posição ensaiada, segundo a direção C, referente à 2ª fixação.

Através da análise dos dados, denota-se que em todas as direções de ensaio, a fixação da posição 3 apresenta um comportamento diferente das outras duas posições de estudo. Esta diferença pode ser explicada devido ao facto de um dos dois pontos utilizados para fixar o modelo à base da máquina de ensaios ter sido feito sobre os frisos de reforço, utilizados para reforçar aquela zona da peça em específico, como se demonstra na Figura 86.



Figura 86 – Detalhe das condições de fixação num dos pontos do modelo da posição 3, referente à 2ª posição.

Devido a este detalhe optou-se por não se considerar esta posição para correlação com o ensaio numérico, pois esta influenciaria os valores do erro relativo. Na Tabela 22 registam-se as forças máximas que as fixações suportam antes do início da rotura.

Tabela 22 - Forças máximas registadas para cada posição da 2ª fixação, segundo as direções de ensaio estipuladas.

Direção de ensaio	Posição	Força máxima (N)
A	Posição 1	888
	Posição 2	1010
	Posição 3	1090
B	Posição 1	713
	Posição 2	826
	Posição 3	475
C	Posição 1	536
	Posição 2	582
	Posição 3	752

Visualmente, após o ensaio ao arrancamento, verificou-se que a rotura é propícia a ter início na zona superior do porta agrafo. Uma possível explicação reside no facto de, nesta zona, o porta agrafo possuir um rasgo para guiar o *clip*, o que acaba por fragilizar a fixação. Na Figura 86 visualiza-se o modo de rotura da posição de teste 2, após ensaio de arrancamento.



Figura 87 - Rotura da zona superior do porta agrafo na 2ª posição de estudo, após ensaio de arrancamento.

No que toca à direção de ensaio B, a rotura não é total. No entanto, devido à força lateral, a zona identificada na Figura 88, correspondente à fixação da 2ª posição de estudo, acaba por danificar.

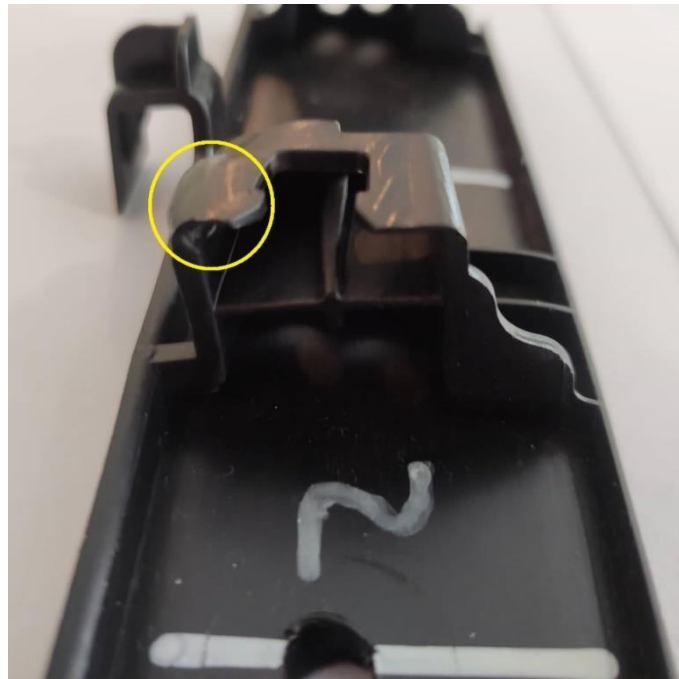


Figura 88 – Zona lateral danificada da fixação da 2ª posição de estudo, após ensaio de corte na direção B.

Na direção de ensaio C, dá-se a rotura lateral do porta agrafos nas três posições de estudo ensaiadas, tal como se pode observar na Figura 89.

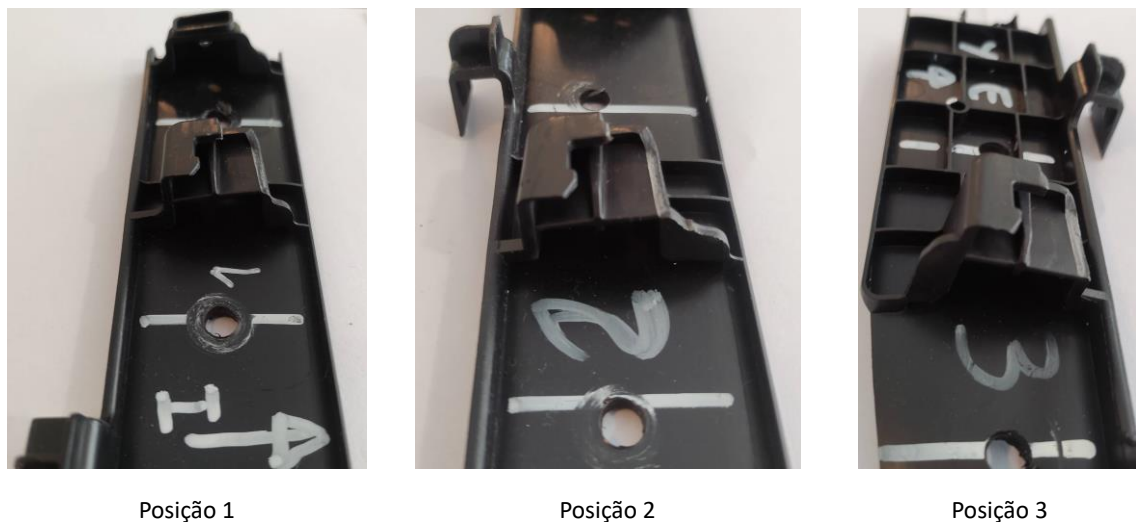


Figura 89 – Rotura lateral das três posições de estudo segundo a direção C.

3.6.3.3 3ª fixação

Por último, referente à 3ª fixação, apresentam-se os resultados referentes ao comportamento de cada posição nas direções de ensaio F1 (ensaio de arrancamento) (Figura 58), B e C (ensaios de corte), respetivamente (Figura 90, Figura 91 e Figura 92).

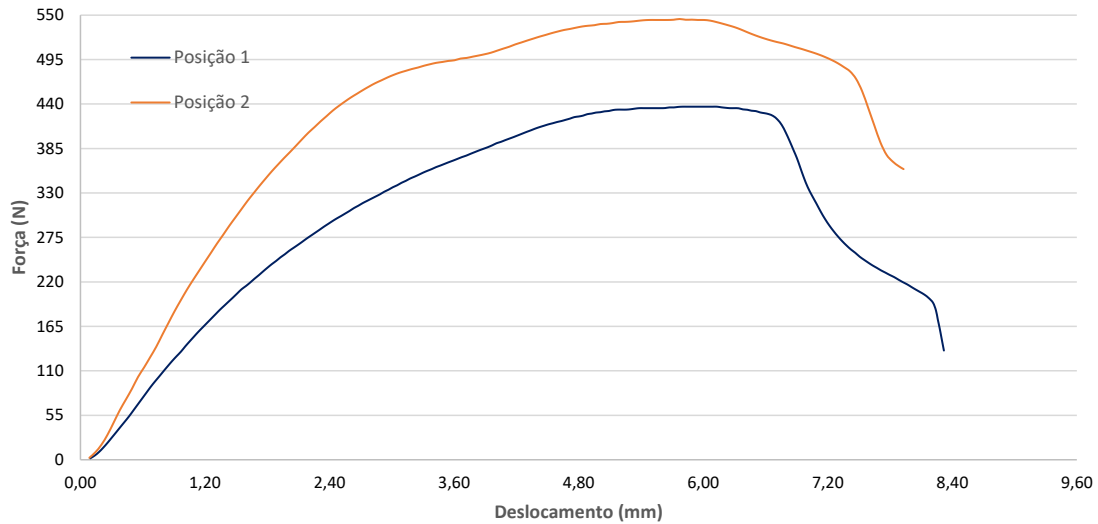


Figura 90 - Gráfico força *versus* deslocamento para cada posição ensaiada, segundo a direção F1, referente à 3ª fixação.

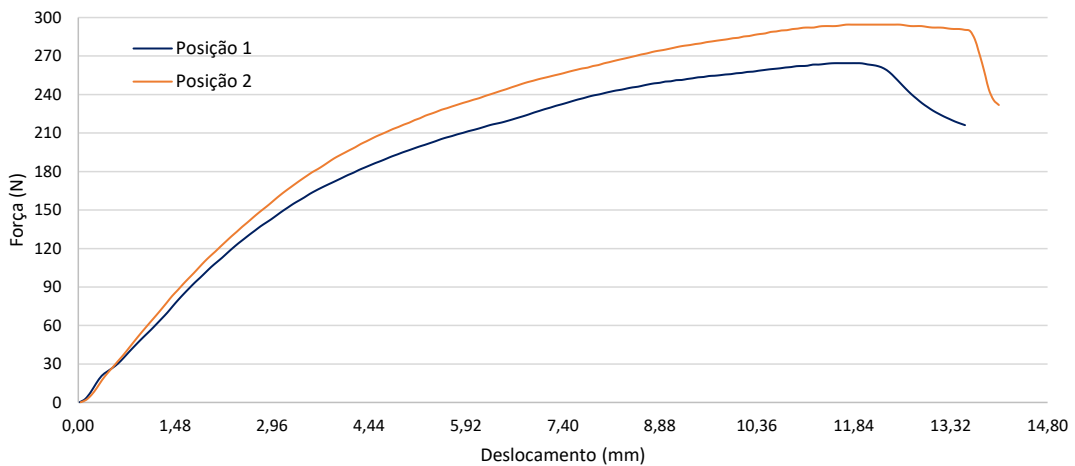


Figura 91 - Gráfico força *versus* deslocamento para cada posição ensaiada segundo a direção B, referente à 3ª fixação.

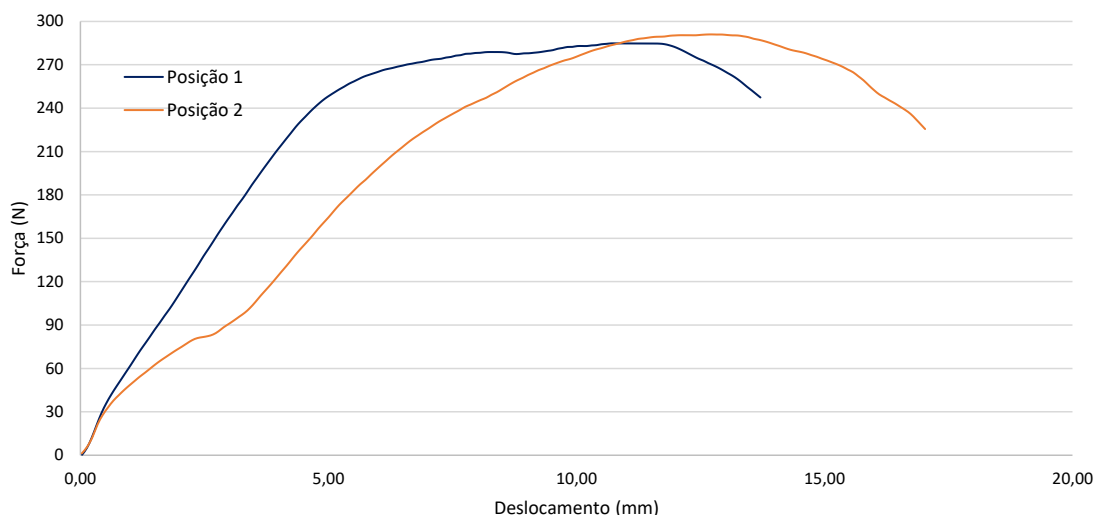


Figura 92 - Gráfico força *versus* deslocamento para cada posição ensaiada segundo a direção C, referente à 3ª fixação.

Analisando o gráfico da Figura 90, referente às duas fixações ensaiadas, segundo a direção do arrancamento, verifica-se que o valor da rotura nas duas posições ocorre entre os 400 N e os 550 N. Já para os ensaios de corte em ambas as direções, os valores de força máxima variam entre os 260 N e os 300 N. É de referir que os ensaios segundo a direção C (Figura 92) foram ligeiramente afetados pela pré tensão provocados pelos elementos fixadores dos modelos, ao contrário do que se verifica no ensaio de corte segundo a direção B (Figura 91). Na Tabela 23 registam-se as forças máximas que as fixações suportam antes do início da rotura.

Tabela 23 - Forças máximas registadas para cada posição da 2ª fixação, segundo as direções de ensaio estipuladas.

Direção de ensaio	Posição	Força máxima (N)
F1	Posição 1	435
	Posição 2	544
B	Posição 1	264
	Posição 2	294
C	Posição 1	285
	Posição 2	291

Na Figura 93 apresentam-se as duas fixações após os ensaios de arrancamento.

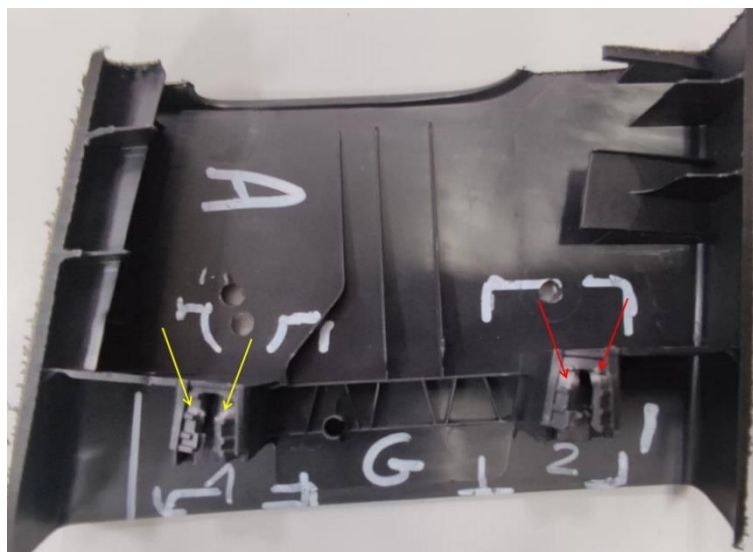


Figura 93 - Fixações após o ensaio de arrancamento.

Verifica-se, através da visualização da Figura 93, que as abas dos porta agrafos na zona superior onde as nervuras de reforço estão dispostas, deformam plasticamente e sofrem rotura devido à força de arrancamento. Na fixação da posição 1 salienta-se o facto de provavelmente a ferramenta de ensaio não ter sido devidamente posicionada, uma vez que se verifica que o porta agrafos entra em rotura a meio da zona superior, tal como as setas a amarelo pretendem demonstrar na Figura 93. As zonas indicadas pelas setas vermelhas na segunda posição começam a ceder no sítio onde o *clip* metálico faz batente com o *clip* (Figura 93). Na Figura 94, demonstram-se duas das fixações testadas segundo a direção B.

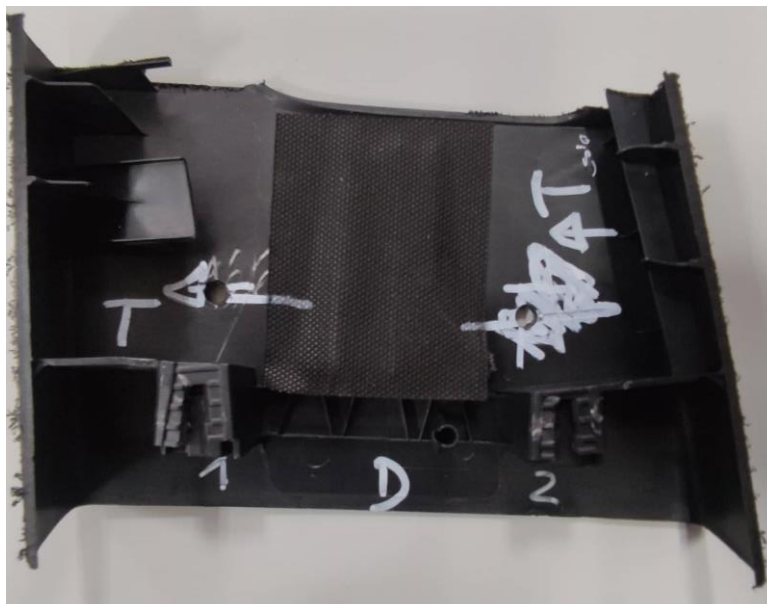


Figura 94 – Fixações ensaiadas ao corte segundo a direção B.

3.7 Simulações numéricas estáticas

Após a realização dos ensaios físicos iniciaram-se simulações numéricas em cada fixação com base nas condições de teste abordadas no capítulo 3.6. Nos próximos subcapítulos é apresentada a metodologia de análise utilizada nos ensaios numéricos estáticos para cada fixação e descritos os resultados obtidos.

3.7.1 Condições da análise numérica estática

Numa primeira fase serão utilizadas duas abordagens distintas para a modelação dos modelos das fixações. A primeira incorreu na utilização de elementos de casca (*shell elements*) e a segunda na utilização de elementos sólidos. A utilização de elementos de casca, apesar de ser uma aproximação do modelo real, é uma opção viável e pode ser utilizada para modelar estruturas onde uma dimensão é significativamente mais reduzida comparada com as restantes dimensões [113]. Esta abordagem permite reduzir a complexidade dos modelos e acelerar o tempo de computação da simulação. A utilização de elementos sólidos para a modelação dos modelos das fixações, apesar de ser mais morosa a nível computacional em comparação com a utilização de elementos de casca, é mais realista em termos de aproximação da geometria dos modelos físicos. Na primeira abordagem, para o tratamento das superfícies e a geração de malha, utilizou-se o *software* ANSA, um pré-processador pertencente ao grupo BETA CAE Systems e o Abaqus, comercializado pela SIMULIA, para completar o pré-processamento e realizar o processamento. Na segunda abordagem, utilizou-se apenas o Abaqus para o pré e o pós processamento dos modelos sólidos.

Posto isto, no subcapítulo 3.7.1.1 vai ser demonstrado o processo de preparação para as duas abordagens (superfícies e sólidos) relativamente à 1ª fixação. Tendo em conta o erro relativo proveniente dos resultados obtidos, posteriormente, nos subcapítulos seguintes, é apenas utilizada a abordagem que apresentou melhor precisão.

Visto que existem processos comuns na fase de preparação das simulações numéricas nas três fixações, a parte introdutória do capítulo apresenta alguns pontos de forma a não repetir para cada fixação as mesmas explicações. O primeiro ponto prende-se com a definição dos parâmetros para a malha dos modelos sólidos. Perante a complexidade geométrica dos modelos da fixação, optou-se por utilizar elementos tetraédricos, já que estes oferecem mais rapidez na geração da malha comparativamente aos elementos hexaédricos. Por outro lado, os elementos tetraédricos de segunda ordem apresentam melhor desempenho em comparação com os elementos tetraédricos lineares, que são muito rígidos especialmente à flexão. Em contrapartida os elementos de segunda ordem são mais sensíveis à distorção do que os elementos de primeira ordem, o que pode levar a problemas de convergência na simulação numérica [114].

Na Figura 95 demonstram-se os parâmetros utilizados para a malha das partes deformáveis dos modelos das três fixações.

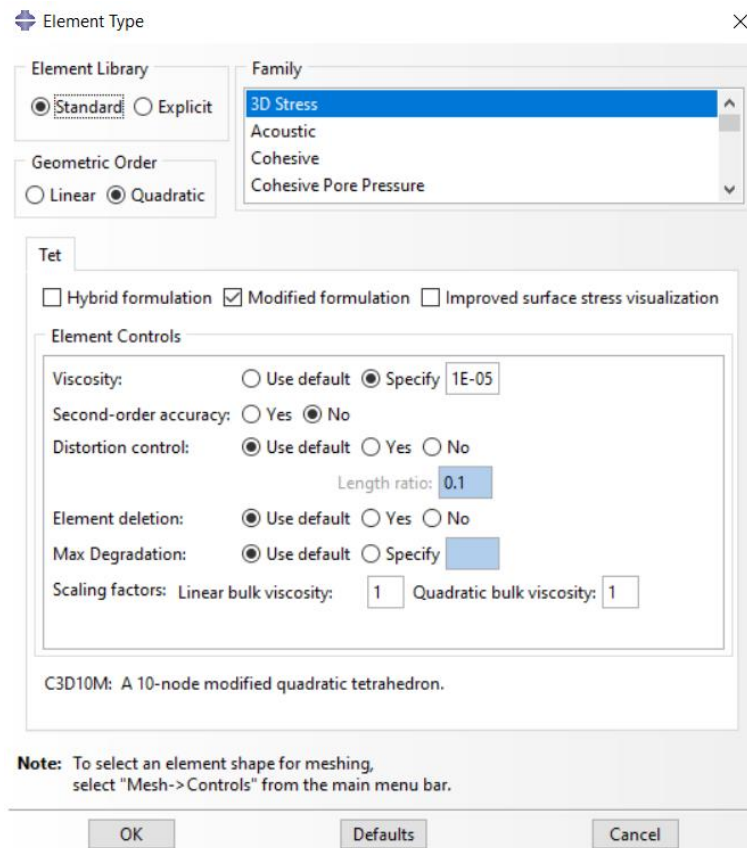


Figura 95 – Parâmetros de malha relativos às partes deformáveis dos modelos sólidos das três fixações.

Através da observação da Figura 95 é possível verificar a opção por elementos tetraédricos de segunda ordem com formulação modificada, denominados pelo Abaqus de “C3D10M”. A formulação modificada ajuda a mitigar os problemas associados aos elementos tetraédricos lineares, relacionados com o “*shear locking*” e o “*volumetric locking*” através da modificação dos elementos constituintes da malha [115]. Outro aspeto relevante, que pode também ser visualizado na Figura 95, prende-se com a introdução de um valor de viscosidade para os elementos constituintes da malha, igual a 1E-5. Geralmente este valor auxilia na convergência da solução numérica e deve ser suficientemente pequeno de forma a não comprometer a precisão dos resultados provenientes da simulação. Seguidamente apresentam-se na, Figura 96, os parâmetros da malha utilizados nos corpos considerados rígidos (ferramenta de ensaio e mesa da máquina de tração) nos três modelos de fixação para estudo.

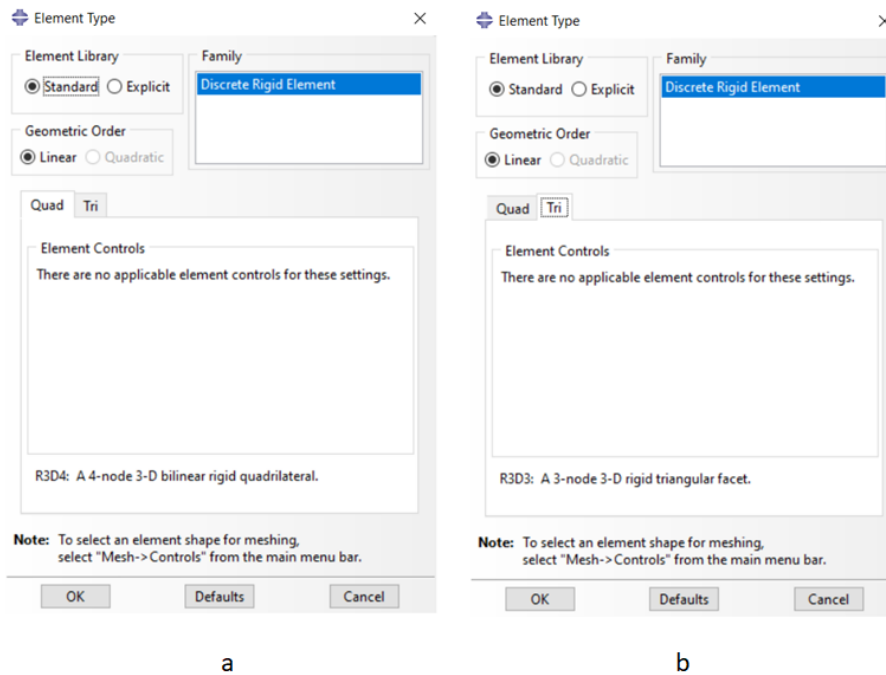


Figura 96 - Parâmetros de malha das partes rígidas dos modelos sólidos das três fixações: a) elementos “R3D4” utilizados na ferramenta e na placa; b) elementos “R3D3” utilizados na ferramenta.

Outro aspecto comum prende-se com o tipo de interação fornecido entre os elementos constituintes dos modelos de cada fixação. Quando possível, utilizaram-se contatos do tipo “*General contact*”, visto que estes permitem definir todos os contatos existentes nos modelos de uma forma rápida e automática com apenas uma interação (Figura 97).

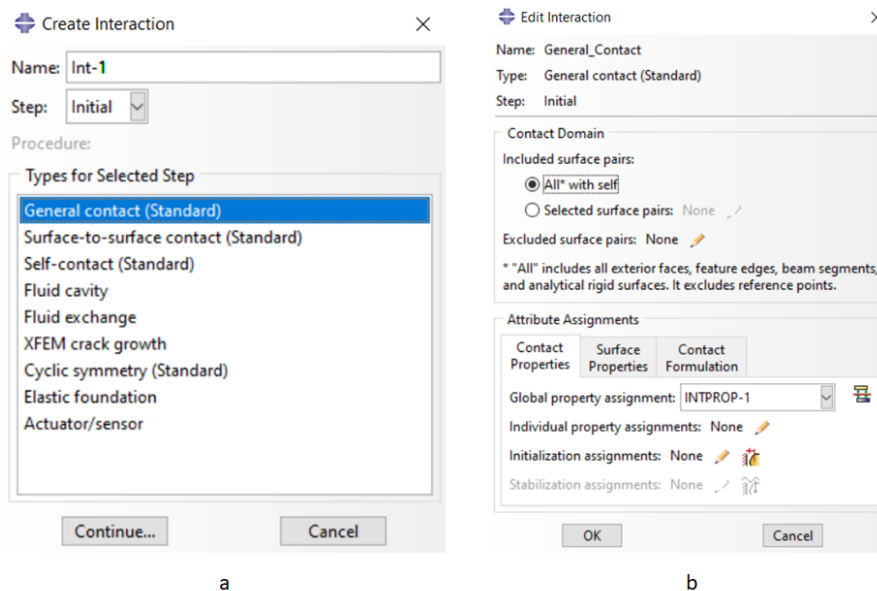


Figura 97 – Interação do tipo “*General contact*”: a) janela de definição da interação no Abaqus; b) parâmetros da interação.

Além do “*General contact*” foi utilizado o “*Surface to surface contact*” quando se quis definir individualmente o contato entre duas superfícies deformáveis ou entre uma superfície deformável e uma superfície rígida (Figura 98).

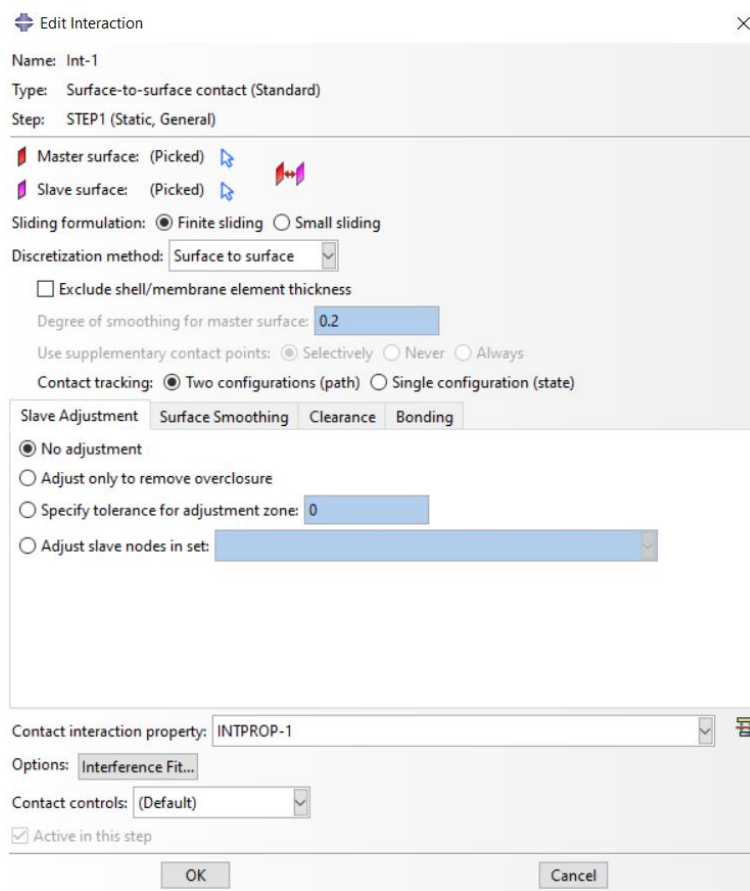


Figura 98 - Definição dos parâmetros relativos à interação do tipo “*Surface to surface*”.

Através da observação da Figura 98, é visível neste tipo de interação a necessidade de escolher uma “*Master Surface*” e uma “*Slave Surface*”. Regra geral, as superfícies mais rígidas e as que possuem malha mais grosseira deverão ser as definidas como “*Master surface*” ([114]). Adicionalmente, neste tipo de interação, optou-se pela ativação do parâmetro de suavização de superfícies (Figura 99), direcionado para evitar problemas resultantes de contatos, tais como penetrações entre nós da “*Master surface*” e a “*Slave Surface*” [114].

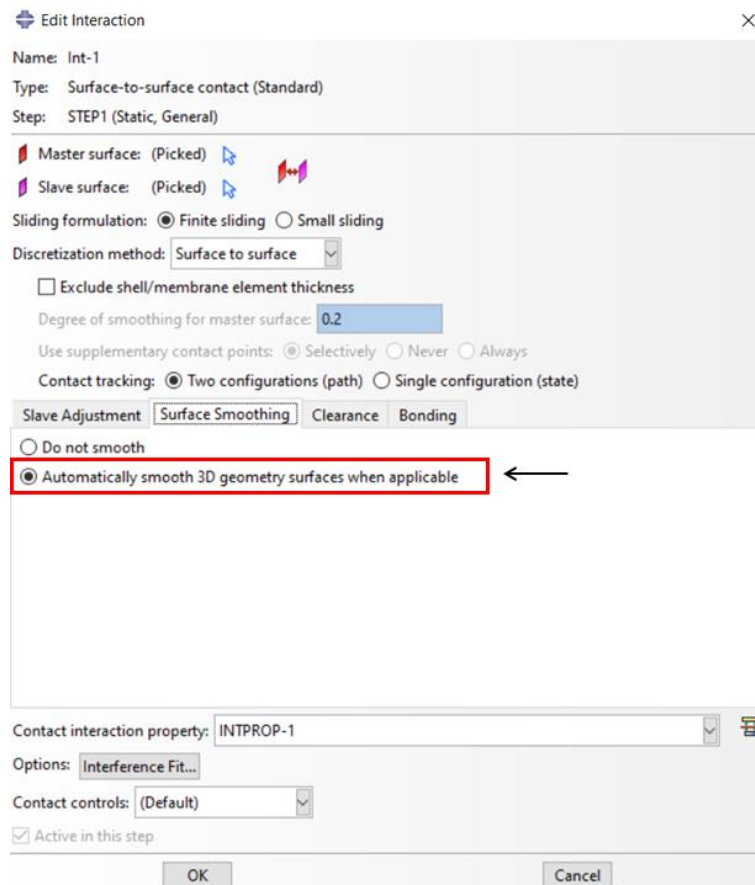
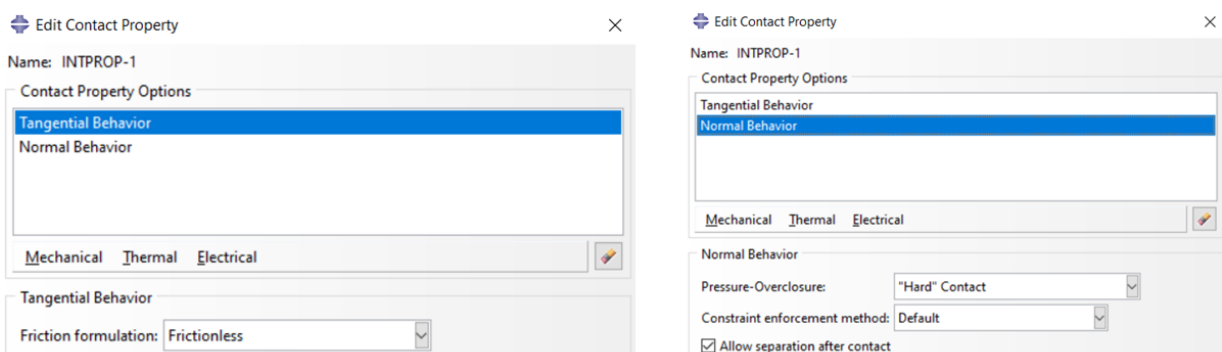


Figura 99 - Ativação do parâmetro de suavização de superfícies na interação do tipo "Surface to surface".

Tanto na interação do tipo "General contact" como na "Surface to surface" foi necessário atribuir duas propriedades relativas ao comportamento tangencial e normal. Na Figura 100 identificam-se os parâmetros predefinidos pelo Abaqus atribuídos para as duas propriedades referidas anteriormente.



a

b

Figura 100 – Parâmetros relativos às propriedades dos contatos: a) comportamento tangencial; b) comportamento normal.

Para cada simulação foram criados dois *steps*, o primeiro correspondente ao “*Inicial step*”, predefinido pelo Abaqus, e o segundo respeitante ao “*Step-1*”, no qual são aplicadas as cargas nas diferentes direções, por meio de um deslocamento. Esta abordagem evita instabilidades nos modelos devido a perdas de capacidade de carga. Na Figura 101 apresentam-se os parâmetros adotados para o “*Step-1*” onde se consideram os efeitos não lineares geométricos devido à natureza dos ensaios, que foram levados até ao início da rotura das fixações, e onde se definiu uma estabilização automática para as simulações através da especificação de uma fração de energia dissipada.

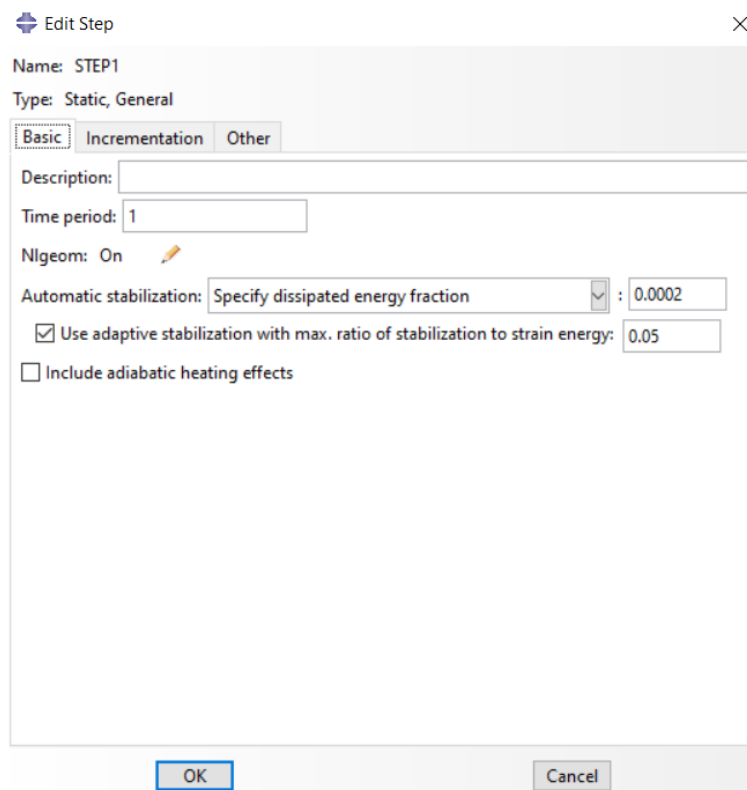


Figura 101 – Parâmetros “*Step-1*”.

No que toca à aquisição de dados e com o intuito de traçar os gráficos força *versus* deslocamento, solicitou-se ao *software* as variáveis força e deslocamento, segundo as direções de um eixo local criado para cada fixação, para uma percentagem de aquisição de 1% relativamente ao tempo do *step*, o que se traduz numa aquisição de aproximadamente 100 pontos (Figura 102).

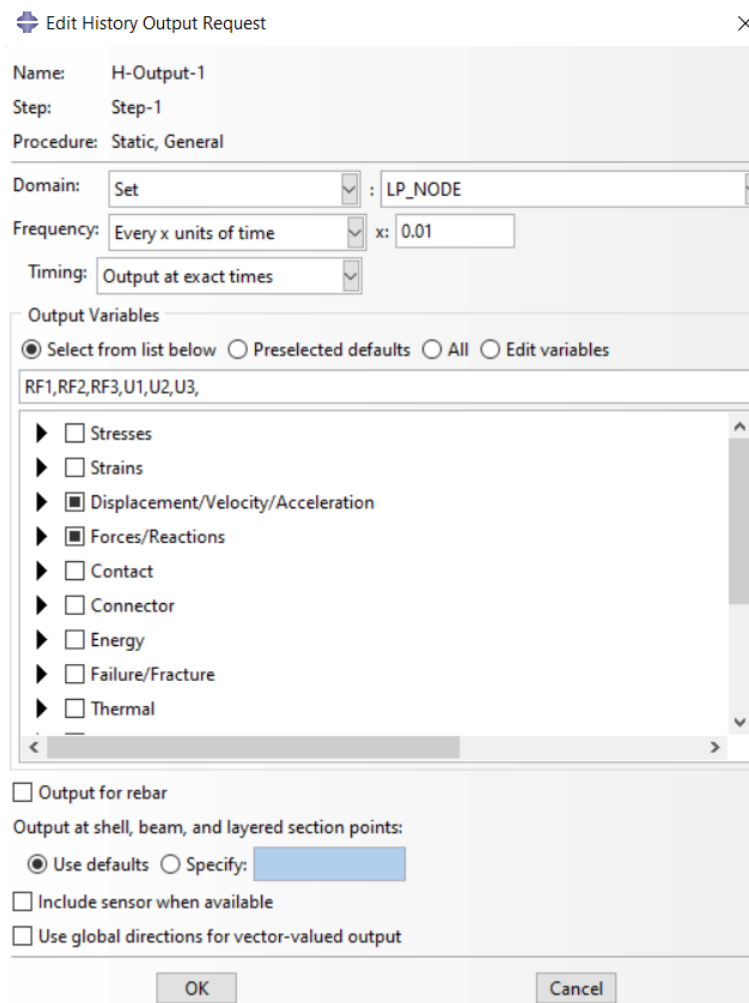


Figura 102 - Variáveis requeridas no "History Output Request".

Variáveis como as tensões e deformações foram requeridas para todo o modelo no "Field Output Request" para um mesmo tempo de 0,01 s (Figura 103).

Figura 103 - Variáveis requeridas no "Field Output Request".

Todas as simulações abordadas neste capítulo, por aproximação, são de cariz estático devido à natureza da ação da carga a que cada fixação foi sujeita nos diferentes ensaios físicos (velocidade de ensaio de 100 mm/min) [116]. Deste modo os efeitos inerciais não são tidos em conta já que a aplicação da carga é demasiado lenta ao ponto de se considerar que esta varia no tempo e, portanto, considerou-se que se está perante análises estáticas.

3.7.1.1 1ª fixação

3.7.1.1.1 Modelo superfícies

No que diz respeito à 1ª fixação, primeiramente preparou-se o modelo 3D através de um corte no painel, em torno da posição 1, com recurso ao *software* CATIA (Figura 104).

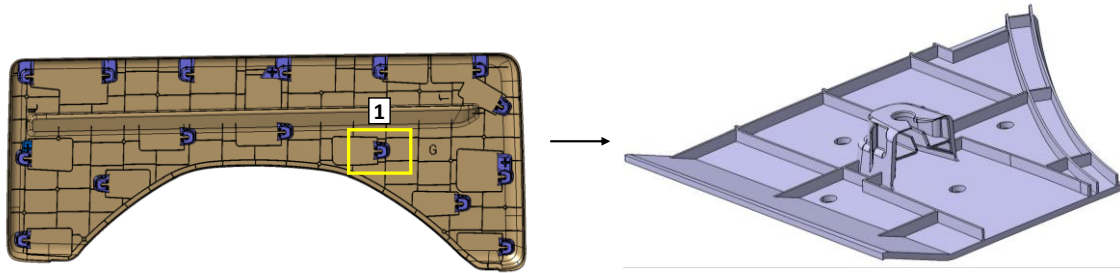


Figura 104 - Preparação do modelo 3D da posição 1 para simulação numérica da 1ª fixação.

Optou-se por escolher a fixação da posição 1 do painel para simulação de ensaio de arrancamento e de corte. No entanto, era de igual forma correto optar por qualquer outra posição, uma vez que todas as fixações possuem a mesma geometria. Os quatro furos incorporados no modelo 3D da fixação na Figura 104 foram realizados tendo em conta o procedimento descrito no subcapítulo 3.6.1.1 “1ª fixação” do capítulo 3.6.1 “Preparação dos modelos para ensaio” e apresentam as dimensões visualizadas na Figura 105.

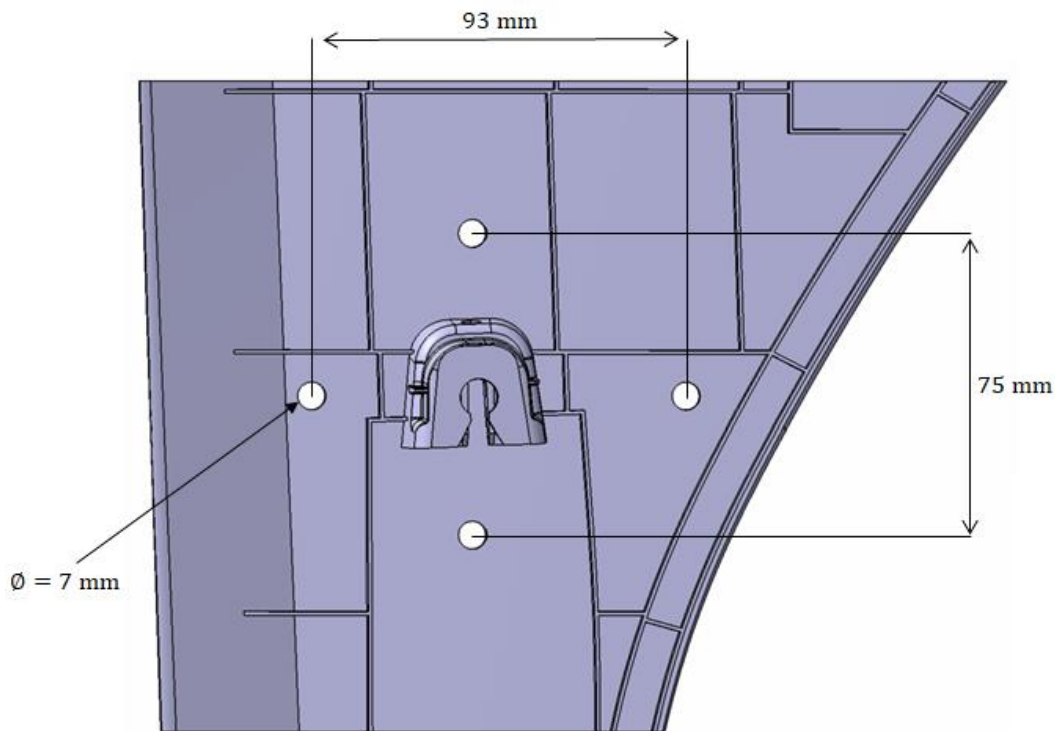


Figura 105 - Dimensões dos furos incorporados no modelo 3D da 1ª fixação para simulação numérica.

Após a incorporação dos furos, seguiram-se algumas simplificações geométricas no modelo, tais como a eliminação dos frisos de retenção do *clip*, assinalados na Figura 106 com círculos vermelhos.

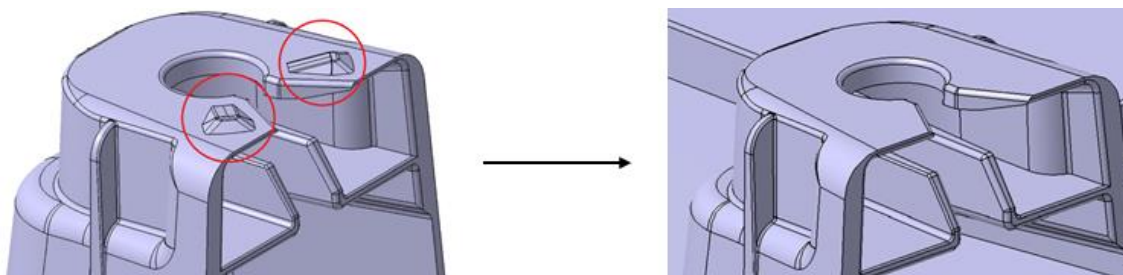


Figura 106 - Remoção dos frisões de retenção do porta agrafó.

De salientar que estas simplificações tiveram sempre em conta a não remoção de elementos como raios na zona do porta agrafó que pudessem influenciar a avaliação das zonas mais críticas.

Como referido na introdução do capítulo, esta fixação foi alvo de estudo com recurso a duas abordagens. Para a primeira abordagem utilizando superfícies foi necessário, primeiramente, converter o modelo sólido em superfícies através de planos médios (Figura 107).

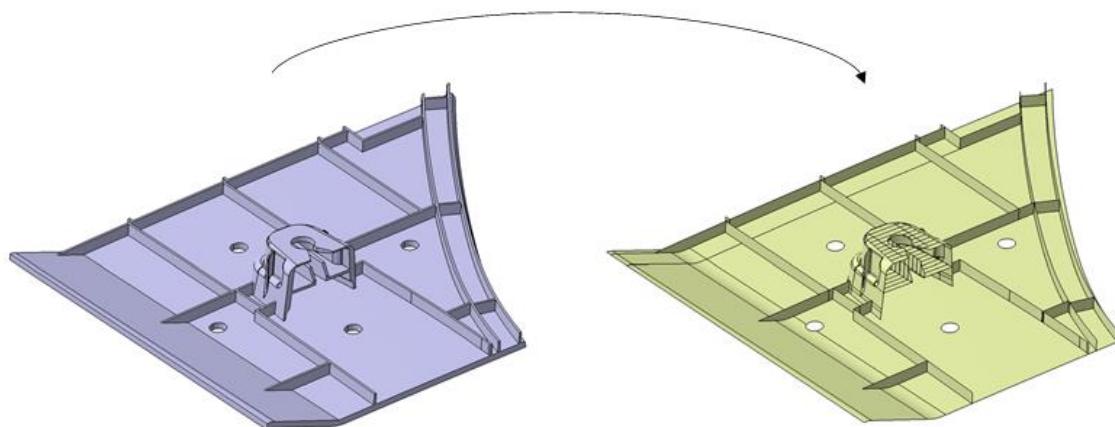


Figura 107 - Conversão do modelo sólido da 1ª fixação em superfícies.

Visto haver zonas no porta agrafó onde a espessura varia foi necessário realizar partições no modelo em superfícies, por meio do uso do comando “*Split*” do CATIA, com o intuito de não só aproximar estas zonas ao modelo real, mas também facilitar a geração de malha no pré-processamento. Na Figura 108 identificam-se, a diferentes cores, as zonas onde se efetuaram partições espaçadas de 2,5 mm, por forma a aproximar as variações de espessura.

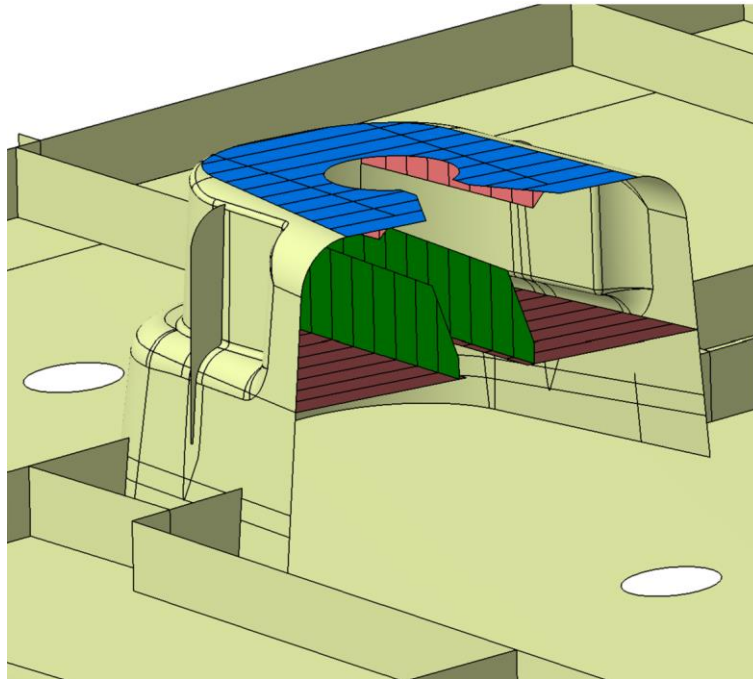


Figura 108 - Partições realizadas no porta agrafo da 1ª fixação, identificadas a diferentes cores, nas zonas onde existe variação de espessura.

Nesta fase procedeu-se à modelação da ferramenta que replica a geometria do *clip* da 1ª fixação e ao respetivo posicionamento desta no modelo em superfícies representado na Figura 107. Esta inserção da ferramenta no modelo irá permitir uma aproximação mais real do contacto existente entre o *clip* e o porta agrafo (Figura 109).

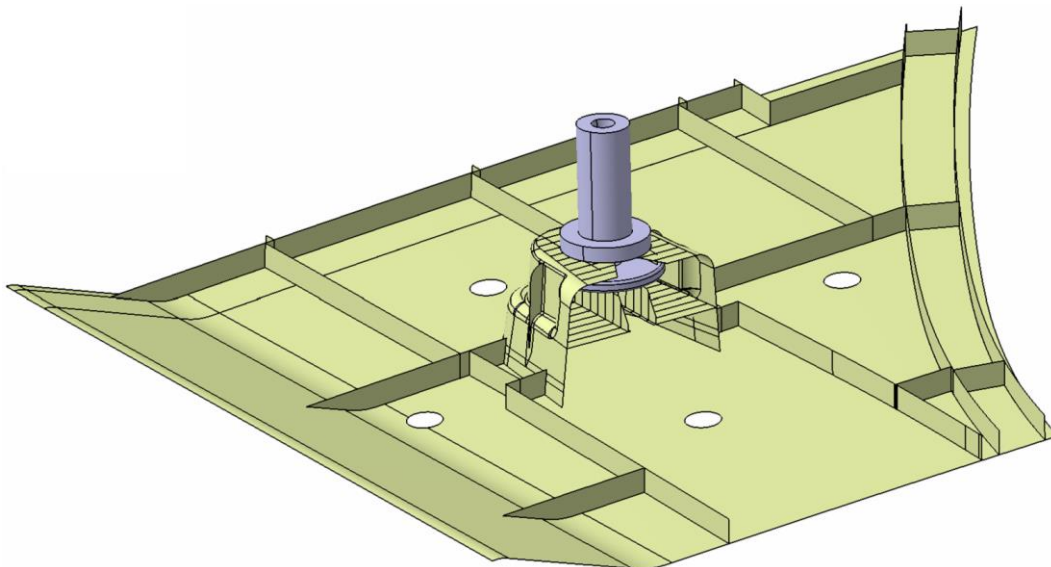


Figura 109 – Modelo em superfícies com a ferramenta posicionada.

Deu-se início ao pré-processamento com a importação do modelo da Figura 109 no ANSA, sem a ferramenta inserida (esta será posteriormente incorporada no Abaqus

como corpo rígido). Devido à importação do modelo CAD num *software* CAE (ANSA), acontece frequentemente as superfícies virem “descozidas” e com erros, o que dificulta a geração de malha. Assim, a primeira etapa, prendeu-se com a correção da geometria, através das ferramentas presentes no “TOPO” menu do ANSA. Uma vez realizadas as devidas correções geométricas, gerou-se a malha nas superfícies através da utilização predominante de elementos quadriláteros de segunda ordem com um tamanho de aresta suficientemente refinado de 1 mm, e inevitavelmente, de alguns elementos triangulares de segunda ordem, também de 1 mm de tamanho de aresta, devido à complexidade da geometria, totalizando 37866 quadriláteros e 419 triângulos gerados (Figura 110).

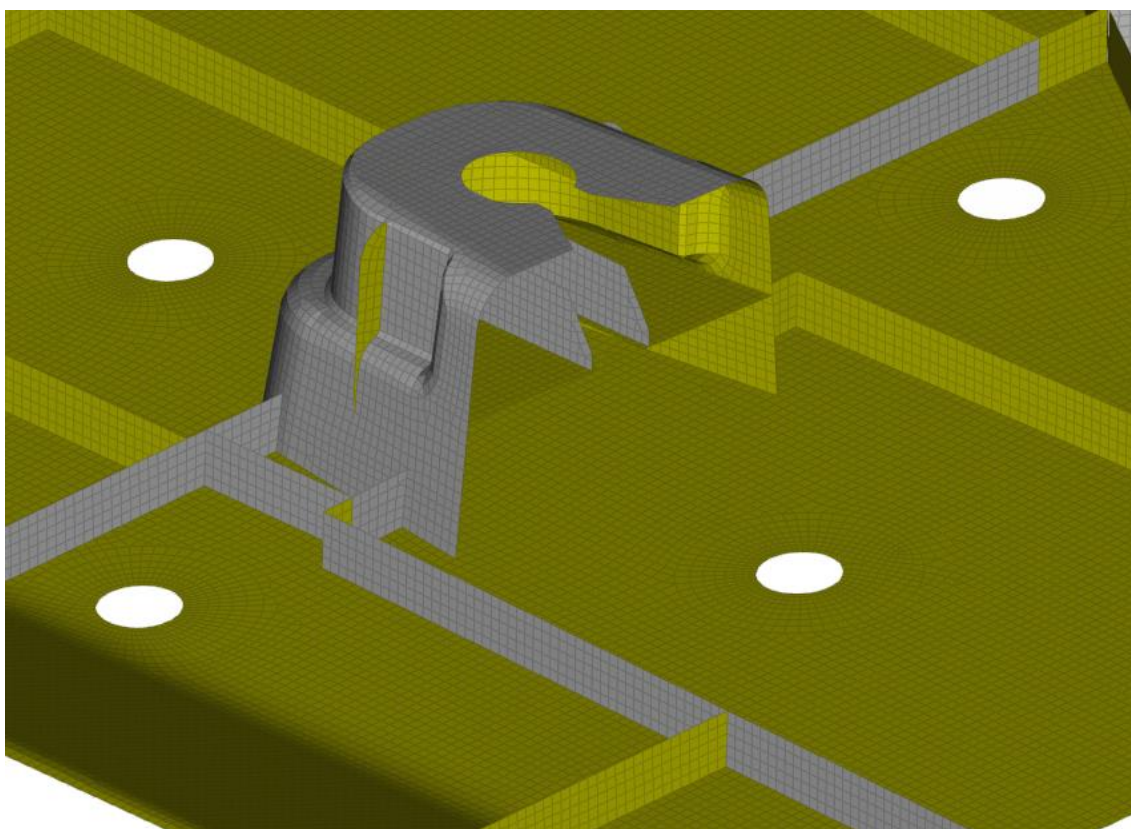


Figura 110 - Geração da malha de duas dimensões (2D) no modelo em superfícies da 1ª fixação no *software* ANSA.

A opção por elementos quadriláteros de 8 nós, neste caso em concreto, revelou ser a melhor opção pelo facto de estes oferecerem uma boa precisão na representação das deformações em comparação com os elementos quadriláteros de primeira ordem tradicionais (mais rígidos quando comparados com os de segunda ordem). Após a geração da malha, seguiu-se a atribuição das respetivas espessuras às superfícies (Figura 111).

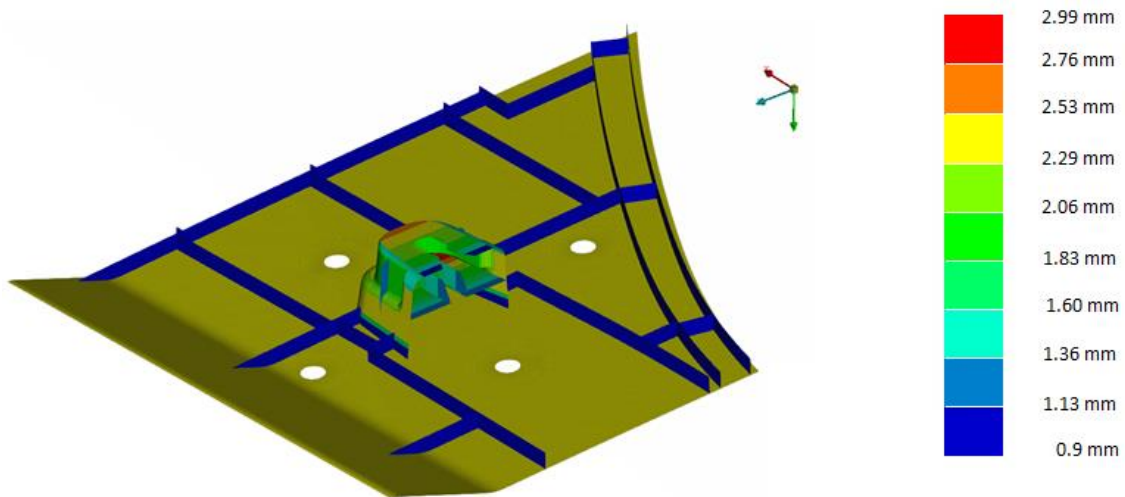


Figura 111 - Atribuição de espessuras às superfícies do modelo da 1ª fixação no *software* ANSA.

Através da visualização da Figura 111, é perceptível que a maior espessura registada no modelo é aproximadamente 3 mm, o que justifica a utilização de superfícies para realizar a aproximação da realidade. Devido a dificuldades na exportação das condições fronteira e dos contactos do ANSA para o Abaqus, houve a necessidade de completar o pré processamento no *software* Abaqus. Assim exportou-se, numa primeira fase, o modelo da Figura 111 para o Abaqus (Figura 112).

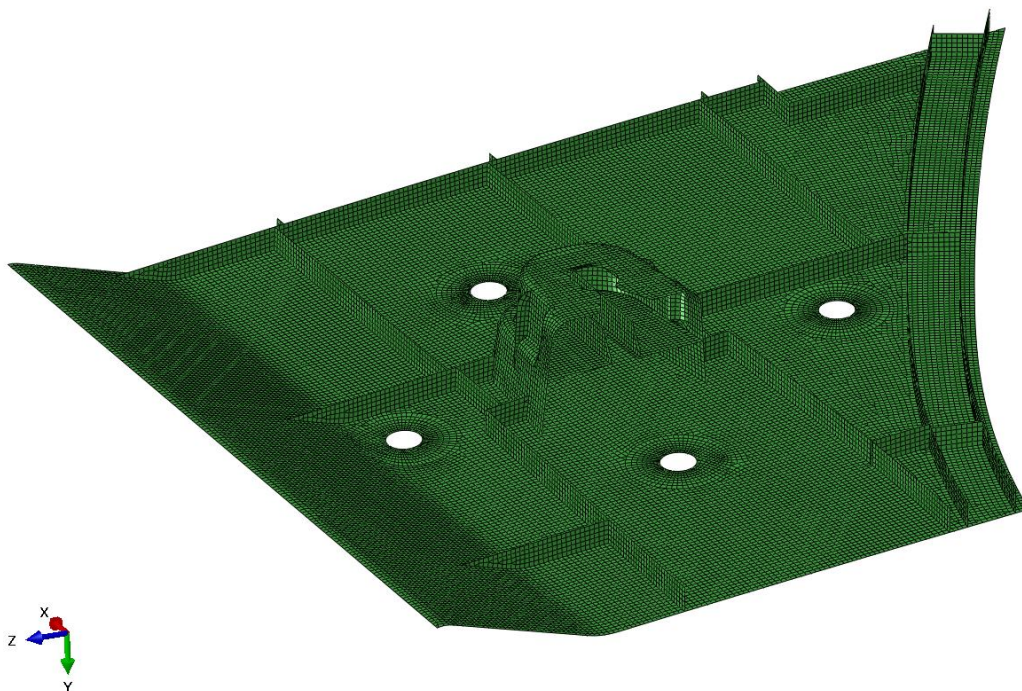


Figura 112 - Importação do modelo em superfícies da 1ª fixação no *software* Abaqus.

A malha, quando exportada de um *software* para outro, é exportada como órfã (*orphan mesh*), caracterizada pelo Abaqus pela cor verde (Figura 112), o que não

permite realizar modificações em termos de tamanho e tipo de elementos. A ferramenta foi importada, posteriormente, como corpo rígido, visto não se estar à espera que esta desenvolva tensões em comparação com o modelo de cariz termoplástico e por não ser o objeto de estudo principal (Figura 113).

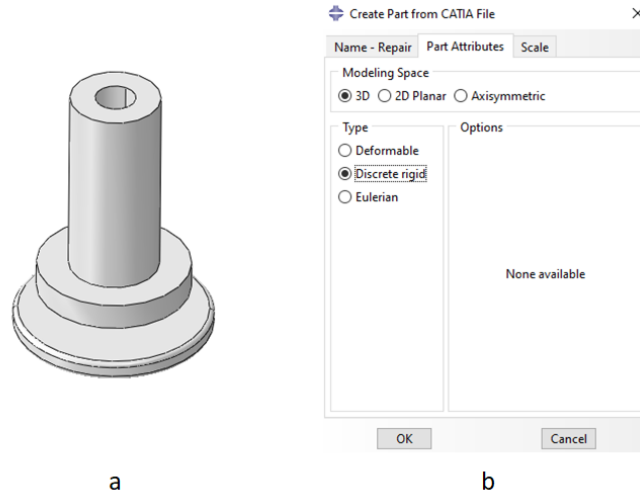


Figura 113 - Processo de importação da ferramenta no Abaqus: a) geometria da ferramenta sólida; b) parâmetros de importação.

Além da ferramenta foi necessário, de igual forma, desenvolver uma placa, também esta rígida, para juntar ao conjunto. Esta placa replica a mesa de ensaio da máquina de tração e a placa furada, onde os modelos são suportados, durante os ensaios de arrancamento e de corte, respetivamente. Na Figura 114, apresentam-se as dimensões da placa criada no módulo “Part” do Abaqus.

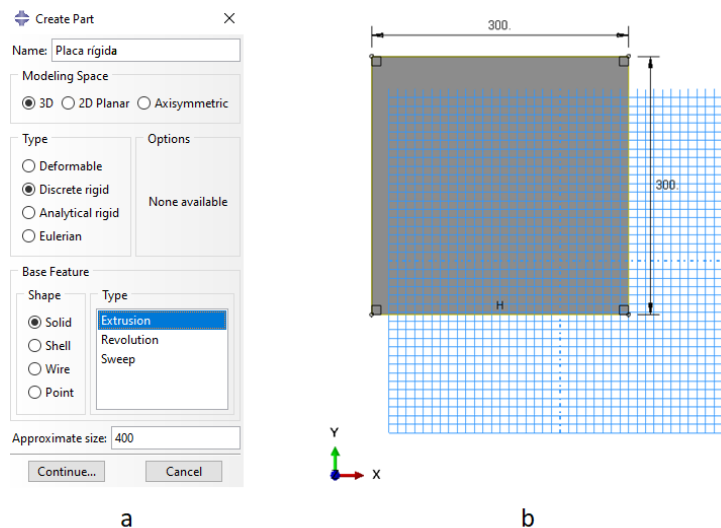


Figura 114 - Modelação da placa rígida da 1ª fixação no Abaqus: a) parâmetros de definição da parte; b) dimensões da placa rígida.

Uma vez importadas as partes constituintes do conjunto, seguiu-se a montagem de cada um dos elementos, por meio do modo “*Assembly*” do Abaqus (Figura 115).

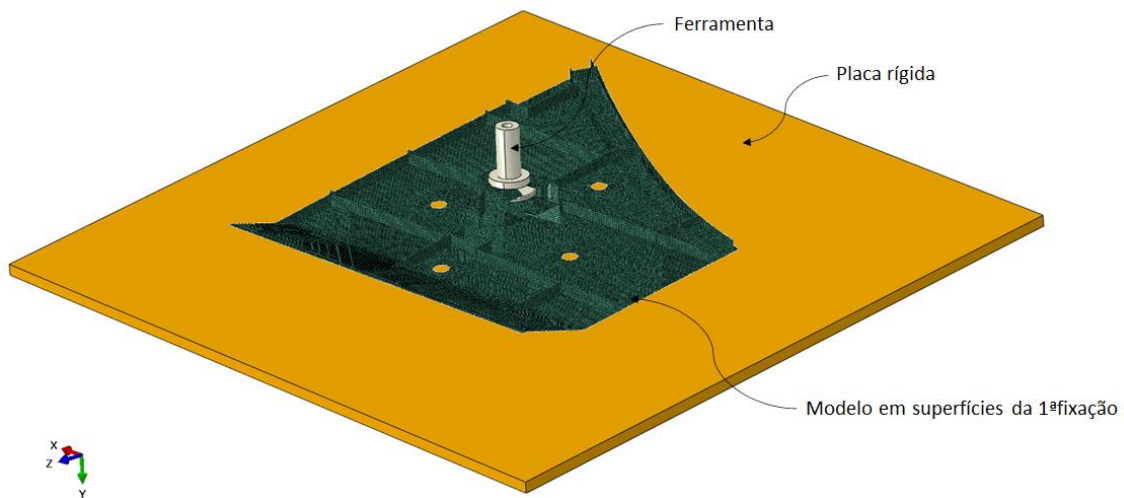


Figura 115 - Montagem do conjunto da 1ª fixação para simulação numérica pela primeira abordagem.

Com todos os elementos devidamente posicionados, seguiu-se a criação de um referencial local na ferramenta, assinalado na Figura 116 com um círculo preto, para garantir as direções de ensaio estipuladas.

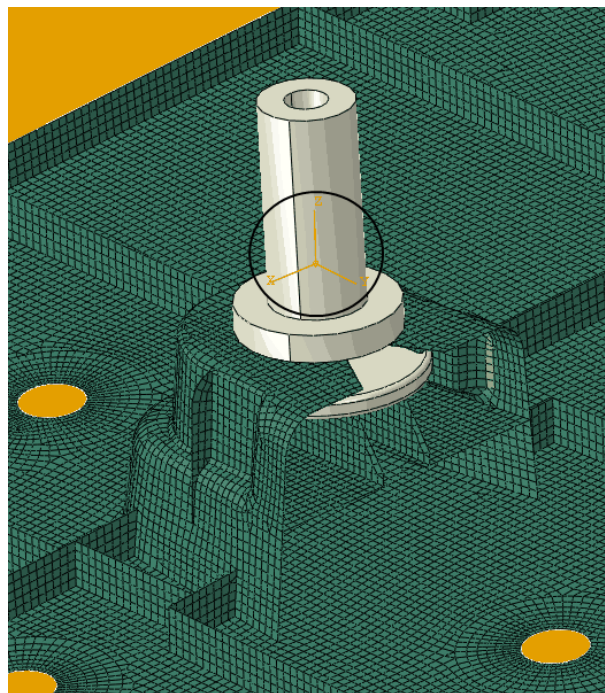


Figura 116 - Referencial local criado na ferramenta da 1ª fixação.

Numa fase subsequente, foi necessário indicar as interações entre os diversos elementos do conjunto. Dependendo da direção de ensaio, as interações divergem maioritariamente entre a ferramenta e o porta agrafos. Relativamente ao ensaio de arrancamento (direção A), foram indicadas apenas duas zonas de contato,

nomeadamente entre a superfície superior do anel da ferramenta e os dois frisos superiores do porta agrafo, uma vez que estas constituem a primeira zona de contato entre os dois corpos (Figura 117).

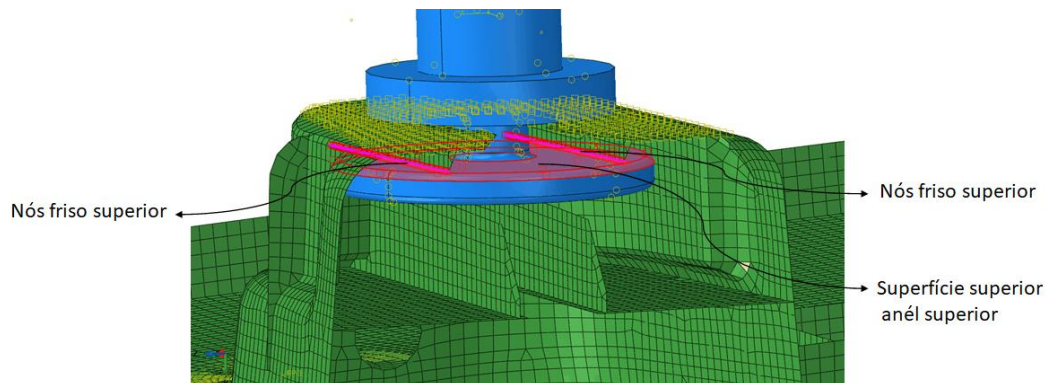


Figura 117 - Interação fornecida entre a ferramenta e os frisos de cima do porta agrafo da 1ª fixação.

O tipo de contato utilizado nesta interação foi “*Surface to surface*” e o método de discretização “*Node to surface*”, adequado quando a área de contato é reduzida (Figura 118).

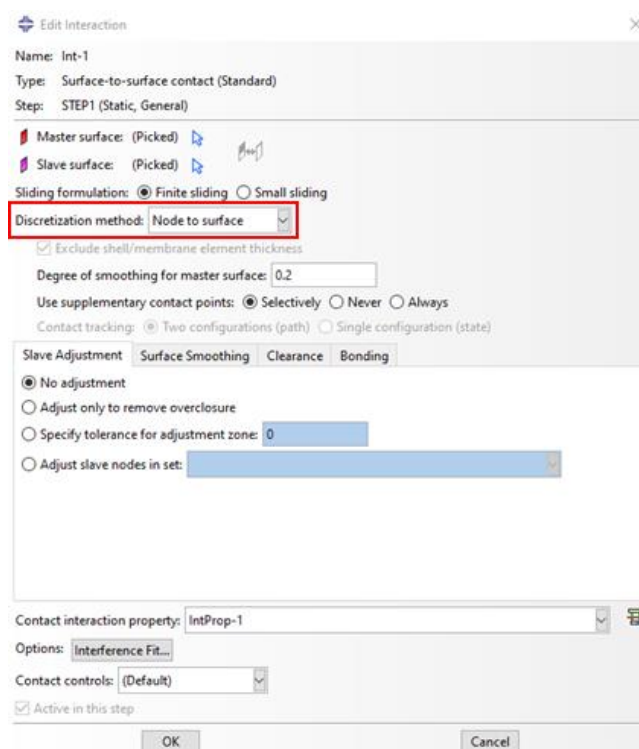


Figura 118 - Parâmetros utilizados no contato entre a ferramenta e os frisos de cima do porta agrafo para o ensaio de arrancamento.

Apesar de não fornecer resultados tão precisos, comparado com o método de discretização “*Surface to surface*”, este método evita penetrações entre a ferramenta e o porta agrafo, o que evita problemas de convergência na solução final. A “*Master*

surface” definida neste contato foi a superfície superior do anel da ferramenta (Figura 117), visto fazer parte de um corpo rígido. Os nós dos frisos superiores (Figura 117) foram definidos como a *“Slave surface”*. As propriedades definidas neste contato podem ser consultadas na Figura 100 na introdução do presente capítulo.

No que concerne às simulações numéricas nas direções ao corte, destacam-se três interações. A primeira, do tipo *“surface to surface”*, com opção de suavização das superfícies ativada entre as faces exteriores do anel inferior da ferramenta e as faces interiores do porta agrafos (Figura 119). A suavização das superfícies é um método que aumenta a precisão das tensões registadas em zonas de contato e que reduz o ruído proveniente de superfícies curvas em contato.

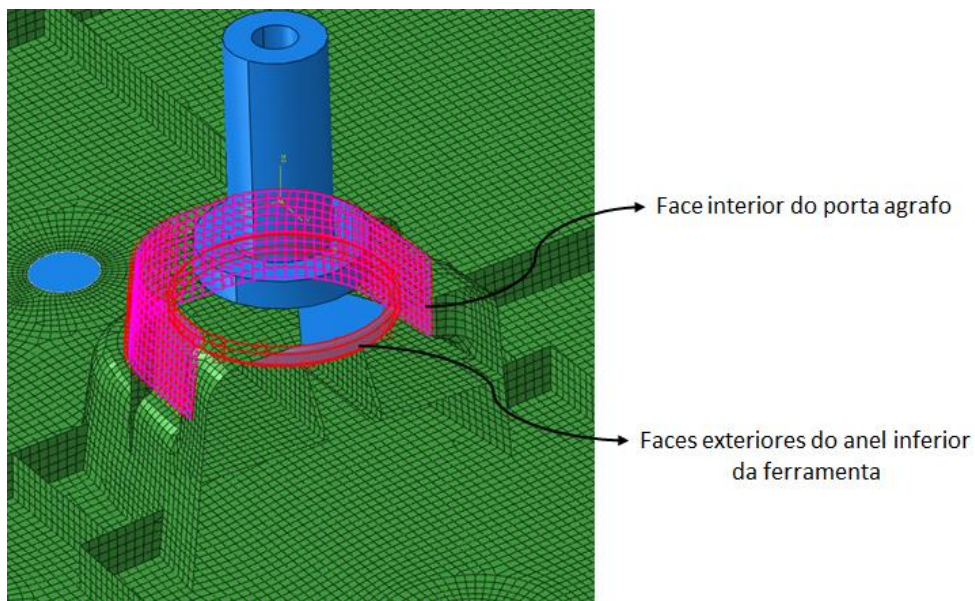


Figura 119 - 1ª interação entre a ferramenta e o porta agrafos nos ensaios ao corte em ambas as direções (direções B e C).

A segunda interação previu o contato que poderá ocorrer entre a face inferior do anel superior da ferramenta com a face superior do porta agrafos (Figura 120).

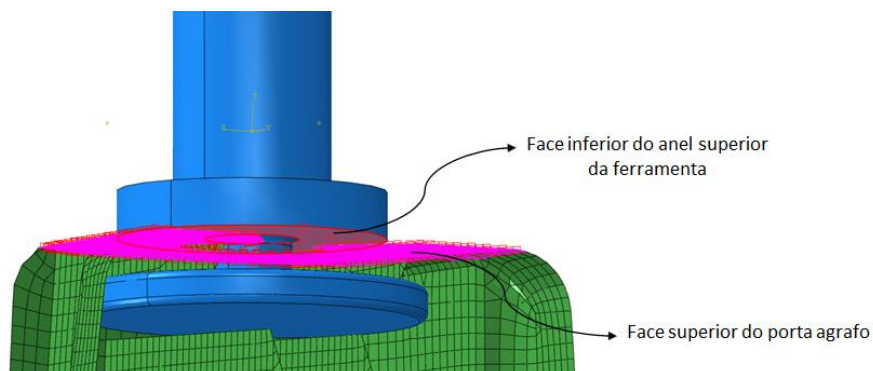


Figura 120 - 2ª interação entre a ferramenta e o porta agrafos nos ensaios ao corte em ambas as direções (direções B e C).

A terceira interação, ainda nas direções ao corte, incidiu no contato que poderá existir entre a ferramenta com os frisos inferiores do porta agrafo. Na Figura 121 demonstram-se as possíveis zonas de contato devidamente identificadas. O método de discretização utilizado no contato foi do tipo “*Node to surface*”.

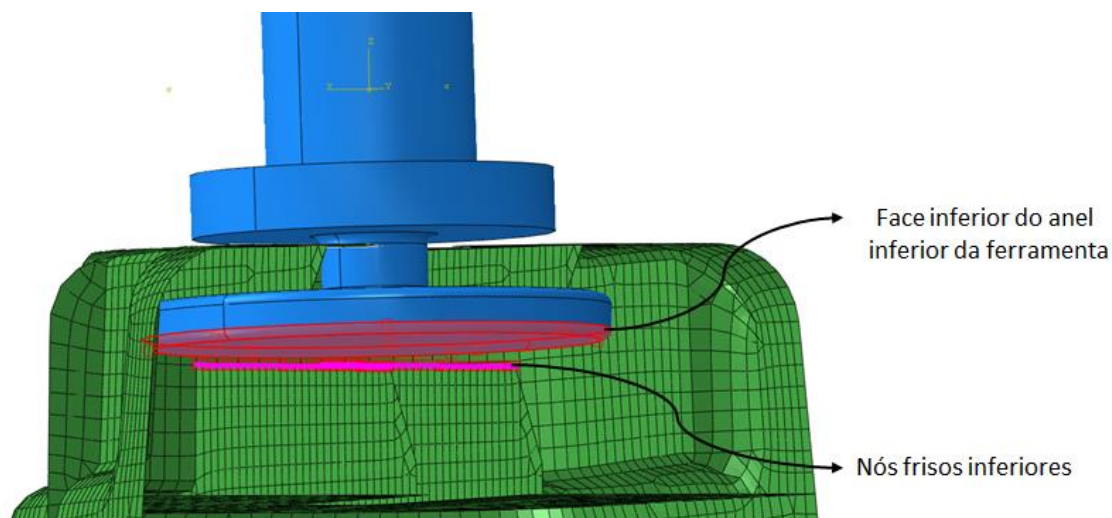


Figura 121 - 3ª interação entre a ferramenta e o porta agrafo nos ensaios ao corte em ambas as direções (direções B e C).

Por fim, fica a faltar a interação entre a placa rígida e o modelo em superfícies da 1ª fixação, mais influenciadora nos resultados provenientes dos ensaios de corte do que nos de arrancamento. As propriedades definidas neste contato podem ser consultadas na Figura 100 na introdução do presente capítulo.

Após fornecidas as interações, e antevendo a aplicação das condições fronteira, decidiu-se restringir algumas zonas do modelo (Figura 122). À semelhança das interações, dependendo da direção de ensaio, as restrições também sofrerão alterações. Para o ensaio de arrancamento, foram aplicados quatro constrangimentos do tipo “*Coupling*” nos nós abrangidos pelo diâmetro das anilhas em quatro ponto de referência (*Reference points*). Este tipo de abordagem restringe o movimento de um conjunto de nós de uma superfície ao movimento num único nó e é considerada uma boa prática na aplicação das condições fronteira [113].

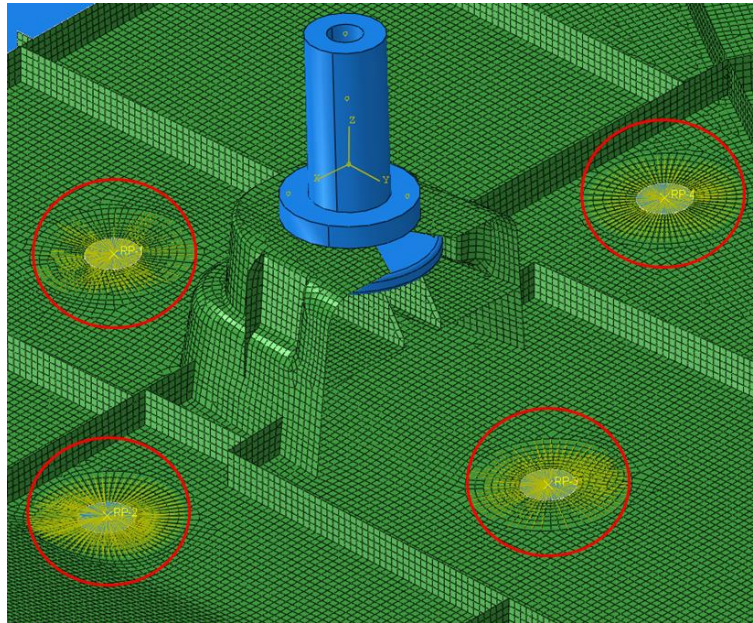


Figura 122 - Restrição do tipo “Coupling” nos nós abrangidos pelo diâmetro das quatro anilhas para a simulação na direção ao arrancamento.

Nas simulações na direção do corte, ao invés de quatro restrições, apenas foram consideradas duas restrições (Figura 123).

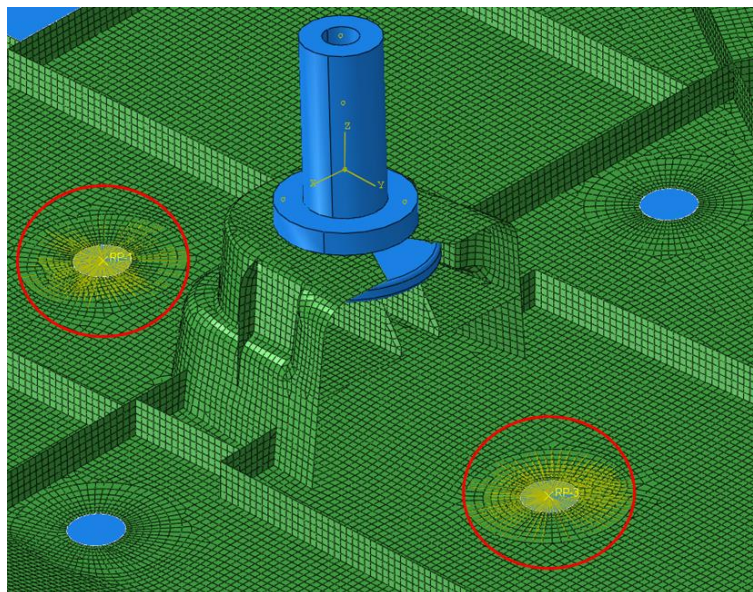


Figura 123 – Zonas restringidas nas direções de ensaio ao corte (direções B e C).

Tanto para a ferramenta como para a placa, ambos corpos rígidos, foram aplicadas duas restrições denominadas pelo Abaqus de “Rigid body”. O movimento da ferramenta foi restringido num único ponto, visível na Figura 124 a) como “RP5”, com a opção de ajustar esse ponto ao centro de massa da ferramenta no início da análise (Figura 124 b).

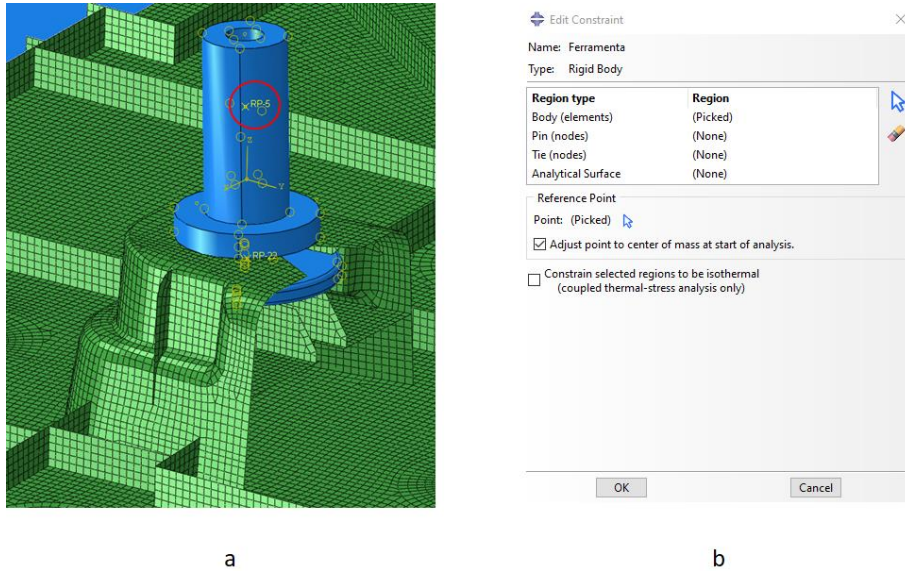


Figura 124 - Constrangimento do tipo “Rigid body”: a) aplicado na ferramenta do modelo em superfícies da 1ª fixação; b) parâmetros definidos.

Seguiu-se a aplicação das condições fronteira nos pontos de referência anteriormente restringidos. Este tipo de procedimento evita a aplicação direta das condições fronteira nas faces da geometria. A nível de arrancamento, para replicar a fixação do modelo à base da máquina de tração, aplicaram-se quatro condições fronteira que consistiram na anulação dos deslocamentos e rotações dos 6 graus de liberdade nos quatro pontos de referência anteriormente referidos (Figura 125).

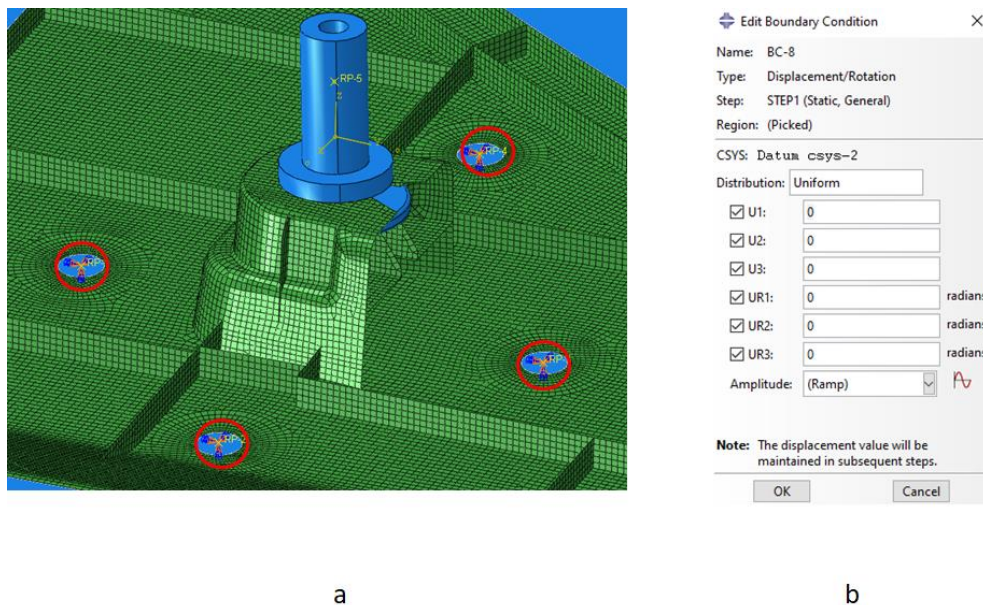


Figura 125 – Condições fronteira aplicadas no ensaio de arrancamento no modelo em superfícies da 1ª fixação: a) nos quatro pontos de referência criados; b) parâmetros definidos.

Importa frisar que tanto os “Couplings” como as condições fronteira devem ser aplicadas segundo o mesmo referencial local criado, para evitar que os resultados obtidos sejam posteriormente mal interpretados. A ação da carga para a simulação ao arrancamento foi aplicada por meio de um deslocamento no ponto de referência da ferramenta (RP5), segundo o eixo local z, e de valor igual a 6 mm. Este valor teve em conta o deslocamento máximo suportado pela fixação da posição 1 no ensaio físico na direção do arrancamento (consultar Figura 77 no capítulo 3.6.3.1) após aplicado um fator de folga de 0,5 para colmatar eventuais folgas por parte da máquina de tração (Figura 126).

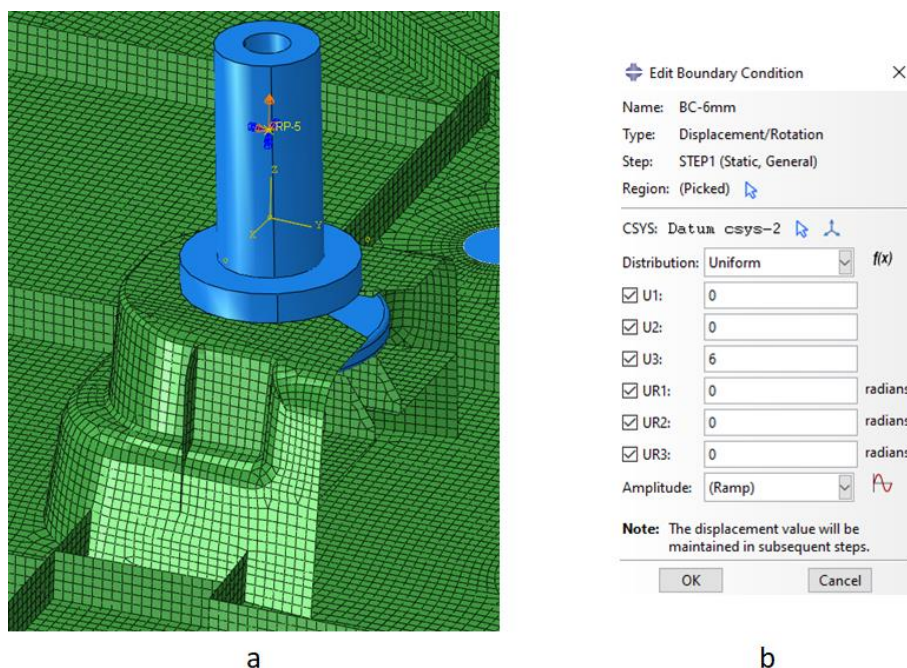


Figura 126 – Condição fronteira aplicada segundo o eixo local z: a) aplicação da condição fronteira no ponto de referência; b) parâmetros da aplicação da condição fronteira.

No que diz respeito à simulação ao corte na direção B, foi aplicado um deslocamento de 6 mm segundo o sentido positivo do eixo x no ponto de referência da ferramenta (RP5). Este valor mais uma vez teve em conta o deslocamento máximo suportado pela fixação da posição 1 nessa direção em específico (consultar Figura 78 no capítulo 3.6.3), integrado o fator de folga de 0,5. Da mesma maneira, restringiu-se o movimento segundo as restantes direções para garantir que a direção do movimento seja paralela ao plano de chapa (Figura 127).

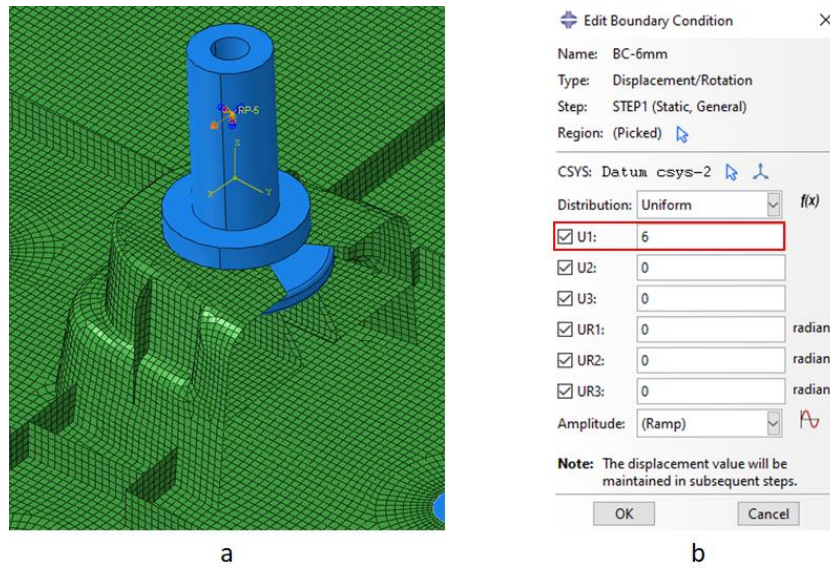


Figura 127 - Condição fronteira aplicada segundo o eixo local x: a) aplicação da condição fronteira no ponto de referência; b) parâmetros da aplicação da condição fronteira.

Relativamente à outra direção de ensaio ao corte, a direção C, seguiu-se o mesmo procedimento e parâmetros, mas em sentido contrário à direção B.

Em todas as direções de ensaio, a placa rígida foi impedida de se mover através da restrição dos 6 graus de liberdade no ponto de referência que lhe foi associado após a aplicação da restrição do tipo “Coupling”. Numa fase final do pré-processamento, gerou-se a malha na ferramenta de tamanho de aresta igual a 1 mm (totalizando 6664 elementos gerados), igual ao tamanho gerado para o modelo, isto porque deste modo evita-se a ocorrência de problemas de convergência devido a diferentes tamanhos de aresta. A malha gerada para a placa rígida foi mais grosseira e de tamanho de aresta igual a 15 mm (totalizando 880 elementos gerados) (Figura 128).

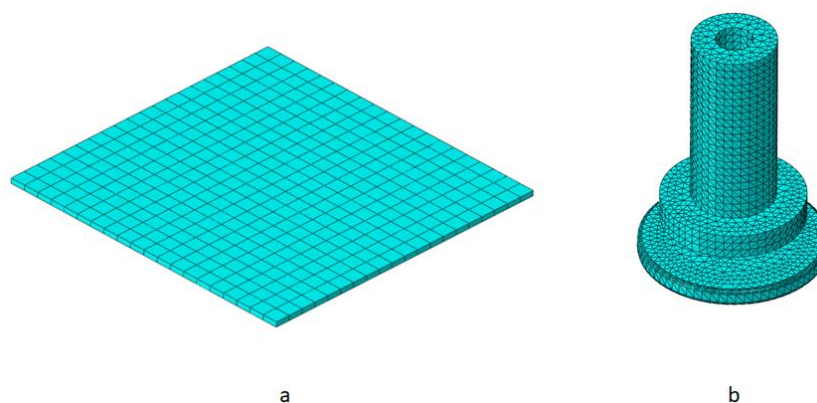


Figura 128 – Malhas geradas nos corpos rígidos do conjunto da 1ª fixação: a) placa; b) ferramenta.

Os parâmetros da malha relativos às partes rígidas podem ser consultados na introdução do capítulo, mais concretamente na Figura 96. Na Figura 129 apresenta-se

a designação e os parâmetros introduzidos no Abaqus para a malha gerada no modelo proveniente do *software* ANSA.

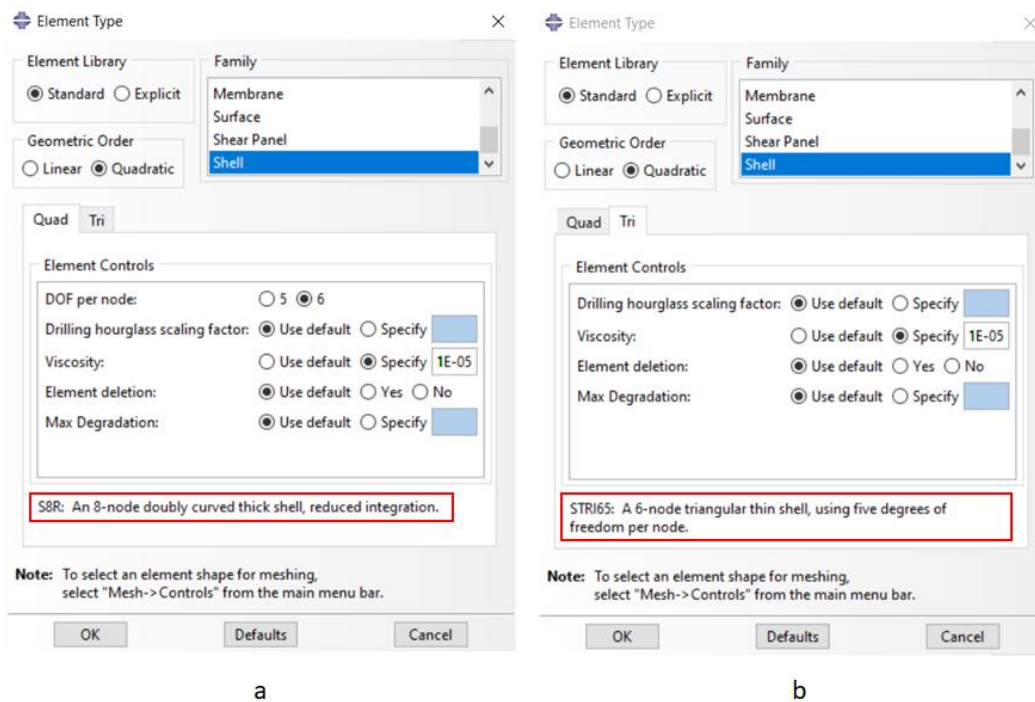


Figura 129 – Malha gerada no modelo da 1ª fixação em superfícies: a) parâmetros dos elementos “S8R”; b) parâmetros dos elementos “STRI65”.

A aquisição de dados, explicada na introdução do capítulo, adequa-se a esta abordagem e os parâmetros utilizados podem ser consultados na Figura 102 e Figura 103.

3.7.1.1.2 Modelo sólido

O processo de preparação do modelo sólido pela segunda abordagem seguiu praticamente a mesma metodologia apresentada para o modelo em superfícies já que, numa primeira fase, importou-se o modelo sólido apresentado na Figura 104 no Abaqus já com os furos e as simplificações geométricas incorporadas (Figura 130).

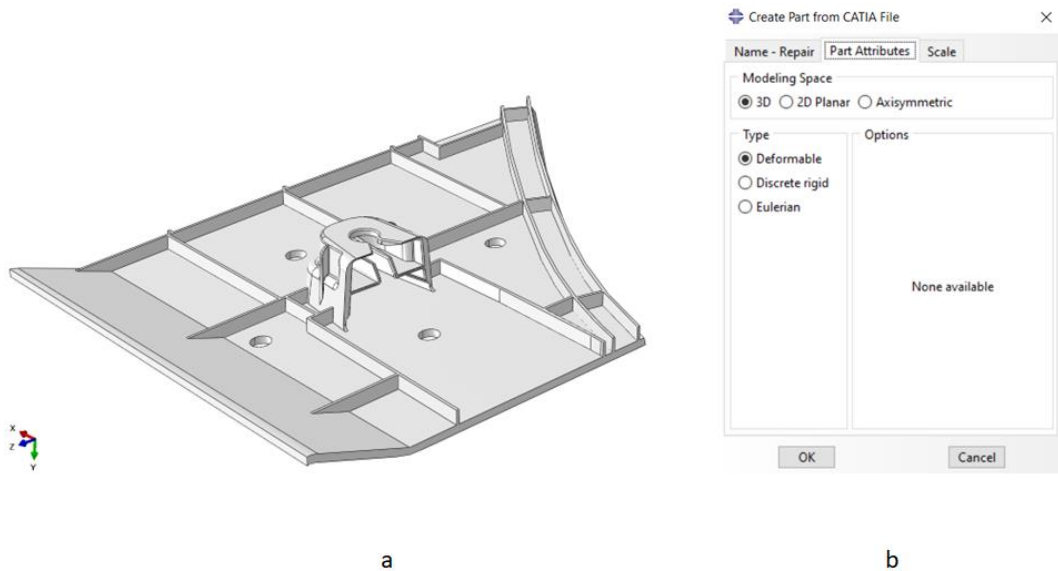


Figura 130 – Processo de importação no Abaqus a) modelo sólido da 1ª fixação; b) parâmetros de importação.

Prosseguiu-se com a importação da ferramenta e a criação da placa rígida à semelhança do que foi explicado para a primeira abordagem (consultar Figura 113 e Figura 114, respetivamente). Após importação e criação dos elementos do conjunto, desta vez as partições que simulam a área abrangida pelas anilhas foram desenvolvidas no Abaqus. De seguida foram criadas oito partições no modelo sólido, contrariamente às quatro apresentadas no modelo em superfícies (Figura 131).

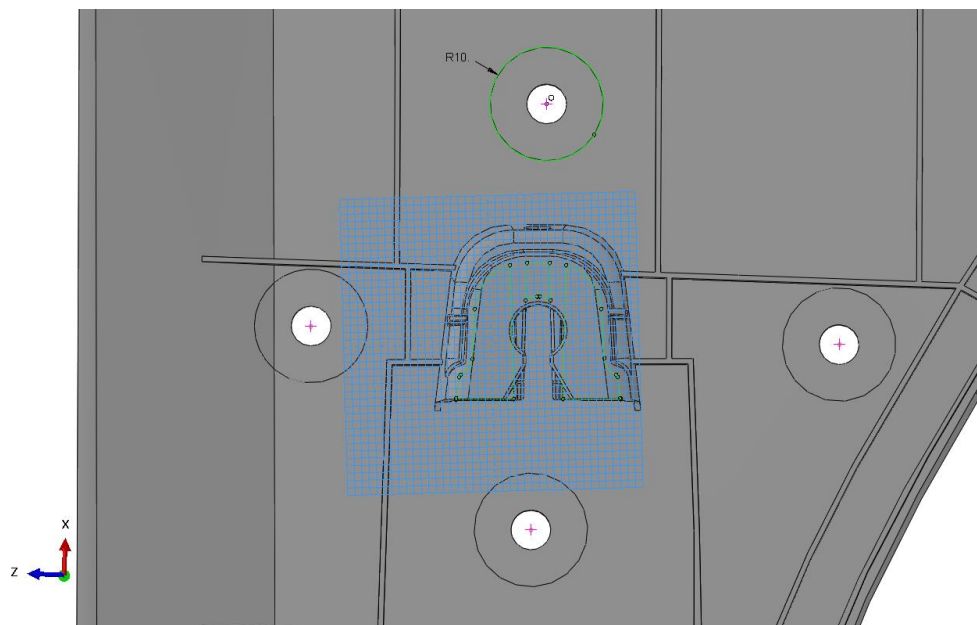


Figura 131 – Partições no modelo sólido da 1ª fixação referentes à área abrangida pelas anilhas.

A montagem do conjunto foi a etapa seguinte (Figura 132).

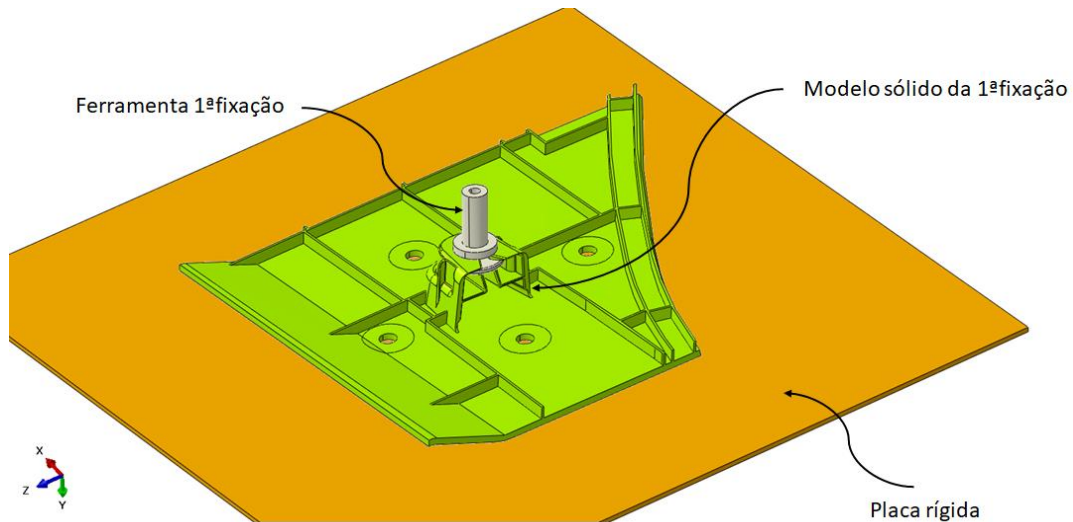


Figura 132 - Montagem do conjunto da 1ª fixação para simulação numérica pela segunda abordagem.

O tamanho de malha atribuído ao modelo foi definido com base num estudo de convergência de malha que será abordado num capítulo posterior, mais concretamente no capítulo 3.7.3. No que toca ao tipo de malha gerado no modelo sólido, foi explicada a opção de elementos tetraédricos de segunda ordem na introdução do capítulo e os respetivos parâmetros podem ser consultados na Figura 95. Na Figura 133 apresenta-se parte do modelo sólido após a geração da malha, contabilizando 692392 elementos tetraédricos gerados.

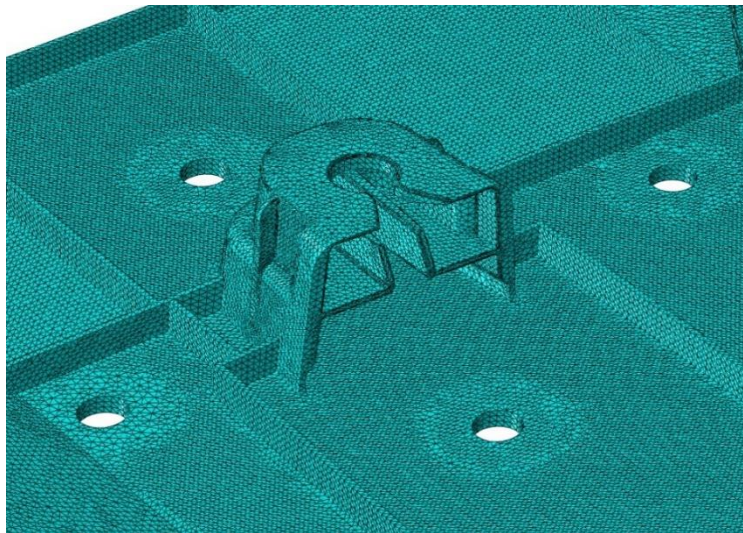


Figura 133 – Malha gerada no modelo sólido da 1ª fixação.

O tamanho de malha gerado para a ferramenta foi atribuído em conformidade com o tamanho de malha (aresta) gerado no modelo e de valor igual a 1 mm. No que diz respeito à placa rígida, o tamanho de aresta gerado foi de 15 mm. As imagens referentes à atribuição da malha nas partes rígidas já foram apresentadas e podem ser consultadas na Figura 128.

A partir desta altura, e mais uma vez para garantir as direções dos movimentos estipuladas por parte dos clientes, criou-se um referencial local na ferramenta (Figura 134).

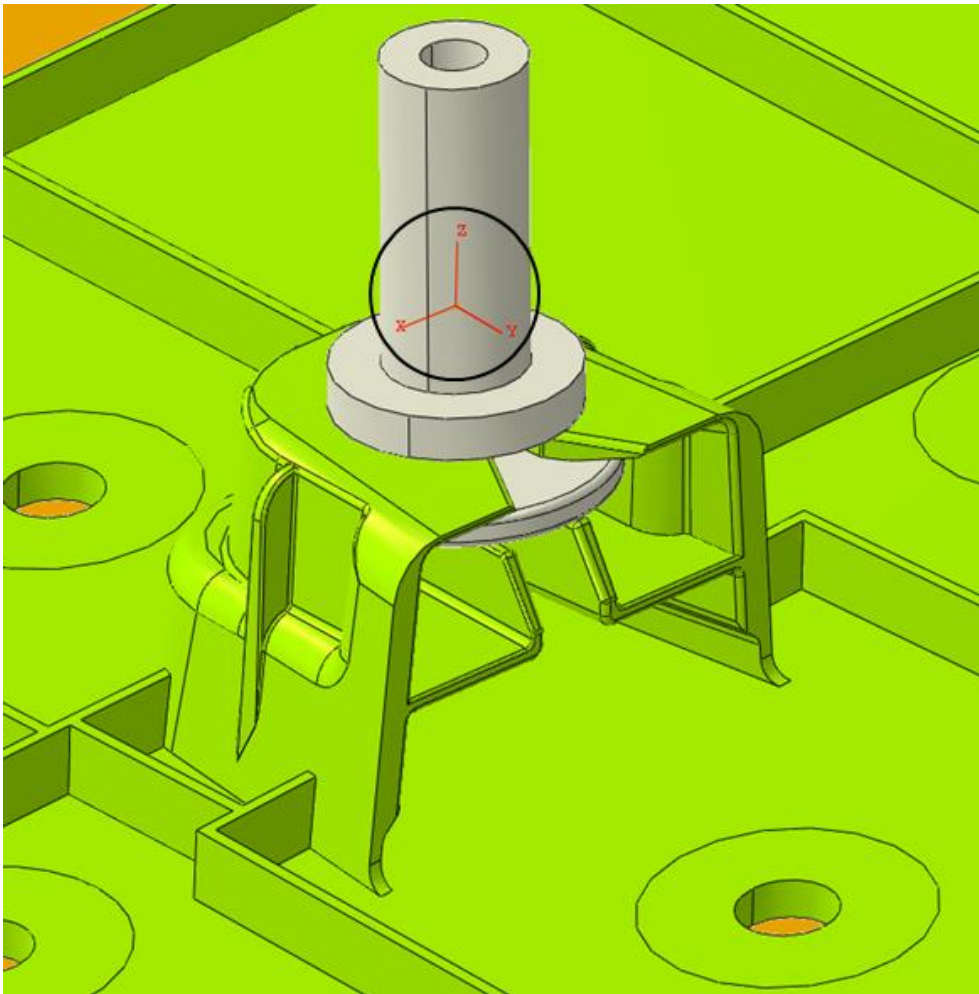


Figura 134 – Criação de um referencial local na ferramenta da 1ª fixação.

A grande diferença relativamente ao explicado para o modelo em superfícies prende-se no tipo de interação entre os elementos do conjunto introduzida no Abaqus. Tanto para a simulação na direção ao arrancamento como para as simulações nas direções ao corte utilizaram-se contatos gerais. Os parâmetros e propriedades utilizados neste tipo de interação podem ser consultados na introdução do capítulo na Figura 97 e Figura 100.

Foram criados oito pontos de referência, contrariamente aos quatro criados no modelo em superfícies, centrados com a área circunferencial das anilhas, não só para restringir a área circunferencial abrangida pelas anilhas na parte superior do modelo, mas também na parte inferior (Figura 135).

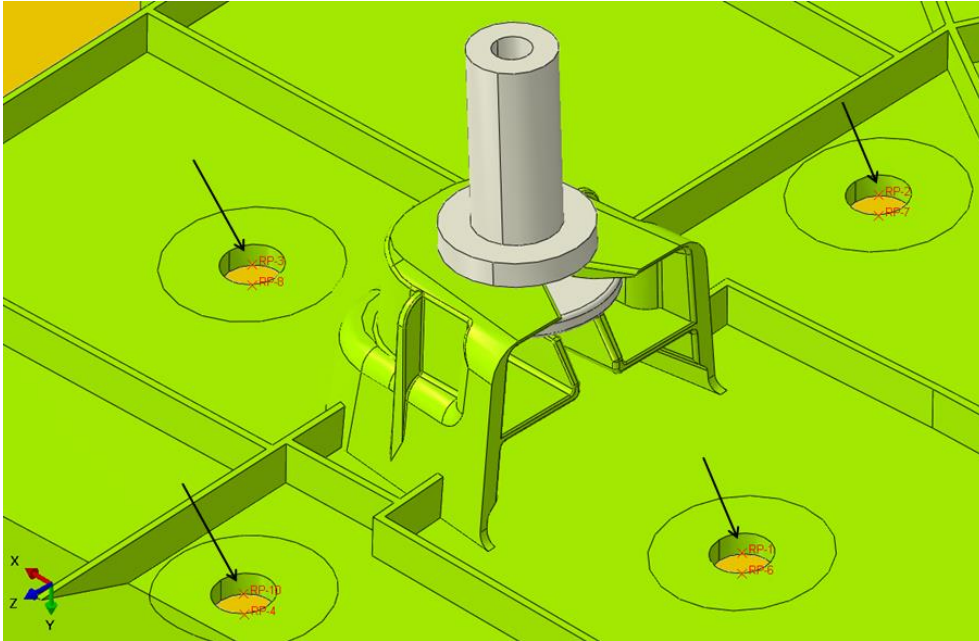


Figura 135 - Pontos de referência criados no modelo sólido.

Mais dois pontos de referência foram criados nos corpos rígidos. Na Figura 136 visualiza-se o ponto de referência criado na ferramenta.

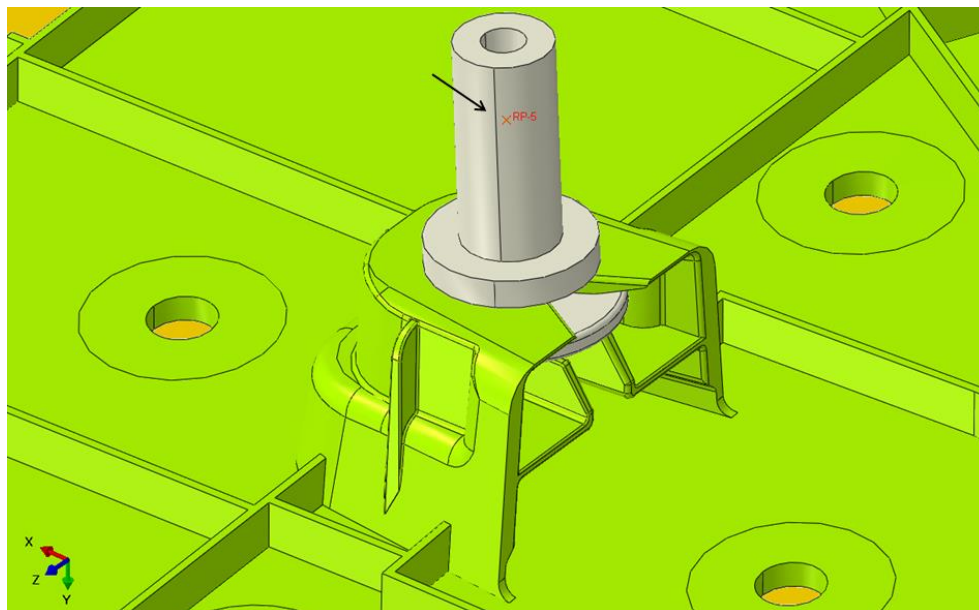


Figura 136 - Ponto de referência criado na ferramenta.

Os movimentos das áreas abrangidas pelas anilhas foram restringidos nos oito pontos de referência criados, no que diz respeito à simulação na direção ao arrancamento (Figura 137). Para as simulações numéricas ao corte, apenas se restringiu o movimento da área abrangida por cada anilha em dois pontos (um em cada face do modelo), à semelhança do que se explicou para o modelo em superfícies.

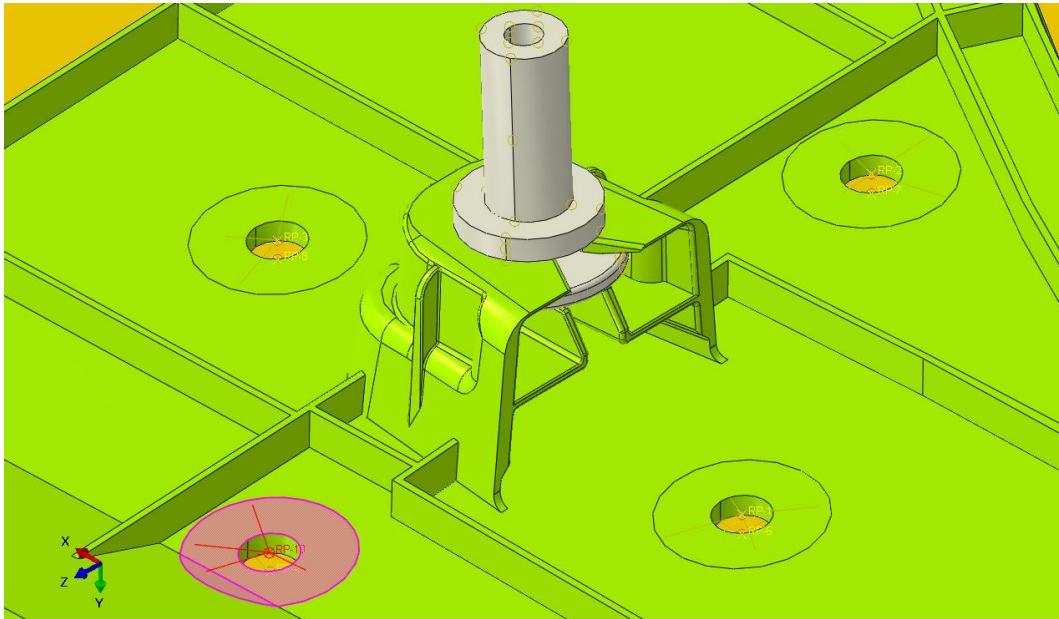
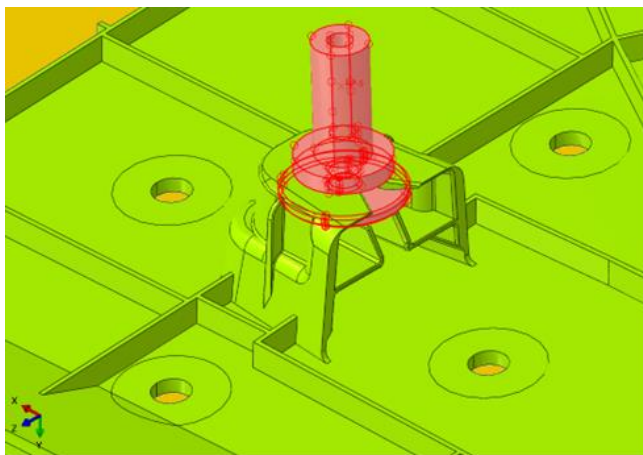
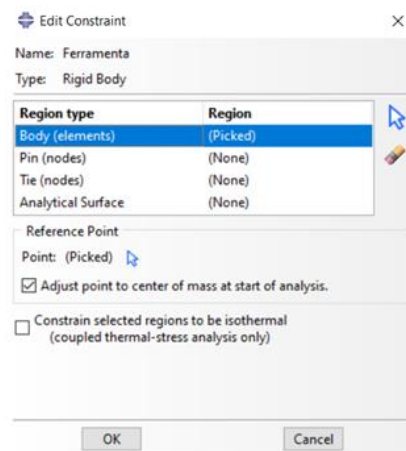


Figura 137 - Restrições de todas as áreas particionadas pela área circunferencial das anilhas.

Os movimentos dos corpos rígidos foram restringidos a um único ponto de referência. Na Figura 138 apresenta-se a restrição aplicada à ferramenta e os respectivos parâmetros utilizados que servem igualmente para a restrição aplicada à placa rígida.



a



b

Figura 138 – Constrangimento do tipo “Rigid body”: a) aplicado na ferramenta do modelo sólido da 1ª fixação; b) parâmetros definidos.

Nesta fase do documento tudo o que foi explicado para o modelo em superfícies em relação às condições fronteira e aquisição de dados aplica-se ao modelo sólido e pode ser revisto no capítulo 3.7.1.1.1.

3.7.1.2 2ª fixação

Para a 2ª fixação serão apresentadas as condições da análise numérica apenas para o modelo sólido tendo em conta as conclusões exibidas no capítulo 3.7.4.1. Iniciou-se o processo pela seleção e preparação do modelo 3D da fixação da posição 1 da soleira, conforme as dimensões do modelo real (Figura 139).

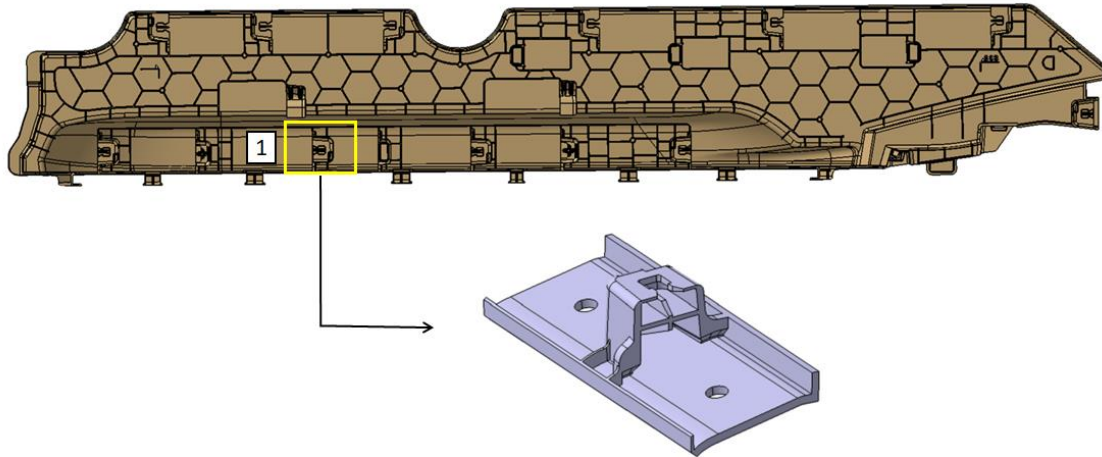


Figura 139 – Preparação do modelo 3D referente à posição 1 da 2ª fixação.

Os dois furos, visualizados na Figura 139 para passagem dos parafusos responsáveis pela fixação do modelo à mesa da máquina, apresentam o diâmetro e distância relativa da Figura 140.

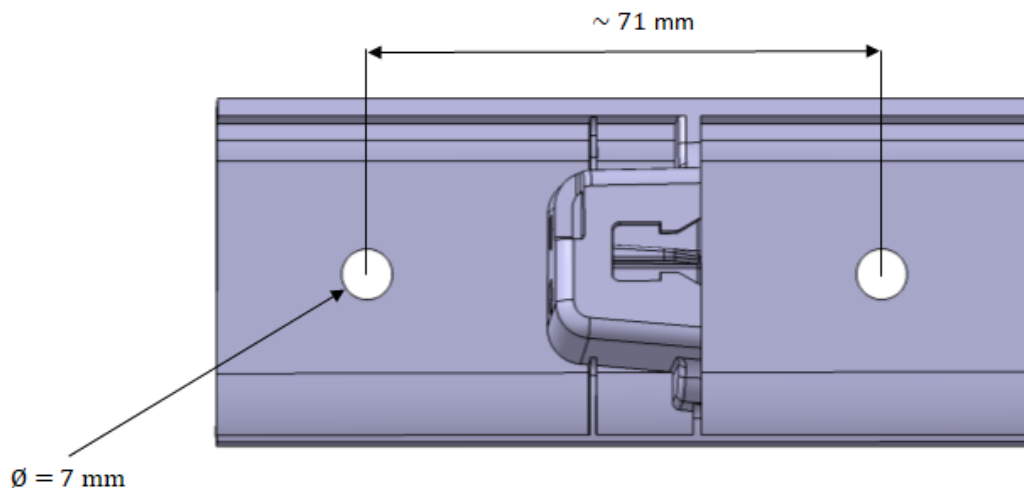


Figura 140 – Dimensionamento dos furos responsáveis pela fixação do modelo da 2ª fixação à mesa da máquina de tração.

O modelo da Figura 140 foi de seguida importado no Abaqus para início do pré processamento (Figura 141).

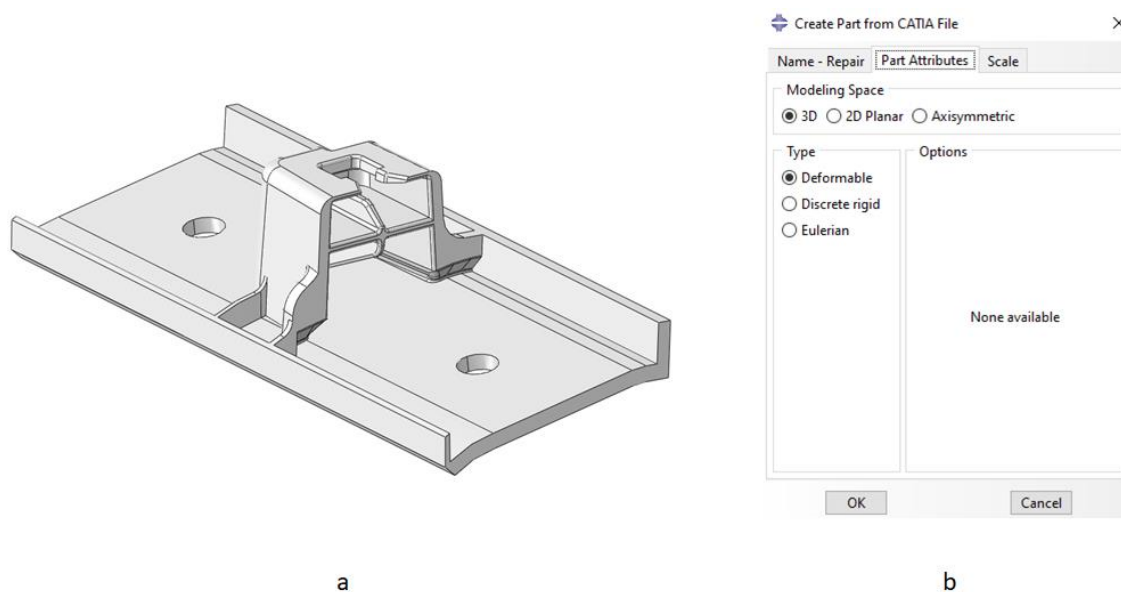


Figura 141 – Processo de importação no Abaqus a) modelo da 2ª fixação; b) parâmetros de importação.

Sucedeu-se a importação da ferramenta no Abaqus (Figura 142).

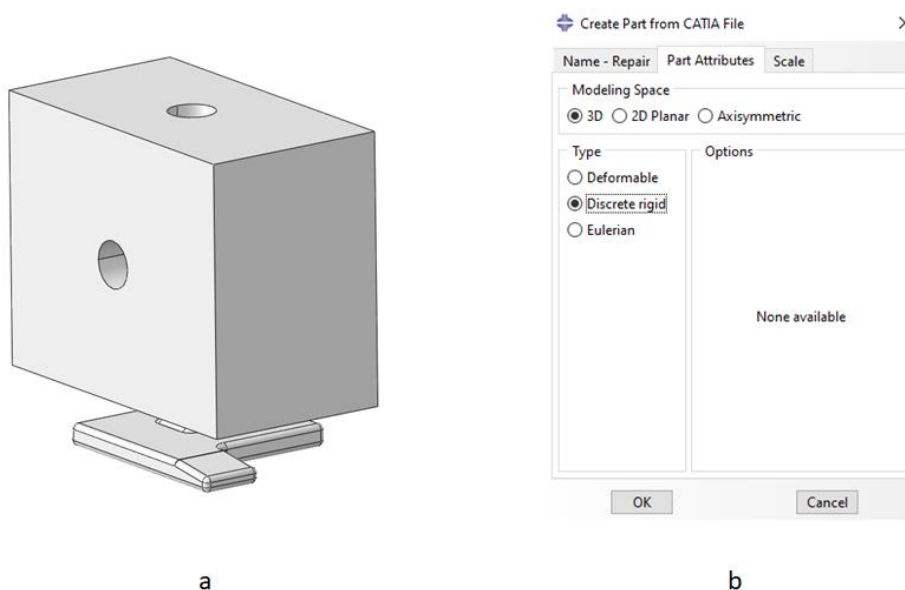


Figura 142 - Importação da ferramenta no Abaqus: a) geometria da ferramenta da 2ª fixação; b) parâmetros de importação.

Em conformidade com o que se realizou para a 1ª fixação, criou-se uma placa rígida no módulo “Part” do Abaqus para representação da mesa da máquina de tração (Figura 143).

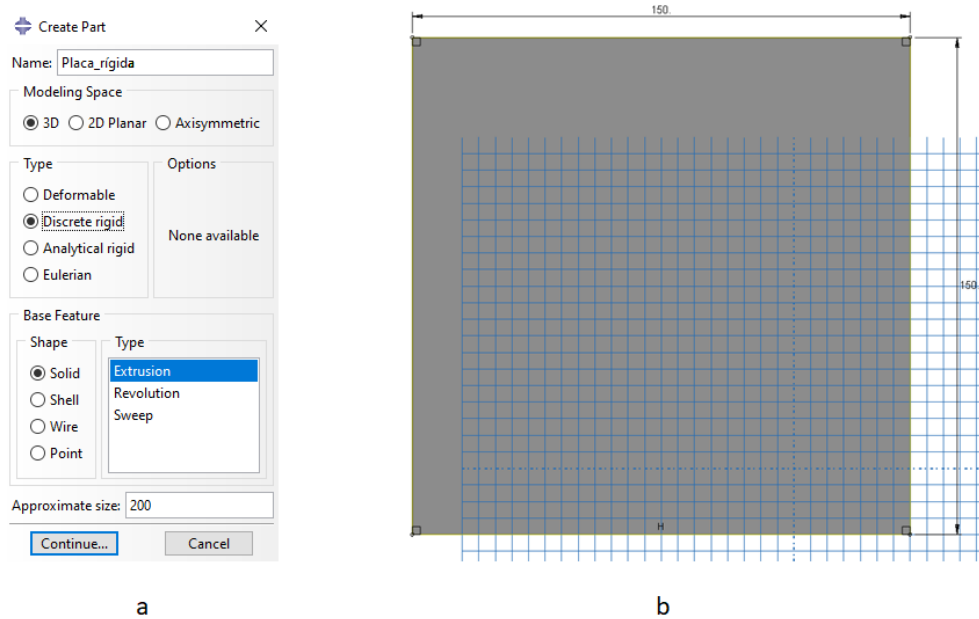


Figura 143 - Modelação da placa rígida da 2ª fixação no Abaqus: a) parâmetros de definição da parte; b) dimensões da placa rígida.

Importados todos os elementos do conjunto, de seguida foi necessário realizar quatro partições no modelo importado no Abaqus, com formato circunferencial e de diâmetro 20 mm, que simulam a área circunferencial abrangida pelas anilhas e que serão responsáveis pela restrição do conjunto (Figura 144).

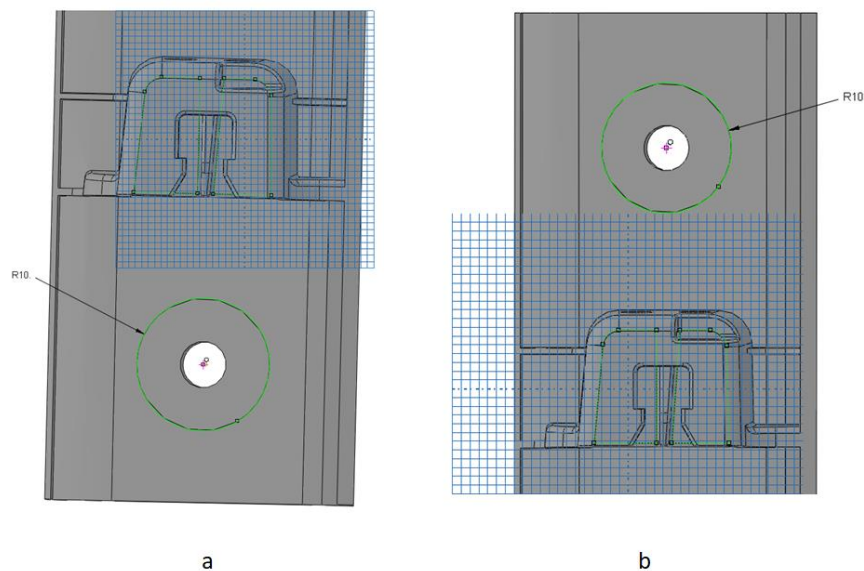


Figura 144 - Partições realizadas no modelo da 2ª fixação: a) na zona dianteira do porta agrafos; b) na zona traseira do porta agrafos.

Aplicadas as partições, passou-se à montagem de todos os elementos do conjunto no módulo “Assembly” do Abaqus (Figura 145).

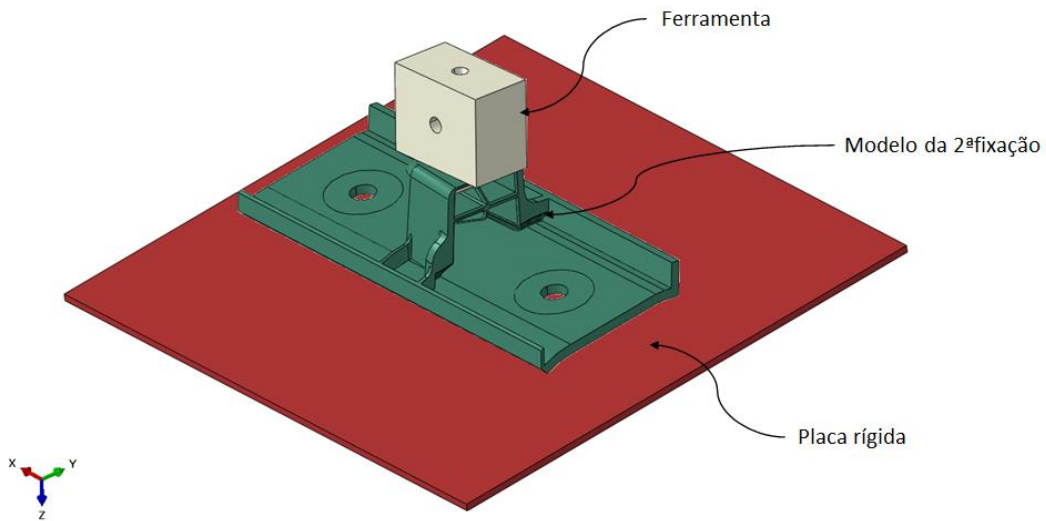


Figura 145 - Montagem do conjunto da 2ª fixação no módulo "Assembly" do Abaqus.

Para o modelo da 2ª fixação foram utilizados elementos tetraédricos de segunda ordem e os respectivos parâmetros podem ser consultados na introdução do capítulo na Figura 95. O tamanho atribuído teve em conta o estudo de convergência exposto no capítulo 3.7.3.2. Na Figura 146 apresenta-se o modelo sólido após a geração da malha, totalizando 185525 elementos tetraédricos gerados.

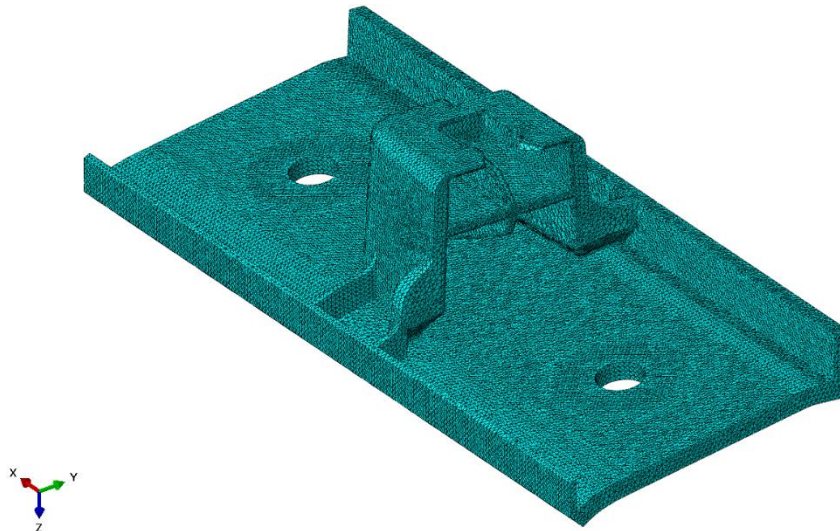


Figura 146 - Malha gerada no modelo da 2ª fixação.

A malha atribuída aos elementos rígidos do conjunto foi considerada apropriada para este tipo de corpos, cujos parâmetros podem ser consultados na introdução do capítulo, mais concretamente na Figura 96. O tamanho gerado para a placa foi de 15 mm de aresta (Figura 147 a) e para a ferramenta foi de 1 mm de aresta (Figura 147 b), o que perfaz 240 e 6418 elementos gerados, respetivamente.

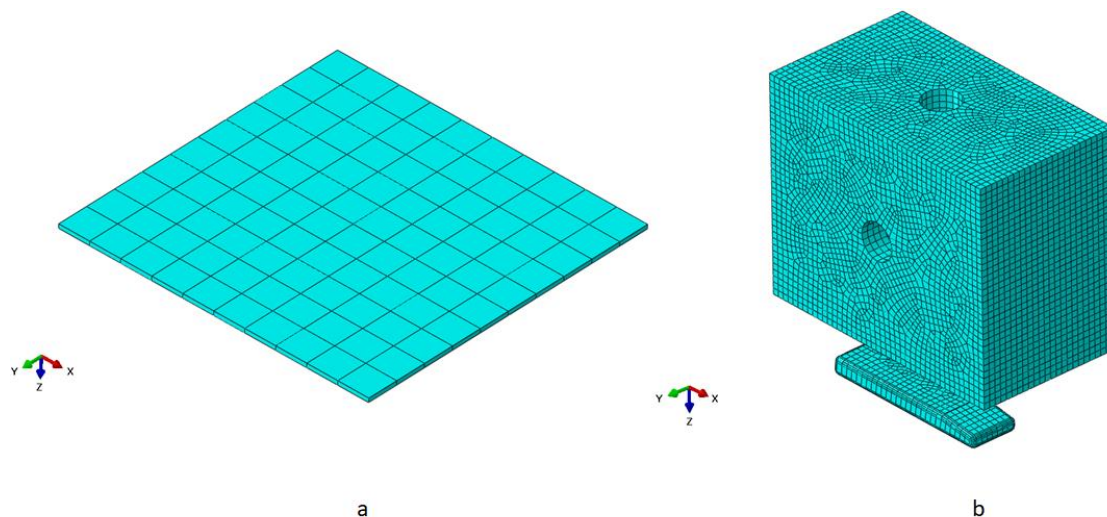


Figura 147 - Malhas geradas nos corpos rígidos do conjunto da 2ª fixação: a) placa; b) ferramenta.

Para garantir as direções de ensaio mencionadas no caderno de encargos do cliente, mais uma vez criou-se um referencial local na ferramenta (Figura 148).

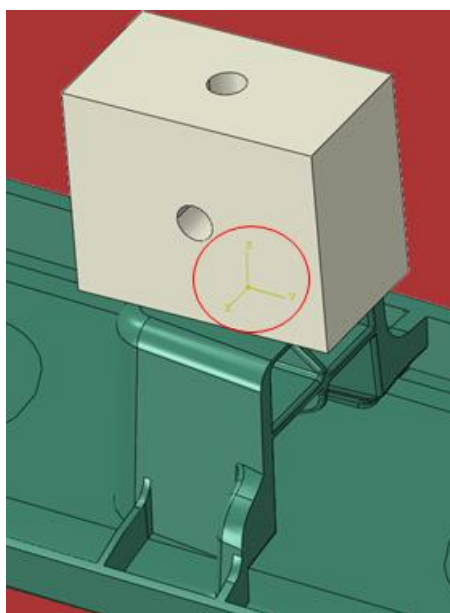


Figura 148 – Criação do referencial local na ferramenta da 2ª fixação.

A nível de interações entre os elementos do conjunto, na direção ao arrancamento foi possível aplicar um contato geral. Os parâmetros e propriedades relativos a este tipo de interação podem ser consultados na introdução do capítulo na Figura 97 e Figura 100. Quanto às simulações ao corte, segundo a direção B, num primeiro momento atribuiu-se um contato do tipo “*Surface to surface*” entre uma face da ferramenta (destacada a cor vermelha na Figura 149) e uma das faces do desenganador (destacada a cor roxa na Figura 149), com a face da ferramenta a ser a “*Master surface*”.

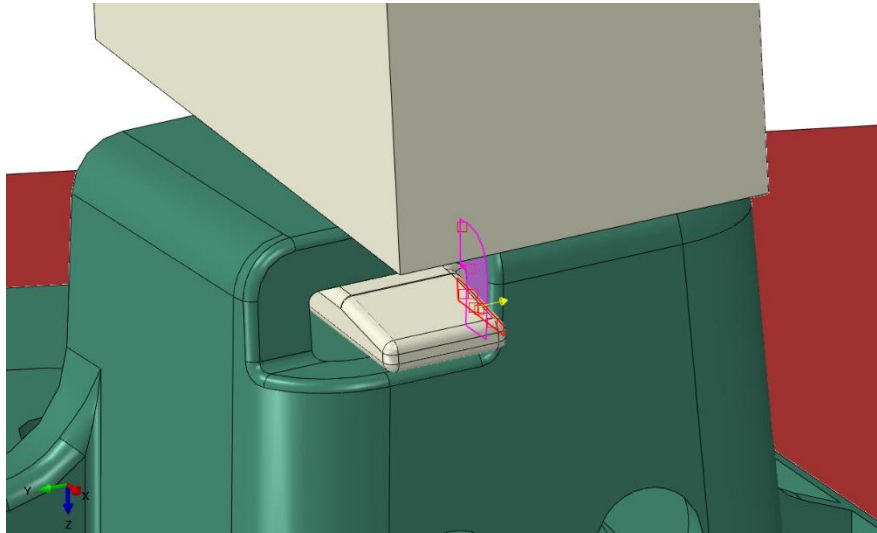


Figura 149 - Contato do tipo "Surface to surface" fornecido entre uma das faces da ferramenta e uma das paredes laterais do desenganador, segundo a direção B (direção ao corte).

Um segundo contato foi aplicado entre a face inferior do modelo da 2ª fixação (evidenciado a cor roxa na Figura 150) e a face superior da placa rígida (frisada na Figura 150 a cor vermelha) do tipo "Surface to surface" e segundo a direção B. Esta interação evita a criação de um momento no modelo, aquando da aplicação do deslocamento, o que acaba por evitar a penetração indevida entre o modelo e a placa.

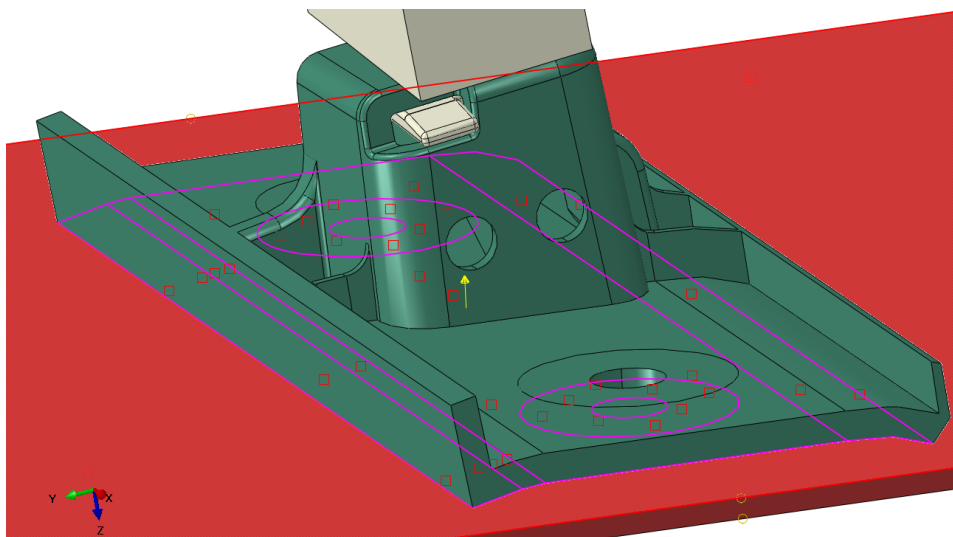


Figura 150 - Contato do tipo "Surface to surface" fornecido entre a face inferior do modelo da 2ª fixação e a face superior da placa, segundo a direção B (direção ao corte).

Ainda no que se refere a interações, na direção C (direção ao corte), o último contato apresentado na Figura 150, entre o modelo e a placa, aplica-se igualmente a esta direção de ensaio. E por fim, concedeu-se a interação entra as superfícies indicadas a cor vermelha e a cor roxa que pertencem à ferramenta e ao modelo da 2ª fixação, respetivamente (Figura 151).

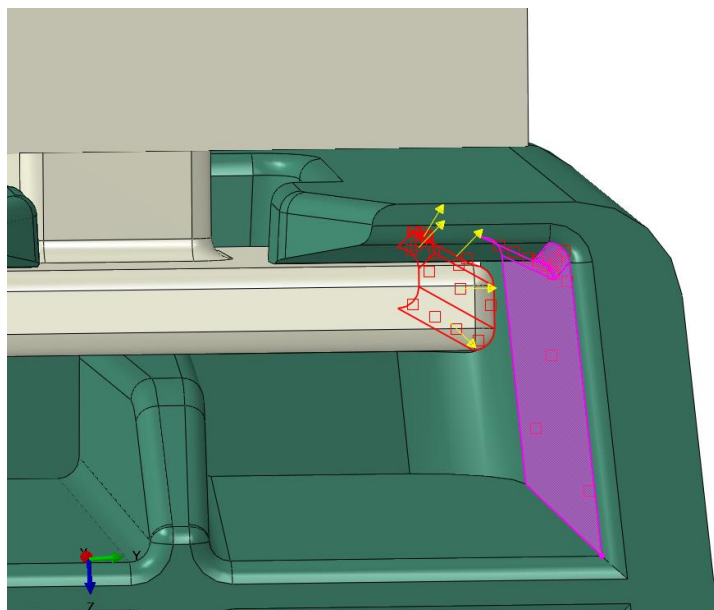


Figura 151 - Contato do tipo "Surface to surface" fornecido entre uma face da ferramenta e uma face interior do modelo, segundo a direção C (direção ao corte).

Antes da aplicação das condições fronteira, respeitou-se o mesmo procedimento anteriormente adotado para a 1ª fixação e que diz respeito à criação de pontos de referência. No total foram criados seis pontos de referência (Figura 152), um na ferramenta ("RP1"), um na placa ("RP6") e os restantes quatro no modelo ("RP2", "RP3", "RP4", "RP5").

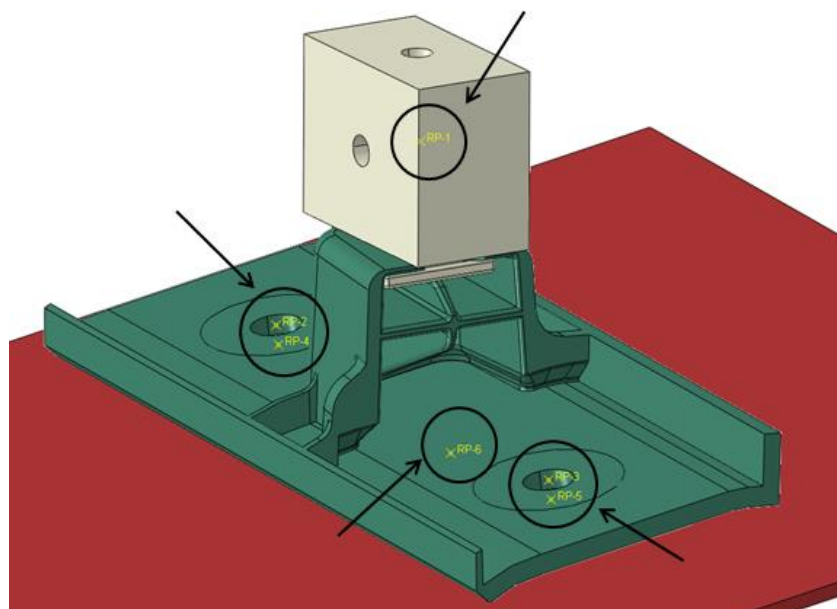


Figura 152 – Criação pontos de referência no conjunto da 2ª fixação.

Os pontos de referência criados no modelo serviram para aplicar as restrições do tipo “coupling” na área circunferencial das anilhas. Na Figura 153 destaca-se a cor roxa as quatro restrições efetuadas.

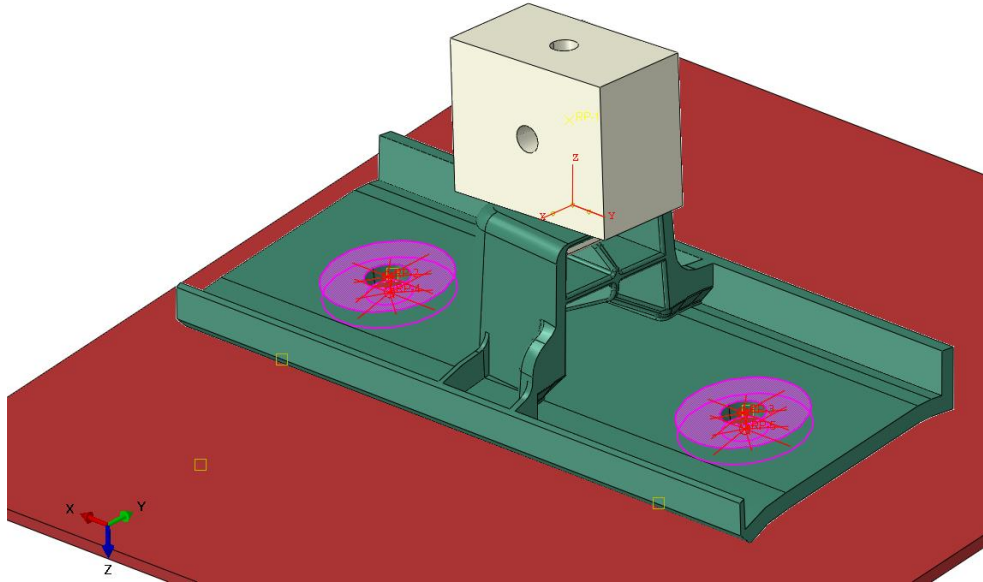


Figura 153 – Restrições do tipo “coupling” aplicadas nas zonas abrangidas pelas anilhas no modelo da 2ª fixação.

O movimento da ferramenta foi restringido ao ponto de referência “RP1” criado, através de uma restrição do tipo “Rigid body”. Na Figura 154 apresenta-se a restrição aplicada à ferramenta distinguida pela cor roxa.

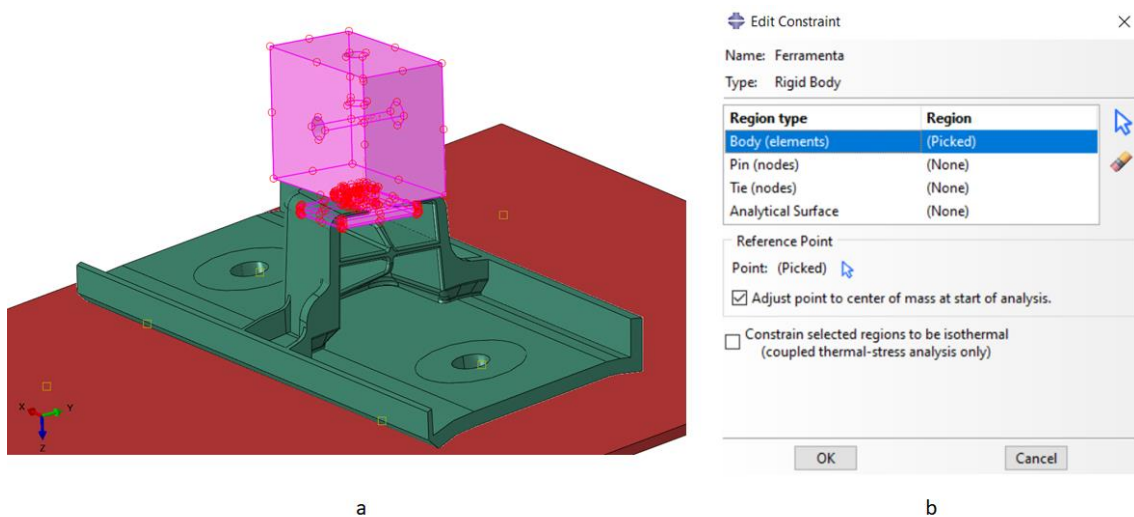


Figura 154 – Restrição do tipo “Rigid body”: a) aplicada na ferramenta; b) parâmetros da restrição.

O movimento da placa foi associado ao ponto de referência “RP6” (Figura 155).

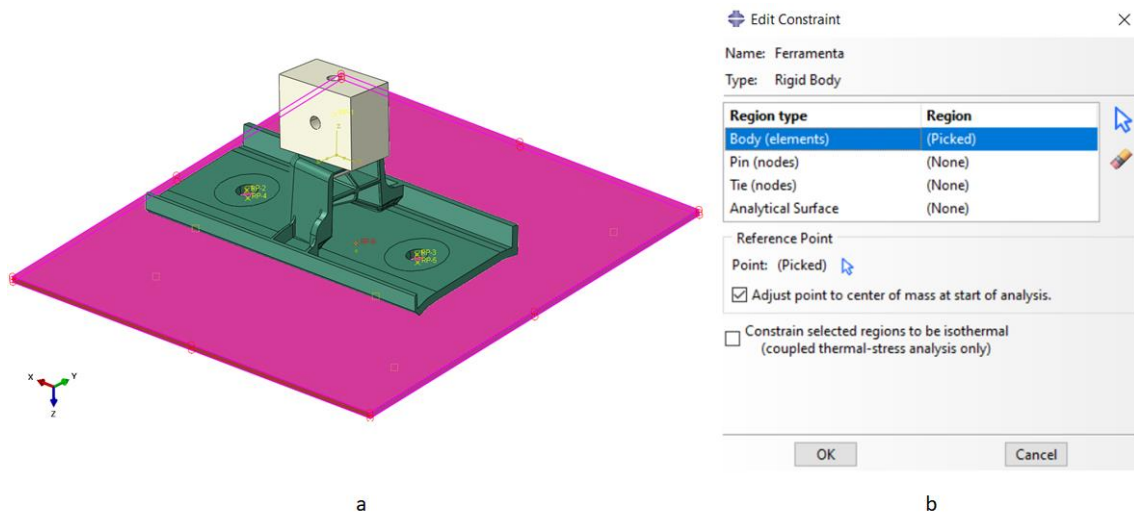


Figura 155 - Restrição do tipo “Rigid body”: a) aplicada na placa; b) parâmetros da restrição.

Nesta fase procedeu-se à fixação do modelo através da aplicação de quatro condições fronteira nos pontos de referência originados no modelo (Figura 156).

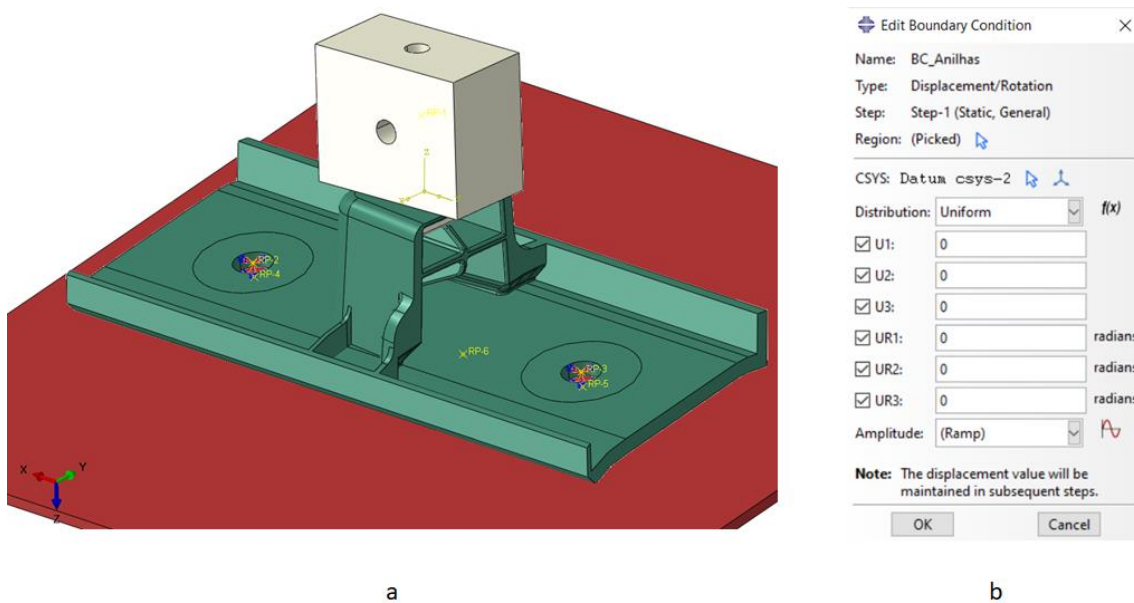


Figura 156 - Condições fronteira: a) aplicadas no modelo da 2ª fixação; b) parâmetros.

Salienta-se que as condições fronteira aplicadas no modelo servem tanto para a simulação na direção ao arrancamento como para as simulações nas direções do corte. A imobilização da mesa de tração foi executada através da fixação dos seis graus de liberdade no ponto de referência “RP6” criado neste corpo (Figura 157). Esta última condição fronteira serve também para todas as direções de simulação.

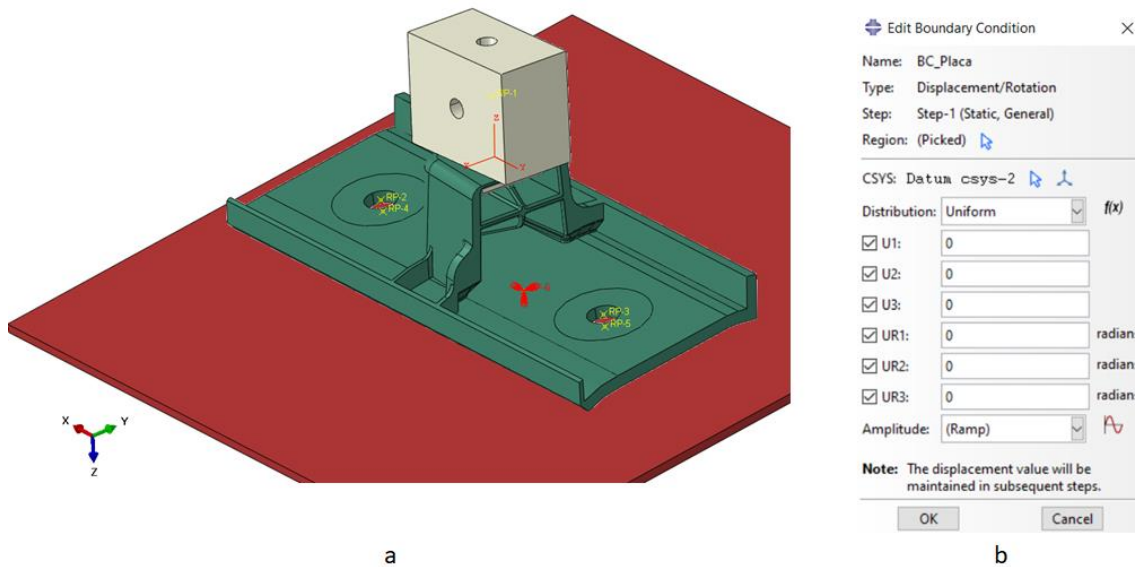


Figura 157 - Condição fronteira: a) aplicada na placa da 2ª fixação; b) parâmetros.

A ação da carga para a simulação ao arrancamento foi aplicada por meio de um deslocamento no ponto de referência da ferramenta (RP1), segundo o eixo local z e de valor igual a 5 mm. Este valor teve em conta o deslocamento máximo suportado pela fixação da posição 1 no ensaio físico na direção do arrancamento (consultar Figura 83 no capítulo 3.6.3.2) aplicado de um fator de folga de 0,5 para colmatar eventuais folgas por parte da máquina de tração (Figura 158).

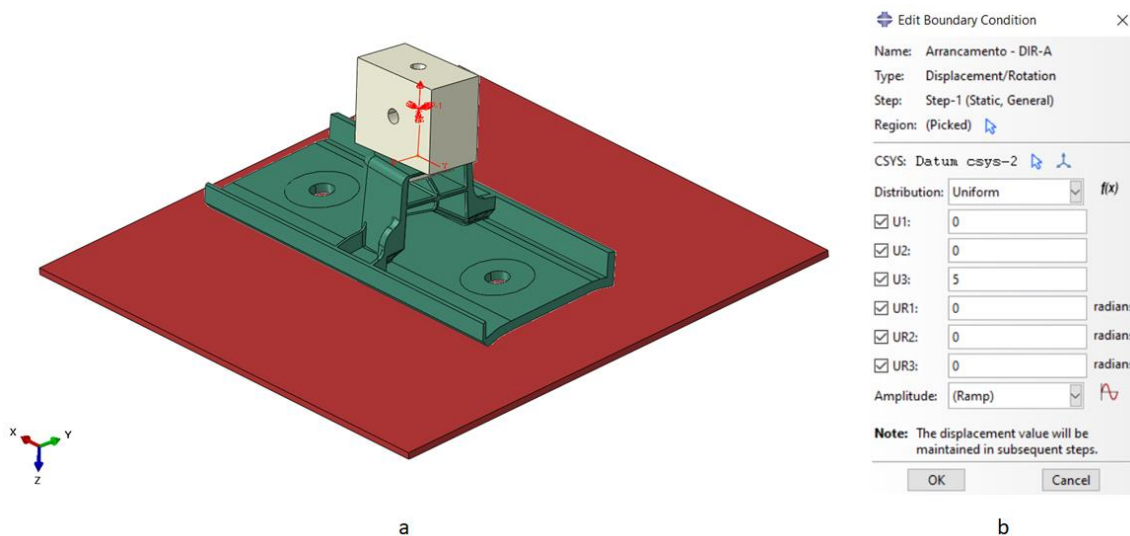


Figura 158 – Condição fronteira aplicada na simulação ao arrancamento: a) no ponto de referência “RP1” segundo o eixo local z; b) definição dos parâmetros.

Para a simulação ao corte na direção B, foi aplicado um deslocamento de 6 mm segundo o sentido positivo do eixo x no ponto de referência da ferramenta (RP1). Este valor mais uma vez teve em conta o deslocamento máximo suportado pela fixação da

posição 1 nessa direção em específico (consultar Figura 84 no capítulo 3.6.3.2), integrando o fator de folga de 0,5. Da mesma maneira, restringiu-se o movimento segundo as restantes direções para garantir que a direção do movimento seja paralela ao plano de chapa (Figura 159).

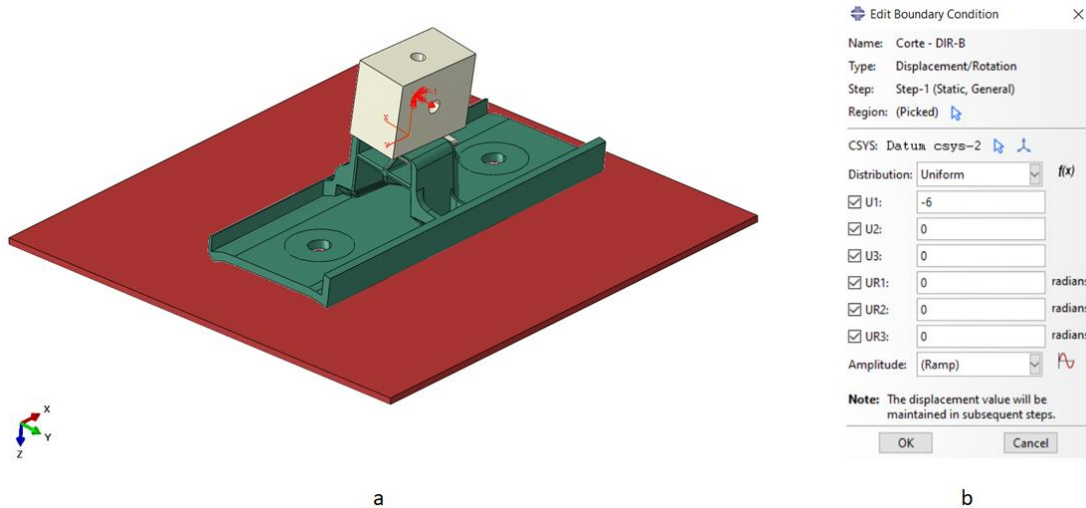


Figura 159 - Condição fronteira aplicada na simulação ao corte (direção B): a) no ponto de referência “RP1” segundo o sentido negativo do eixo local x; b) definição dos parâmetros.

Com base no deslocamento máximo suportado pela fixação da posição 1 na outra direção ao corte (direção C), consultar Figura 85 do capítulo 3.6.3.2, já com o fator de folga de 0,5 integrado, aplicou-se um deslocamento de 6 mm segundo o sentido negativo do eixo x no ponto de referência da ferramenta “RP1” (Figura 160).

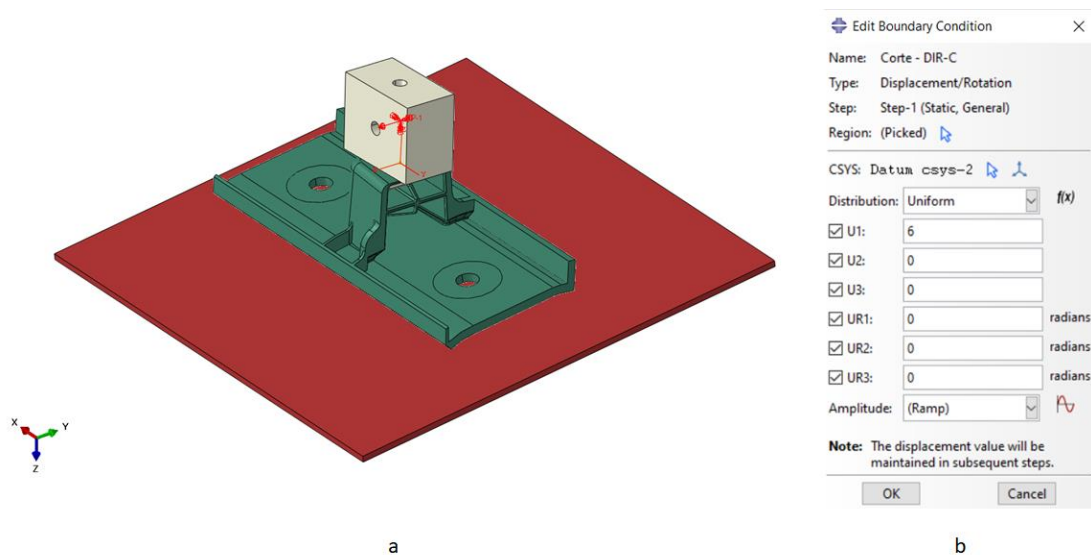


Figura 160 - Condição fronteira aplicada na simulação ao corte (direção C): a) no ponto de referência “RP1” segundo o sentido positivo do eixo local x; b) definição dos parâmetros.

Para completar o pré processamento, solicitou-se ao *software* todas as variáveis visualizadas na Figura 102 e Figura 103, presentes na introdução do capítulo, tais como deslocamentos e forças de reação segundo as direções de ensaio das fixações. De salientar que, para adquirir as forças de reação e os deslocamentos no "*History Output Request*", foi necessário criar antecipadamente um "*set*" com o ponto de referência onde se aplicou a ação da carga, no caso em concreto o "RP1". O tempo de aquisição dos dados foi de 0,01 s.

3.7.1.3 3ª fixação

No que concerne à terceira e última fixação, a metodologia de preparação para cálculo numérico seguiu os mesmos procedimentos explicados para as outras duas fixações. Numa primeira fase preparou-se o modelo sólido da primeira posição, com recurso ao *software* CATIA (Figura 161).

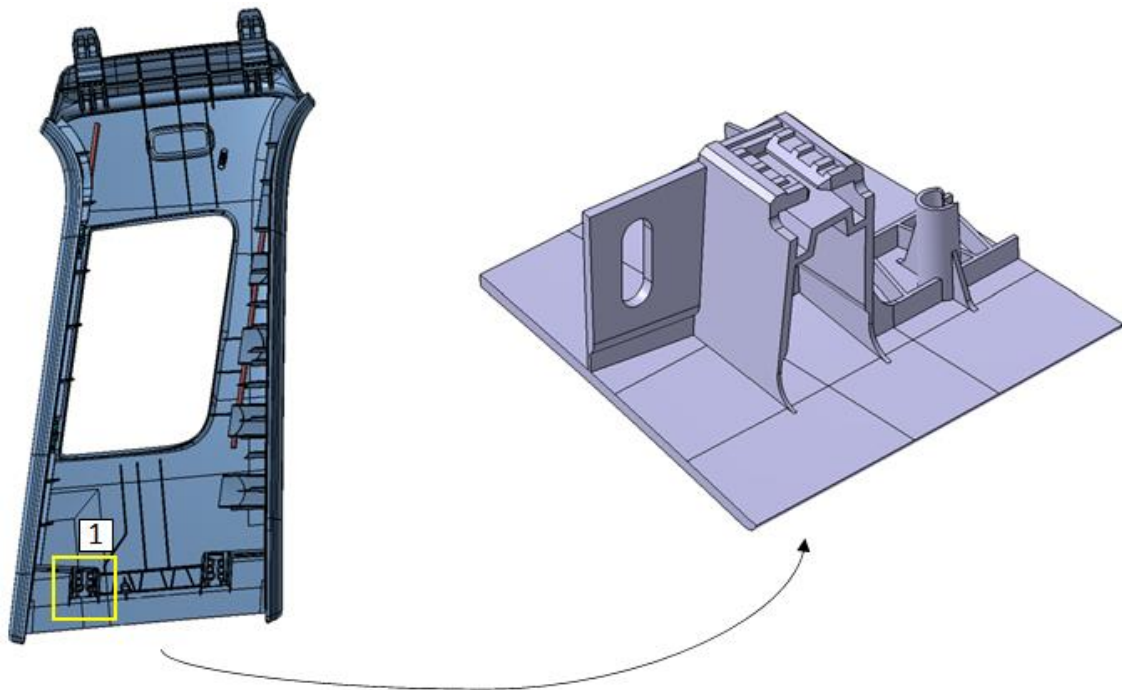


Figura 161 – Preparação do modelo 3D da 3ª fixação para ensaio numérico.

Contrariamente ao que foi exposto no capítulo 3.6.2.3, para o ensaio numérico optou-se por isolar uma fixação ao invés de a ensaiar integrada no pilar no seu todo, tal como se pode observar na Figura 161. A razão desta abordagem relacionou-se com questões de simplificação de cálculo. O modelo apresentado na Figura 161 apresenta já algumas simplificações realizadas na geometria, nomeadamente na eliminação da aba lateral do pilar (Figura 162).

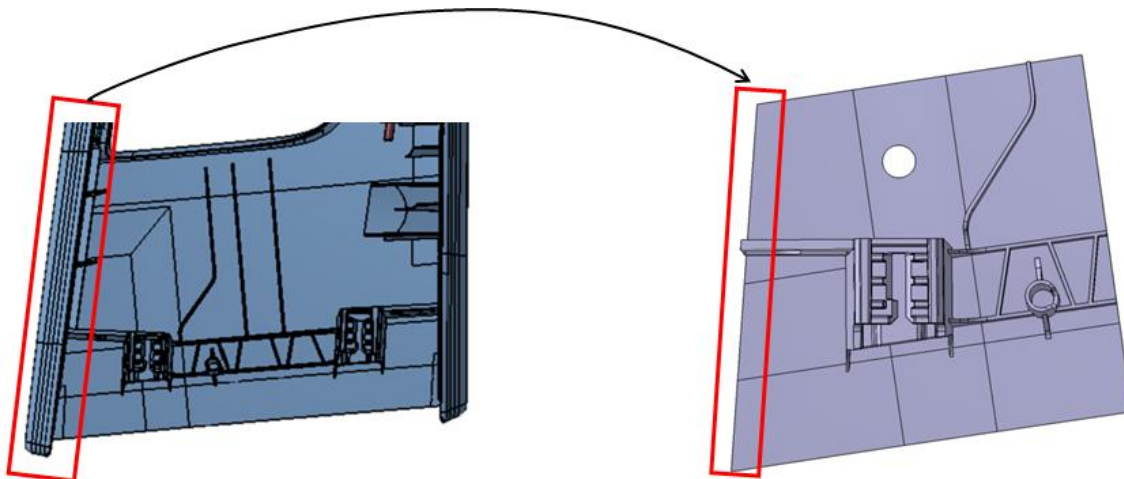


Figura 162 - Remoção da aba do pilar no modelo 3D.

O furo para passagem do parafuso foi criado no modelo com base nas dimensões apresentadas na Figura 163.

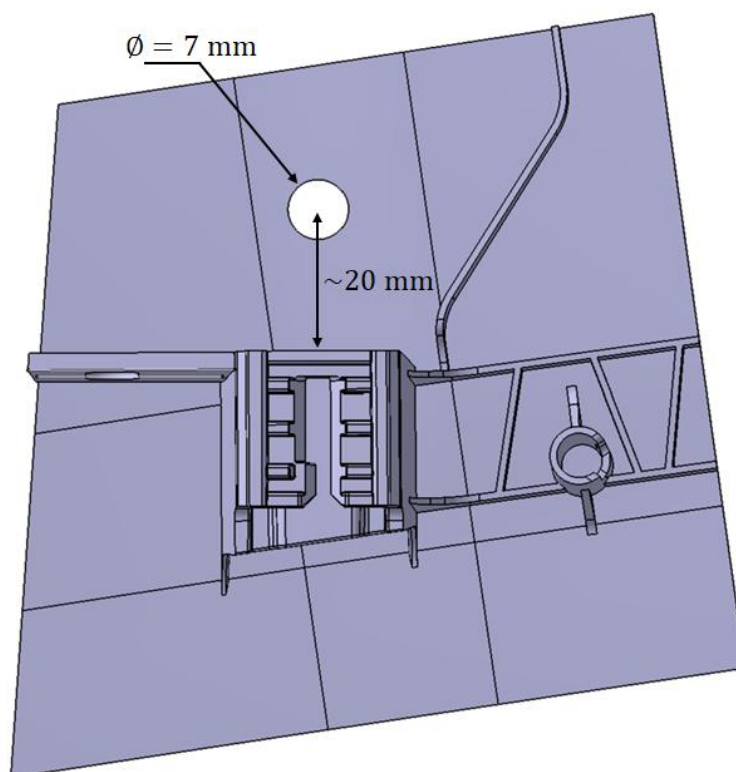


Figura 163 - Dimensionamento do furo responsável pela fixação do modelo da 3ª fixação à mesa da máquina de tração.

Sucedeu-se a importação do modelo 3D para o Abaqus, apresentado na Figura 163, a fim de se iniciar o pré processamento (Figura 164).

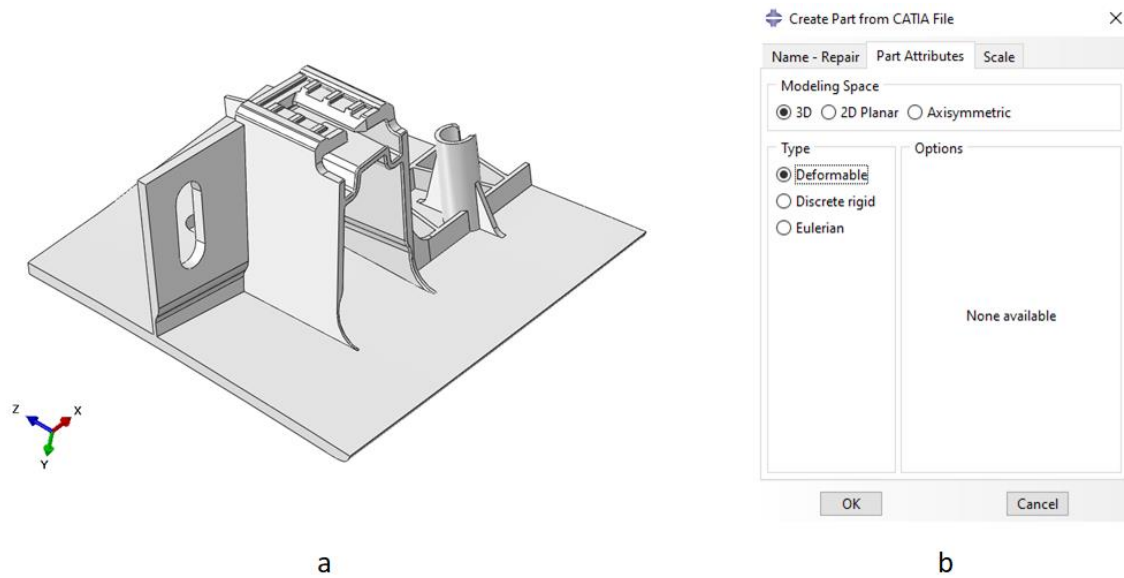


Figura 164 - Processo de importação no Abaqus a) modelo da 3ª fixação; b) parâmetros de importação.

A ferramenta que replica a geometria do *clip* metálico foi importada logo de seguida como corpo rígido (Figura 165).

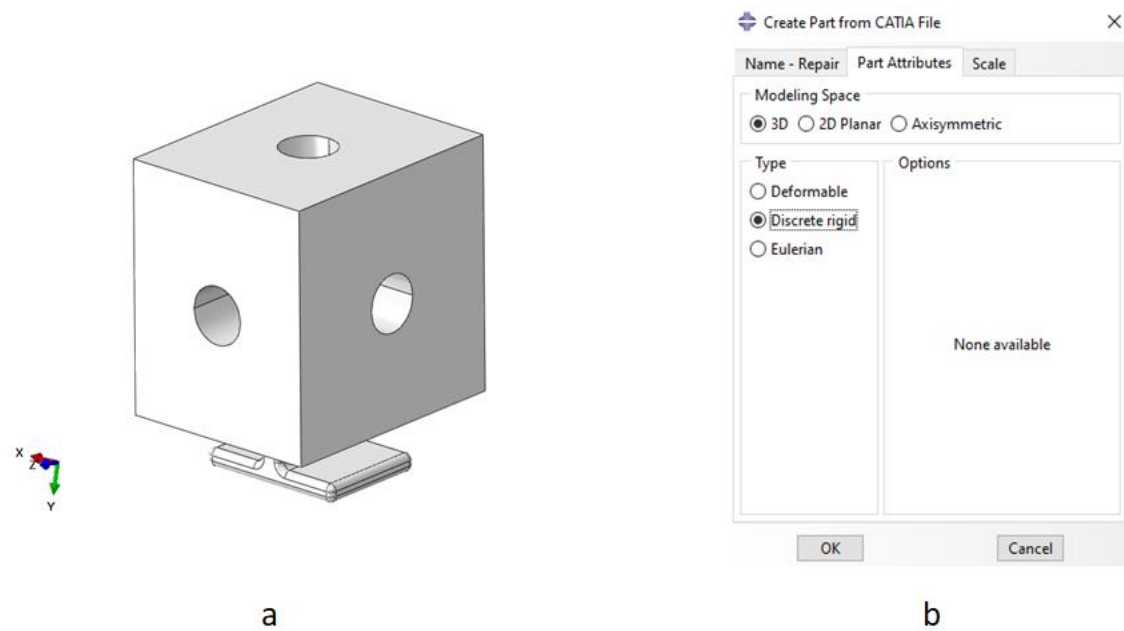


Figura 165 - Importação da ferramenta no Abaqus: a) geometria da ferramenta da 3ª fixação; b) parâmetros de importação.

Para completar os elementos do conjunto, mais uma vez desenvolveu-se uma placa de cariz rígido no módulo "Part" do Abaqus (Figura 166).

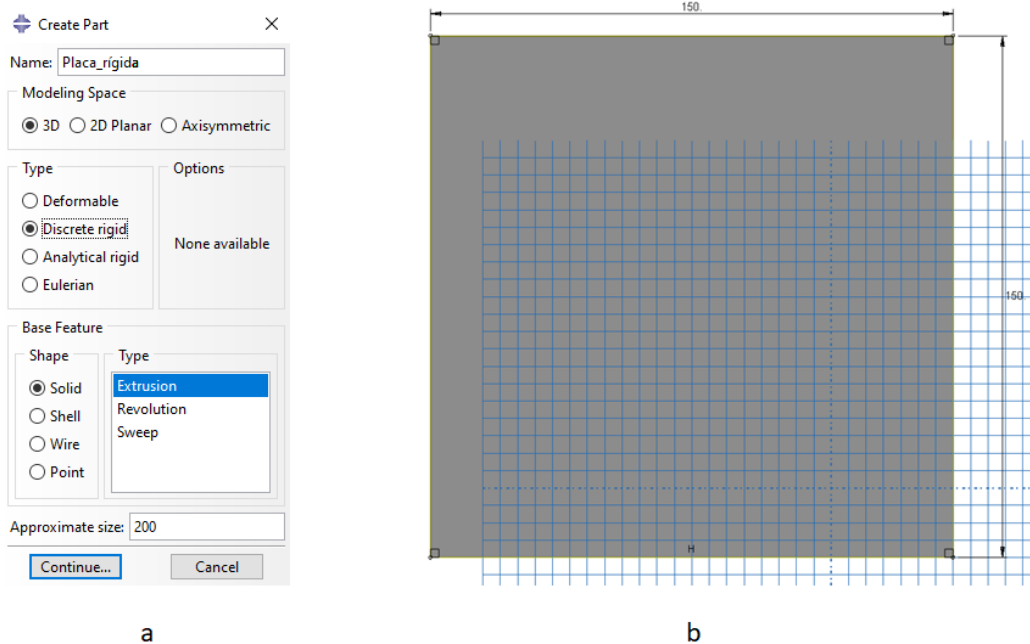


Figura 166 - Modelação da placa rígida da 3ª fixação no Abaqus: a) parâmetros de definição da parte; b) dimensões da placa rígida.

Após a fase de importação, seguidamente passou-se à partição do modelo na zona abrangida pela anilha com formato circunferencial e de diâmetro 20 mm (Figura 167).

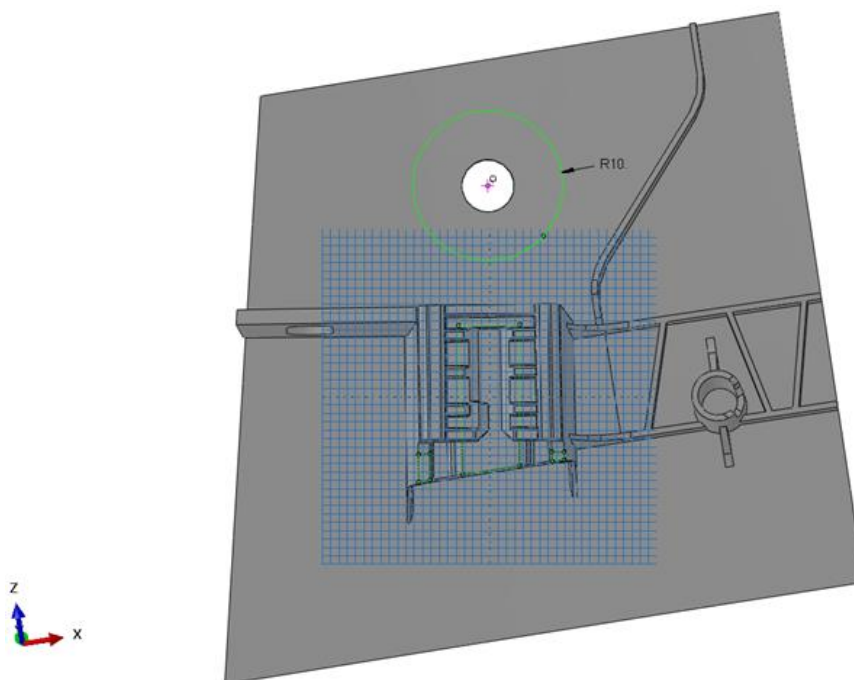


Figura 167 - Partição do formato da anilha no modelo da 3ª fixação.

Adicionalmente, por analogia ao ensaio físico, sucedeu-se mais uma partição no modelo que abrange a área do calço com formato retangular (Figura 168).

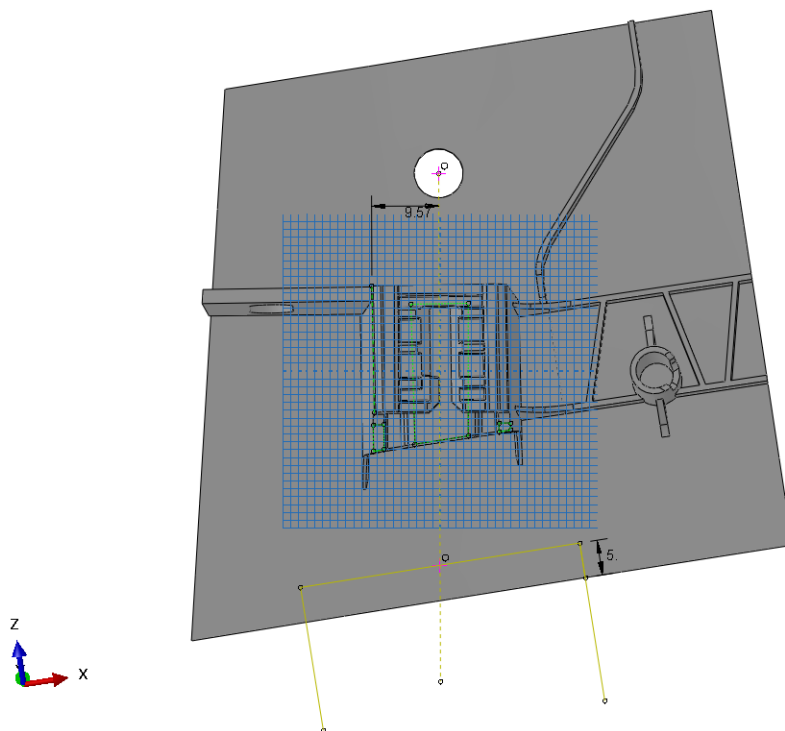


Figura 168 - Partição do formato retangular do calço no modelo da 3ª fixação.

Adicionalmente, foi criada uma nova partição na zona lateral do modelo, com o formato retangular do calço apresentado na Figura 168, para restringir esta zona e consequentemente reproduzir com precisão os ensaios experimentais nas direções da simulação ao corte (Figura 169).

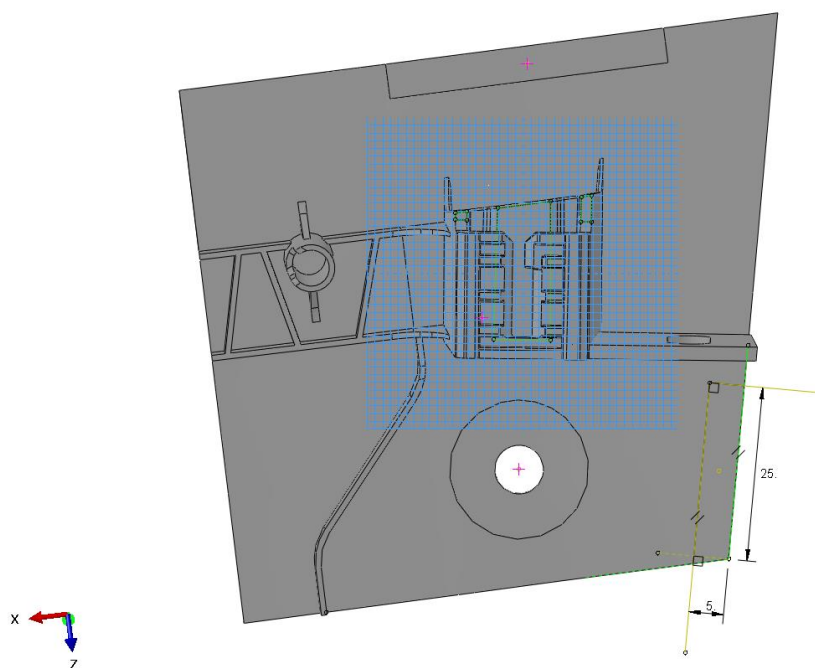


Figura 169 - Partição lateral do formato retangular do calço no modelo da 3ª fixação.

O facto de se ter isolado a fixação para simulação numérica, ao invés de se ter simulado a fixação incorporada em todo o pilar, pode ter influenciado a rigidez nas direções ao corte. O que se constatou durante a simulação na direção C foi que a ação da carga, nesta direção, criava um momento na zona assinalada com o círculo laranja na Figura 170 a). Apesar de este efeito ser também sentido na zona oposta, aquando da aplicação da carga na direção B (Figura 170 b), a restrição da zona particionada na Figura 169 providenciou resultados semelhantes à realidade para ambas as direções ao corte.

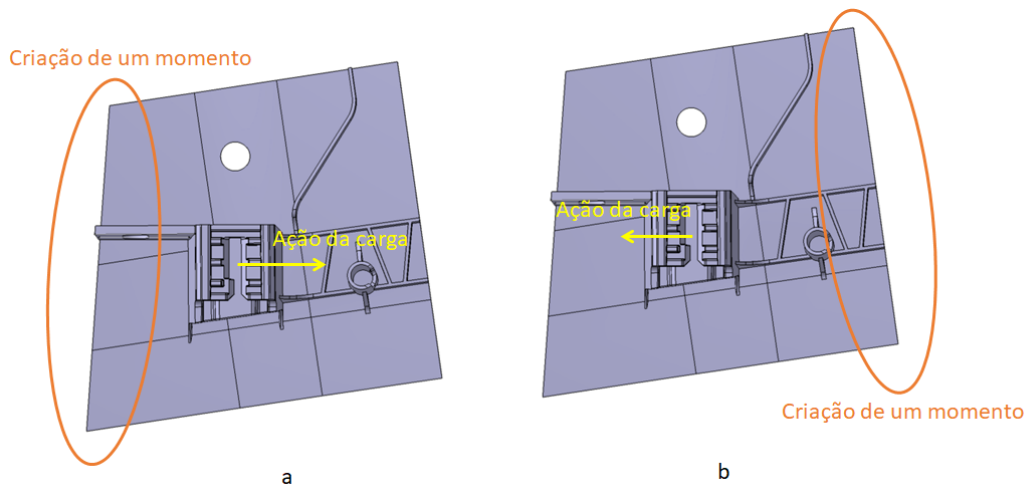


Figura 170 – Imagens alusivas às zonas de criação de momentos no modelo da 3ª fixação nas simulações numéricas ao corte: a) na direção C; b) na direção B.

Após o modelo estar devidamente particionado, prosseguiu-se com a montagem de todos os elementos do conjunto no módulo “*Assembly*” do Abaqus (Figura 171).

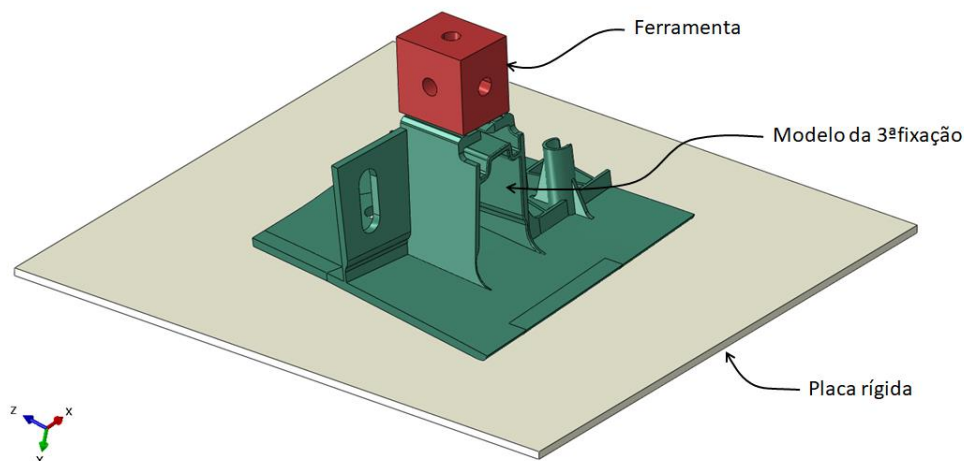


Figura 171 - Montagem do conjunto da 3ª fixação no módulo “*Assembly*” do Abaqus.

No modelo da 3ª fixação gerou-se um total de 247237 elementos tetraédricos de segunda ordem, com os parâmetros a poderem ser consultados na introdução do capítulo na Figura 95. O tamanho atribuído foi apoiado no estudo de convergência

exposto no capítulo 3.7.3.3. O tamanho de aresta gerado para a ferramenta foi de 1 mm e para a placa foi de 15 mm, totalizando 4427 e 240 elementos gerados, respetivamente. Os parâmetros das malhas geradas nos corpos rígidos podem ser consultados idênticamente na introdução no capítulo, na Figura 96. Na Figura 172 apresenta-se o conjunto com os diferentes tipos e tamanhos de malha.

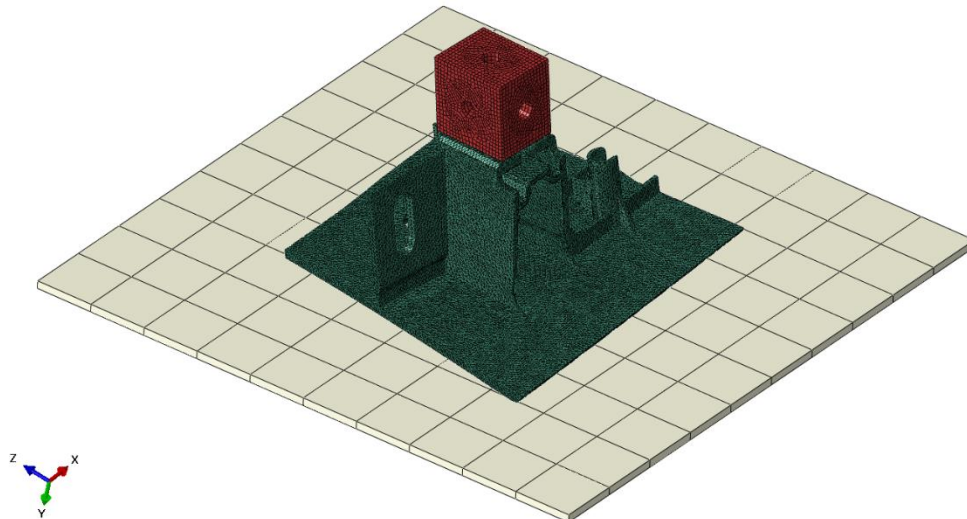


Figura 172 - Malhas geradas nos elementos constituintes do conjunto da 3ª fixação.

Foi criado um referencial local na ferramenta com o objetivo já referido: garantir as corretas direções durante a aplicação da carga (Figura 173).

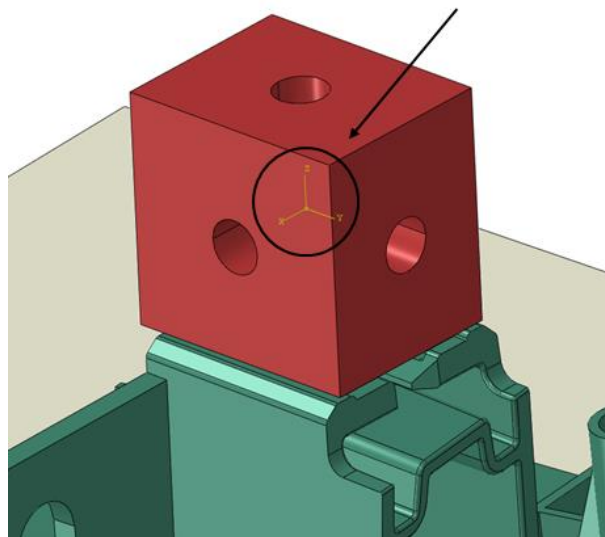


Figura 173 – Criação do referencial local na ferramenta da 3ª fixação.

A nível de interações entre os elementos do conjunto, tanto para a simulação ao arrancamento como para as simulações ao corte, aplicou-se um contato geral. Os parâmetros e propriedades relativos a este tipo de interação podem ser consultados na introdução do capítulo na Figura 97 e Figura 100.

Foram criados seis pontos de referência no conjunto, para posteriormente aplicar as condições fronteira (Figura 174).

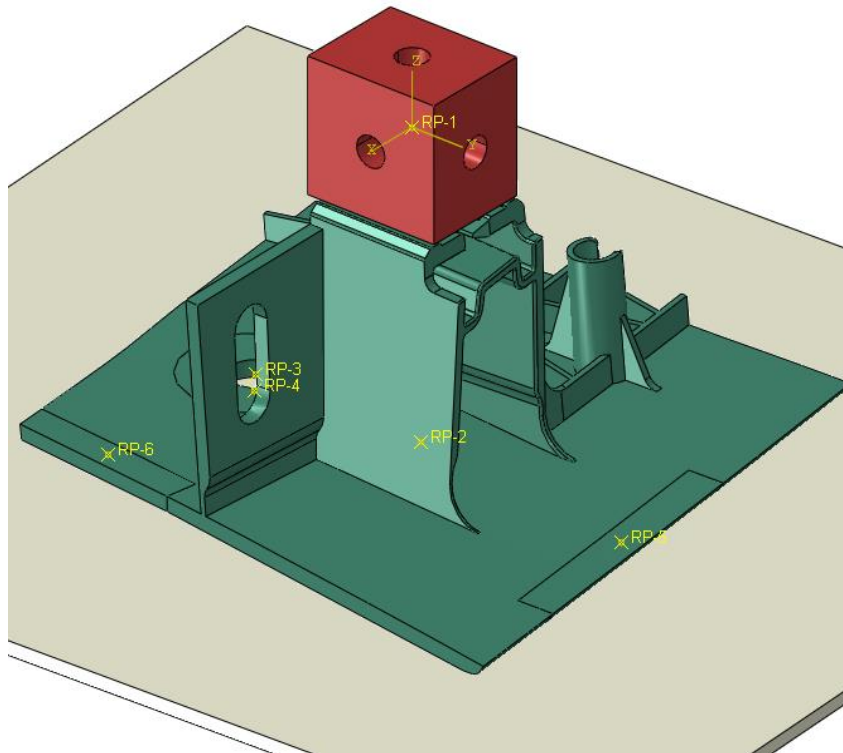


Figura 174 – Criação dos pontos de referência no conjunto.

A restrição ao movimento das zonas do modelo abrangidas pela anilha e pelo calço foi aplicada aos pontos de referência aí criados (Figura 175).

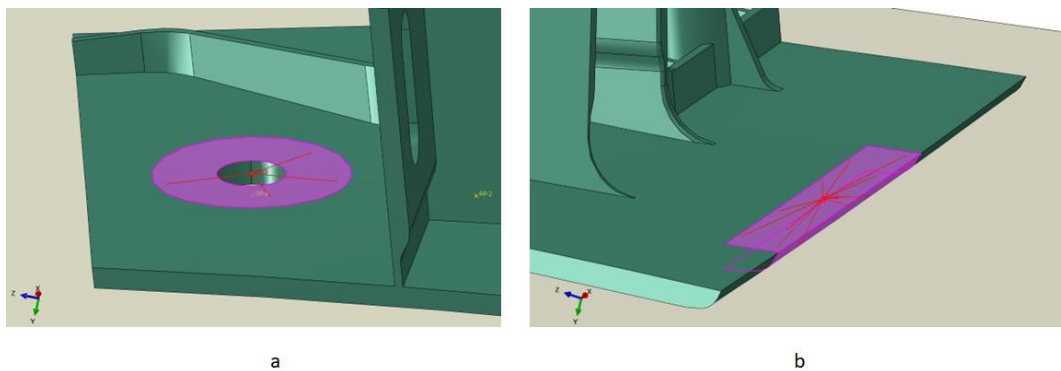


Figura 175 – Restrições do tipo "Coupling" no modelo da 3ª fixação: a) zona da anilha; b) zona do calço.

Complementarmente, apenas nas simulações ao corte, além das apresentadas na Figura 175, restringiu-se o movimento da zona do modelo abrangida pelo calço lateral (Figura 176).

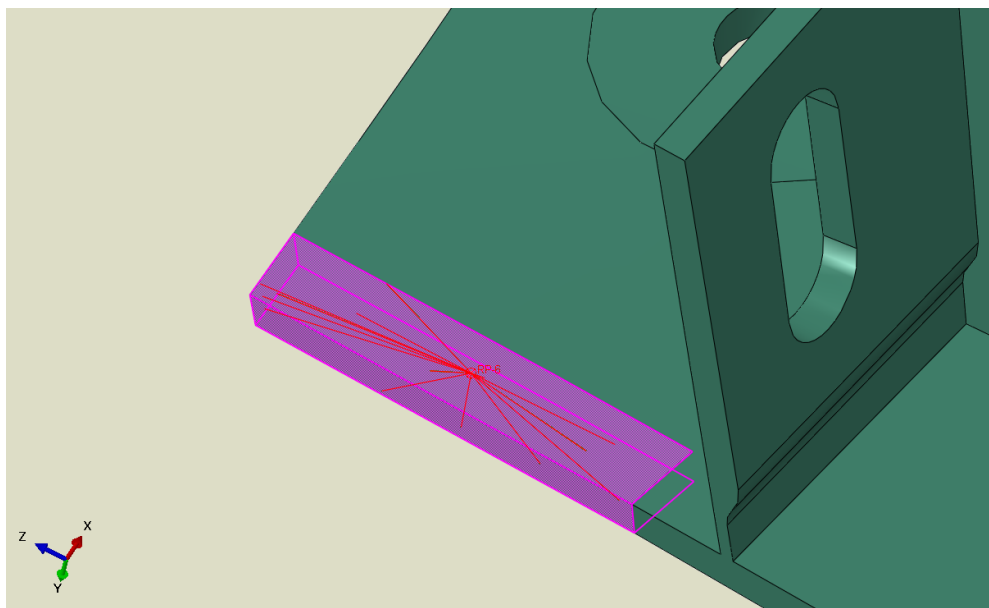


Figura 176 - Restrições do tipo "Coupling" aplicada na zona lateral do modelo da 3ª fixação para simulações ao corte.

O mesmo foi concretizado para as partes rígidas, onde se associou o movimento da ferramenta e da placa aos pontos de referência "RP1" e "RP2", respetivamente, através de uma restrição do tipo "Rigid body". Na Figura 177 distinguem-se as restrições empregues nos corpos rígidos a cor roxa.

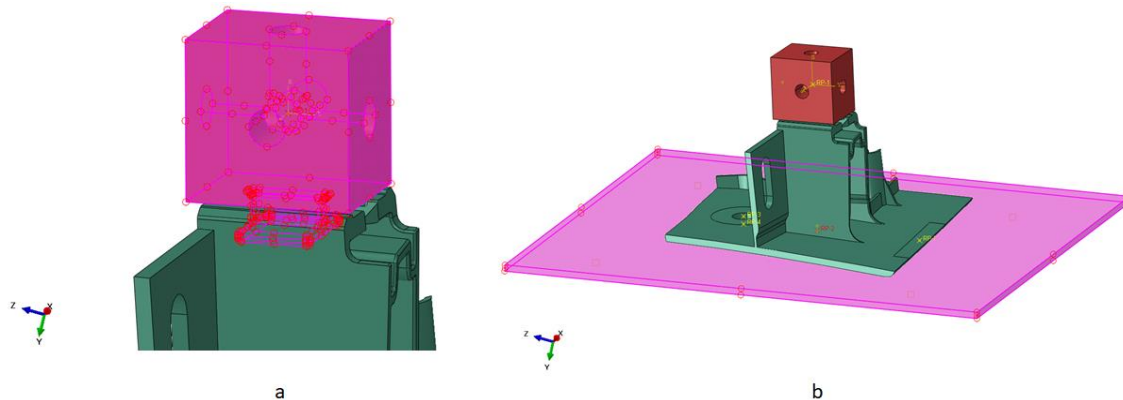


Figura 177 - Restrições do tipo "Rigid body" nas partes rígidas do conjunto da 3ª fixação: a) ferramenta; b) placa.

Na simulação ao arrancamento, aplicaram-se quatro condições fronteira nos pontos de referência do modelo "RP3", "RP4" e "RP5" (Figura 178).

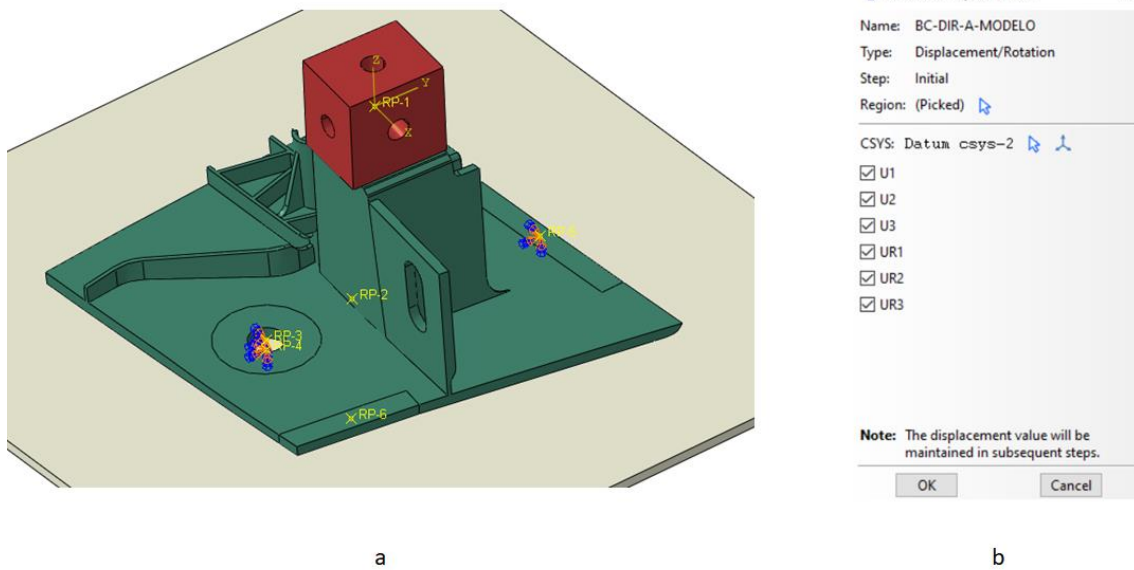


Figura 178 – Condições fronteira: a) aplicadas no modelo da 3ª fixação na simulação ao arrancamento; b) definição dos parâmetros.

Para as simulações ao corte, adicionou-se a condição fronteira na zona lateral no ponto de referência “RP6” (Figura 179).

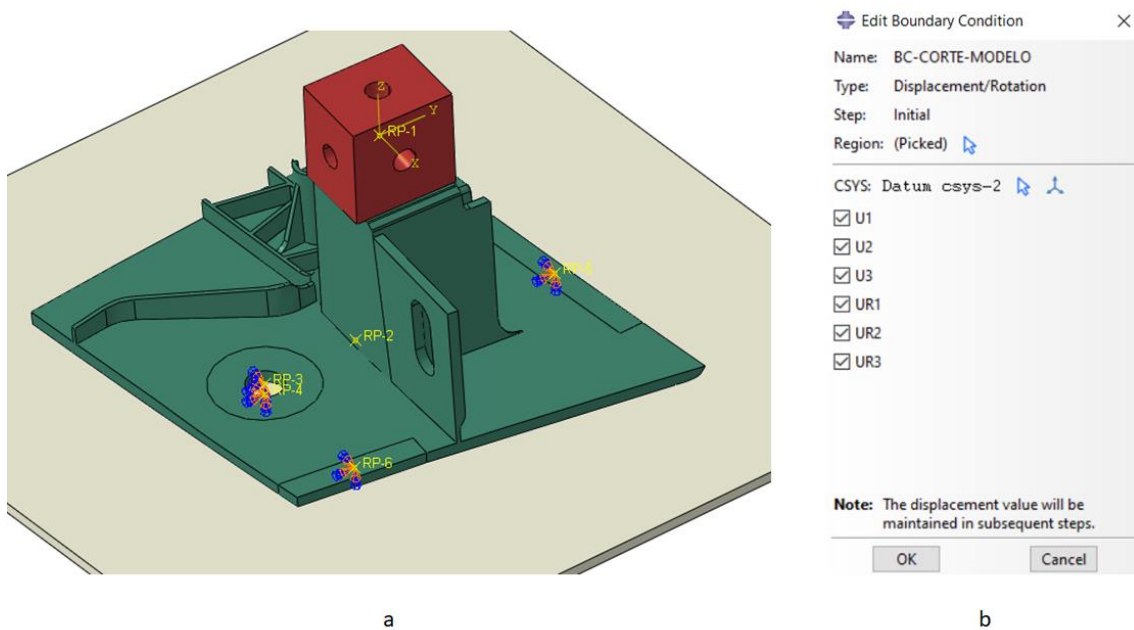


Figura 179 - Condições fronteira: a) aplicadas no modelo da 3ª fixação nas simulações ao corte; b) definição dos parâmetros.

A placa rígida viu o seu movimento impedido por aplicação da condição fronteira no ponto de referência “RP2” (Figura 180). Esta última é comum a todas as simulações.

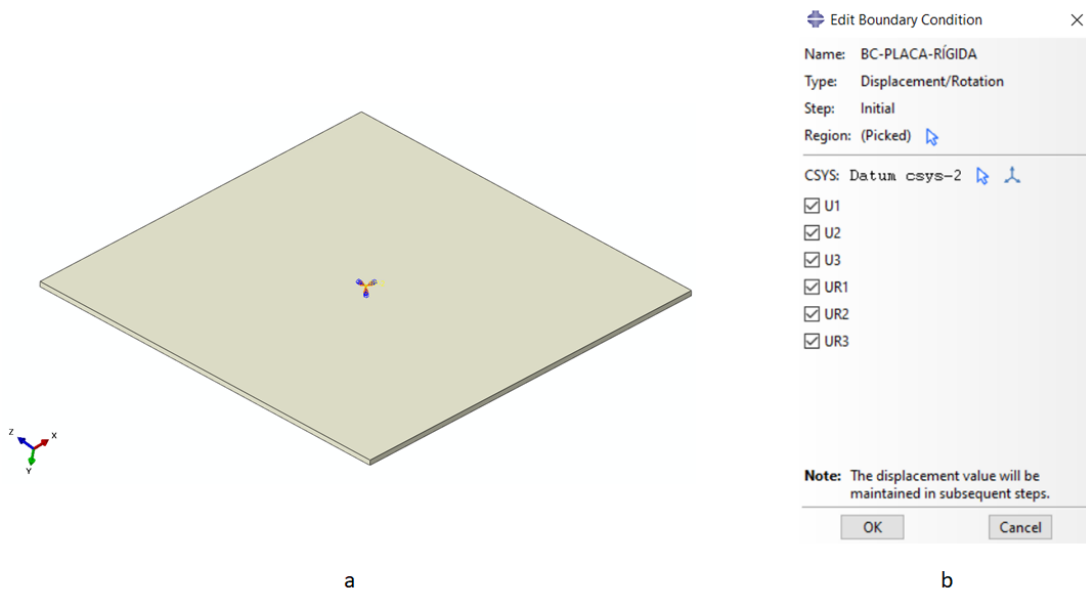


Figura 180 - Condição fronteira: a) aplicada na placa; b) definição dos parâmetros.

A ação da carga foi realizada através da aplicação de uma condição fronteira no ponto de referência “RP1”. Dependendo da direção da simulação, a magnitude do deslocamento variou. Na direção ao arrancamento, o valor de deslocamento aplicado segundo o eixo z local foi de 4 mm (Figura 181), já que, considerado os resultados dos ensaios físicos da posição 1 nesta direção (consultar Figura 90 no capítulo 3.6.3.3) e após a integração do fator de folga de 0,5, o deslocamento correspondente à força máxima suportado pela fixação nessa posição é de aproximadamente 3,3 mm.

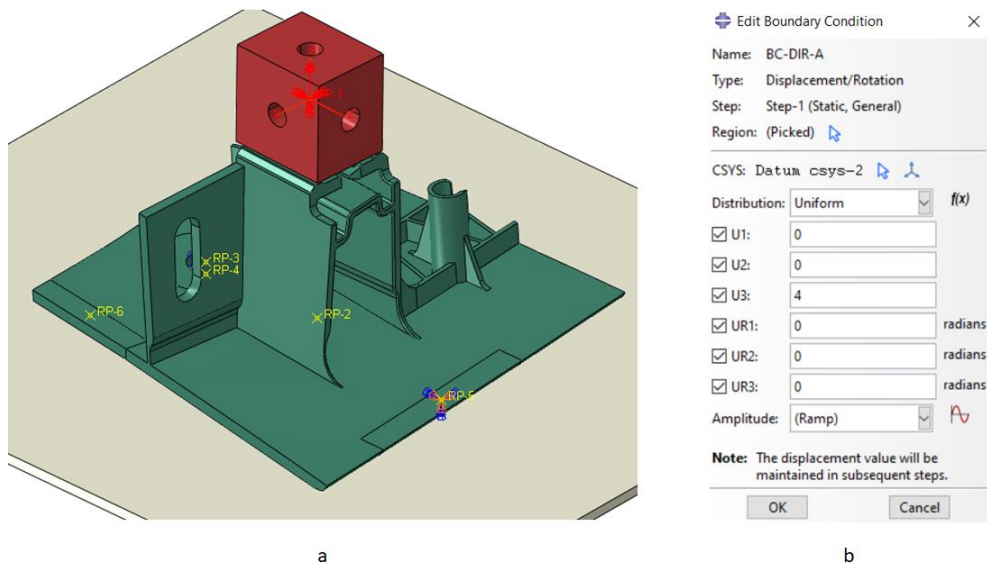


Figura 181 - Condição fronteira: a) aplicada na ferramenta no ensaio ao arrancamento; b) definição dos parâmetros.

A magnitude do deslocamento aplicado nas direções ao corte (direção B e C) foi igual para ambas e de valor igual a 6 mm na direção do eixo local x (Figura 182 a e b). Aplicado o fator de folga de 0,5 aos resultados físicos obtidos na direção B e C (consultar Figura 91 e Figura 92 no capítulo 3.6.3.3) obtêm-se deslocamentos para as forças máximas suportadas pela posição 1 de 6,85 mm e 6,30 mm, respectivamente.

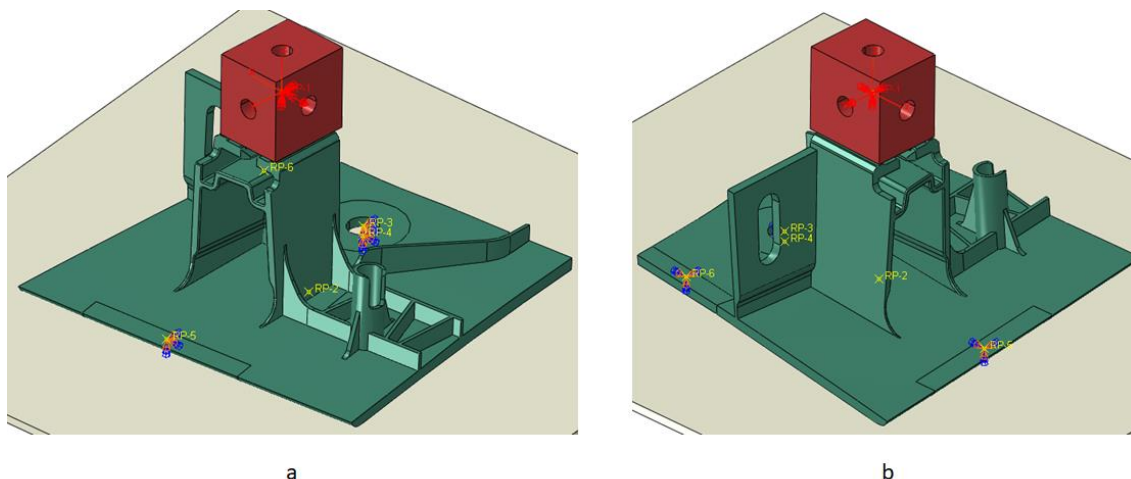


Figura 182 – Condições fronteira: a) aplicadas na ferramenta no ensaio ao corte segundo a direção B; b) aplicadas na ferramenta no ensaio ao corte segundo a direção C.

Para concluir o pré processamento e este capítulo, todas as variáveis visualizadas na Figura 102 e Figura 103, presentes na introdução do capítulo, foram solicitadas ao *software* para um tempo de aquisição de 0,01 s. Mais uma vez salienta-se que, para adquirir as forças de reação e os deslocamentos no "History Output Request", foi necessário criar antecipadamente um "set" com o ponto de referência onde se aplicou a ação da carga, no caso em concreto o "RP1".

3.7.2 Modelos materiais plásticos

Um dos fatores que influencia a precisão dos resultados das simulações numéricas e consequentemente a correlação com os ensaios físicos prende-se com a correta caracterização dos materiais que compõem os componentes de estudo. Tendo em conta que o objetivo de estudo principal reside em perceber se as fixações apresentam ou não deformação plástica para um certo valor de força, é necessário definir este tipo de comportamento para os materiais. Assim, o comportamento incorporado no Abaqus foi do tipo elástico-plástico isotrópico, denominado pelo *software* de "Elastic-plastic isotropic". Segundo mencionado no capítulo 10.2.3 "Defining plasticity in Abaqus" do manual "Getting Started with Abaqus", quando se define plasticidade para um determinado material, o Abaqus necessita dos dados reais de tensão e deformação, resultantes de um ensaio uniaxial de tração, por forma a tratar os dados corretamente [113]. Estes valores reais de tensão e deformação, ao contrário dos dados nominais, que são normalmente disponibilizados pelo fornecedor do material,

têm em conta a variação do comprimento e da área da secção transversal do provete, para cada instante de tempo do ensaio de tração, o que representa o comportamento real do material. Desta forma, para realizar a conversão da curva nominal para a curva real, é necessário ter em conta duas regiões típicas dos materiais que serão utilizados para estudo: a zona antes do ponto em que ocorre localização de deformações no provete de teste (*necking point*) e a zona após este ponto, em que o material inicia a perda de rigidez até à sua rotura. Para a primeira zona, a conversão é feita com recurso à aplicação das equações (14) e (15) [113]

$$\sigma_{real} = \sigma_{nominal} \times (1 + \varepsilon_{nominal}) \quad (14)$$

$$\varepsilon_{real} = \ln(1 + \varepsilon_{nominal}), \quad (15)$$

onde σ_{real} é a tensão real antes do *necking point*, ε_{real} é a deformação real e $\varepsilon_{nominal}$ é a deformação nominal. A região após o *necking point* pode ser caracterizada por uma reta linear, de sentido crescente, tangente neste ponto, dada pela equação (16)

$$\sigma_{real} = (a \times \varepsilon_{real}) + b, \quad (16)$$

Onde σ_{real} é a tensão real após o *necking point*, a diz respeito à tensão última real registada no *necking point* ($\sigma_{u,real}$) e a constante b é obtida por aplicação da equação (17)

$$b = \sigma_{u,real} \times (1 - \varepsilon_{u,real}), \quad (17)$$

onde mais uma vez $\sigma_{u,real}$ refere-se à tensão última real registada no *necking point* e $\varepsilon_{u,real}$ ao valor correspondente de deformação real nesse mesmo ponto.

Uma vez definida a curva real para cada material, e visto que os dados foram introduzidos manualmente no Abaqus, houve a necessidade de calcular as propriedades dos materiais associadas aos valores reais. Para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal, utilizou-se o coeficiente de correlação ao quadrado (R^2), incorporado no *Excel*. Visto que a zona elástica é caracterizada por ser linear, foi-se inserindo iterativamente os dados reais de tensão e deformação de cada curva até que o coeficiente de correlação ao quadrado (R^2) desse muito próximo da unidade. Posto isto, retirou-se o módulo de elasticidade longitudinal para cada material, através do declive da reta.

A segunda propriedade a ser determinada foi a tensão de cedência, calculada para uma deformação de 0,2%, adequada quando a transição do regime elástico para o

regime plástico é subtil e indistinguível. Nesta abordagem, o valor da tensão de cedência resulta da interseção de uma reta com o declive igual ao módulo de elasticidade longitudinal do material e deslocada 0,2% em relação à curva real do material, com a própria curva real do material. Esta reta foi determinada, primeiramente, adicionando aos valores das deformações reais o valor do *offset* de 0,2% e, com recurso à lei de Hooke (equação (18)), estimaram-se os valores de tensão correspondentes

$$\sigma = E \times \varepsilon. \quad (18)$$

O último passo relativamente à caracterização dos materiais para a análise estática prendeu-se com a inserção de toda a informação, anteriormente mencionada, no Abaqus. Para a definição do comportamento elástico, é necessário introduzir o módulo de elasticidade longitudinal e o coeficiente de Poisson dos materiais (Figura 183). Este último parâmetro, visto que todos os materiais de estudo das fixações são de PP, utilizou-se um valor de 0,43 [117].

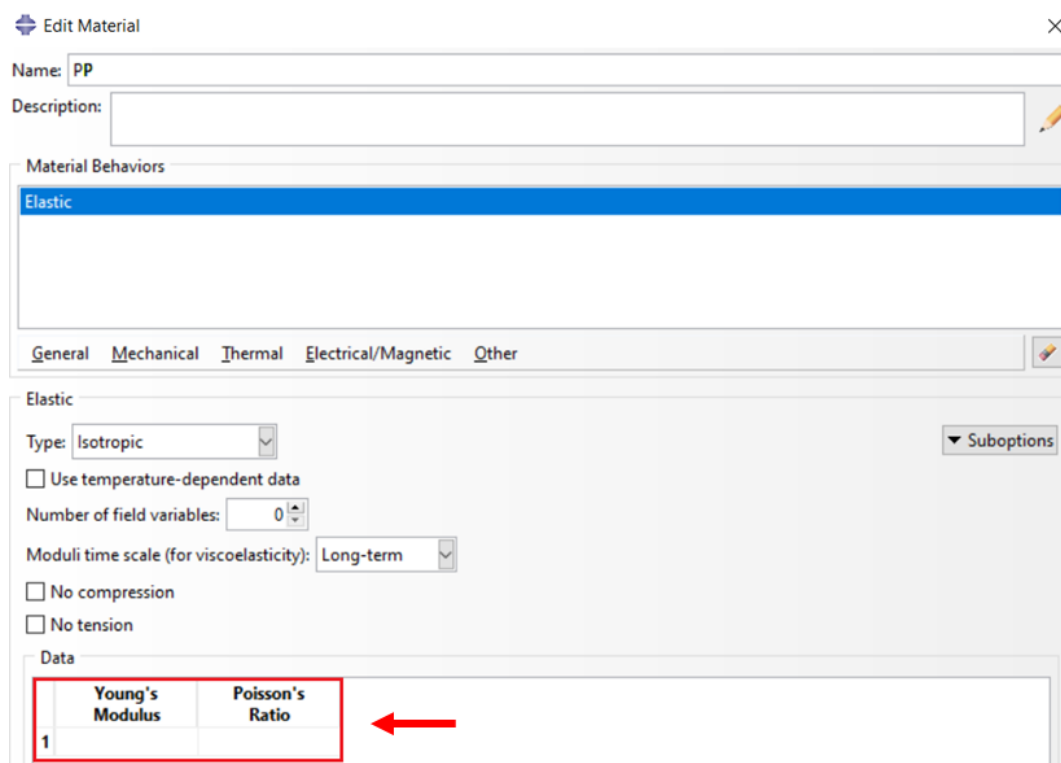


Figura 183 – Janela de introdução do regime elástico dos materiais no *software* Abaqus.

Para a definição do regime plástico no Abaqus, é necessário omitir a zona elástica da curva real do material. Para tal, efetuou-se uma deslocação na curva, através da equação (19)

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{real} - \varepsilon_y, \quad (19)$$

em que a deformação plástica, ε_{pl} , é conseguida a partir da subtração dos valores totais de deformação real, ε_{real} , com o valor de deformação na cedência do material, ε_y . No que toca à introdução desta parte da região no *software*, importa referir que o primeiro ponto deve dizer respeito à tensão de cedência do material e a deformação plástica correspondente deve ser 0, caso contrário o Abaqus não permite que a simulação seja iniciada (Figura 184).

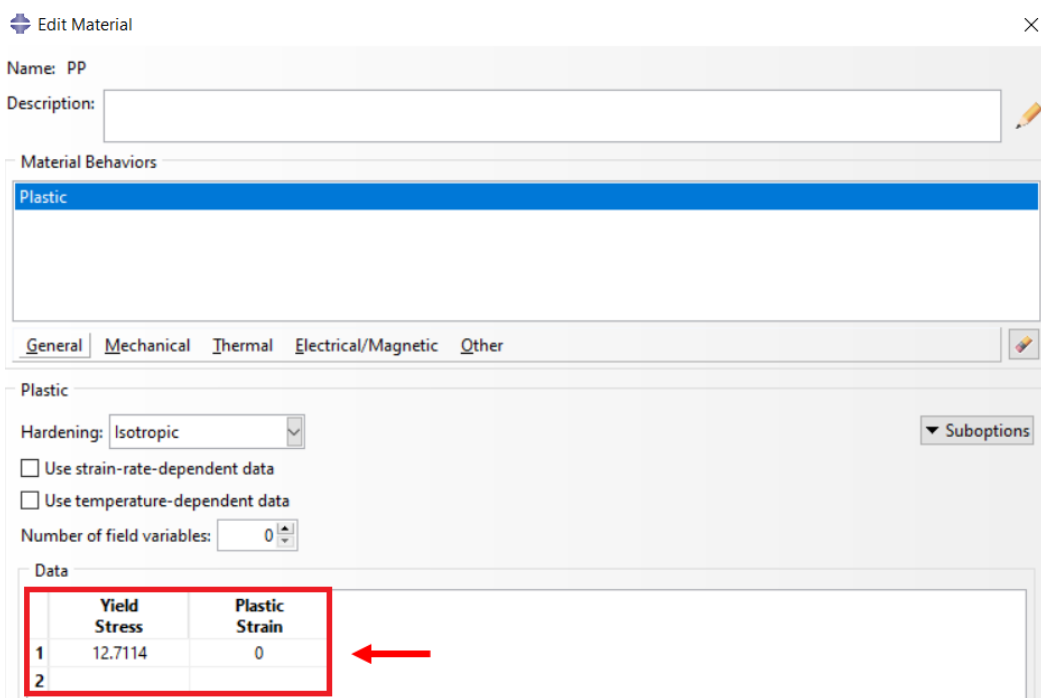


Figura 184 – Janela de introdução do regime plástico dos materiais no *software* Abaqus com referência ao detalhe do primeiro ponto.

3.7.2.1 1ª fixação

Relativamente à 1ª fixação, como referido no capítulo 3.3.1.1, o material que a constitui é um PP, cujas curvas nominais foram fornecidas pela ExxonMobil, resultantes do ensaio uniaxial de tração em cinco provetes, segundo a norma ISO 527, e são seguidamente apresentadas na Figura 185.

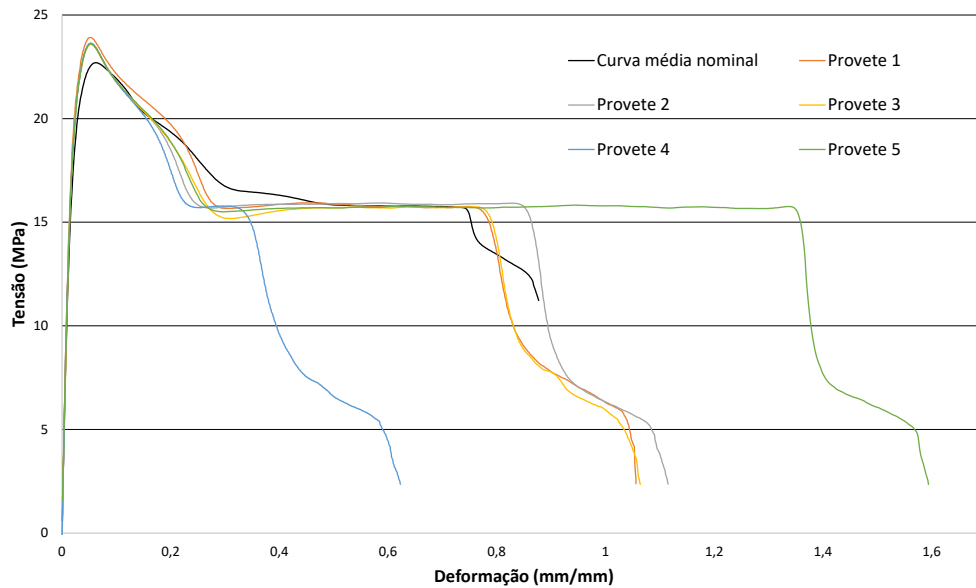


Figura 185 - Curvas nominais do material Exxtral CNU011.

A conversão da curva de tensão/deformação média nominal da Figura 185 para a curva de tensão/deformação real foi feita com recurso à aplicação das equações (14) a (17), mencionadas na introdução do presente capítulo. Na Figura 186 demonstra-se a curva nominal e a curva real resultante da conversão.

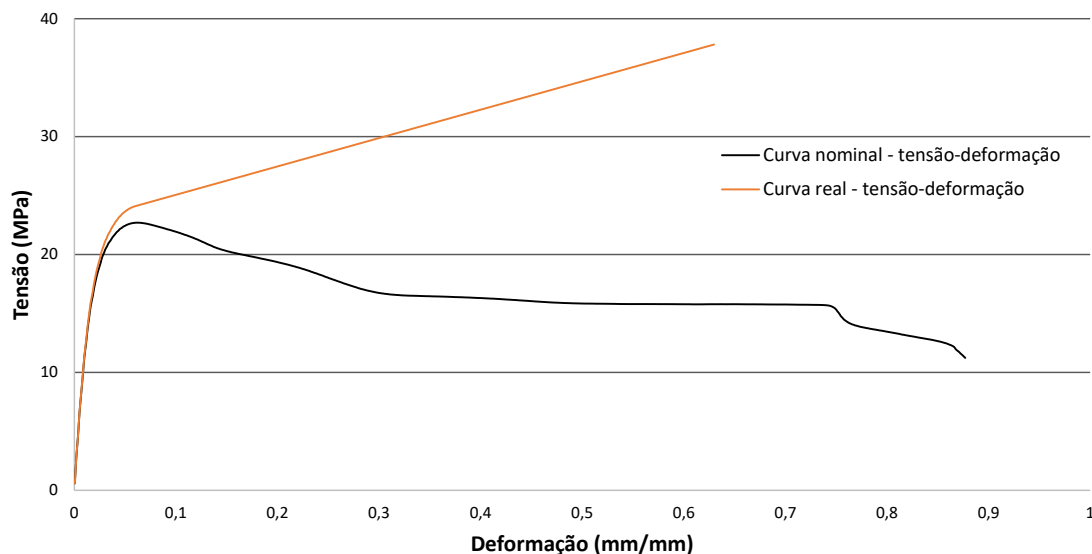


Figura 186 - Conversão da curva média nominal para a curva real do material Exxtral CNU011.

A partir da curva real, seguiu-se o cálculo do módulo de elasticidade longitudinal do material a partir do procedimento explicado no capítulo 3.7.2. O melhor coeficiente de correlação ao quadrado (R^2) conseguido com os dados de tensão e deformação inseridos foi de 0,9966, o que se traduz num módulo de elasticidade longitudinal de 1289,9 MPa (Figura 187).

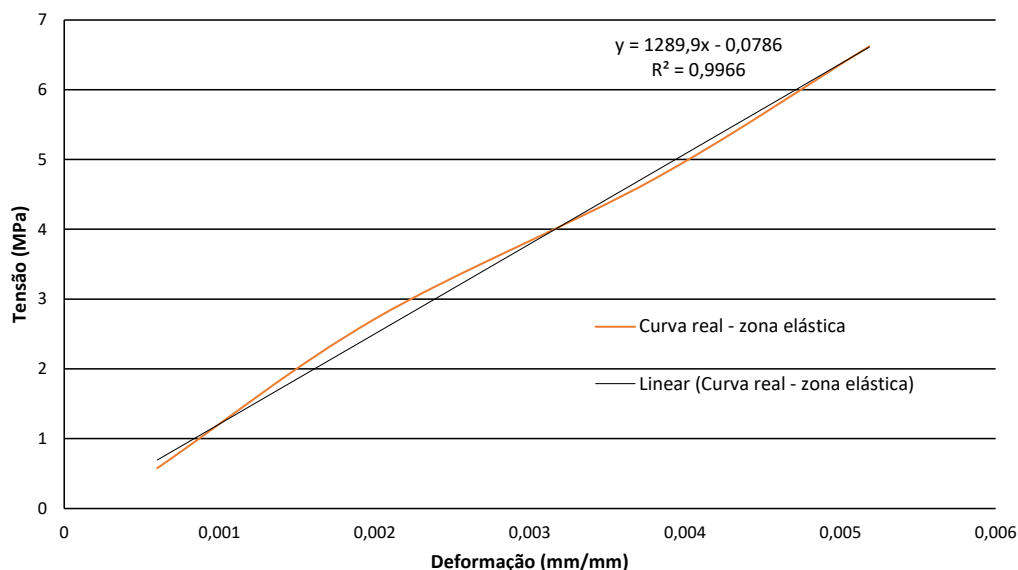


Figura 187 – Determinação do módulo de elasticidade longitudinal do material Exxtral CNU011 com base nos dados reais.

Em relação ao cálculo da tensão de cedência, aplicando o *offset* de 0,2%, obtém-se uma reta linear que intersesta a curva real para um valor de tensão de 12,71 MPa e um valor de deformação correspondente de 0,01173 (Figura 188).

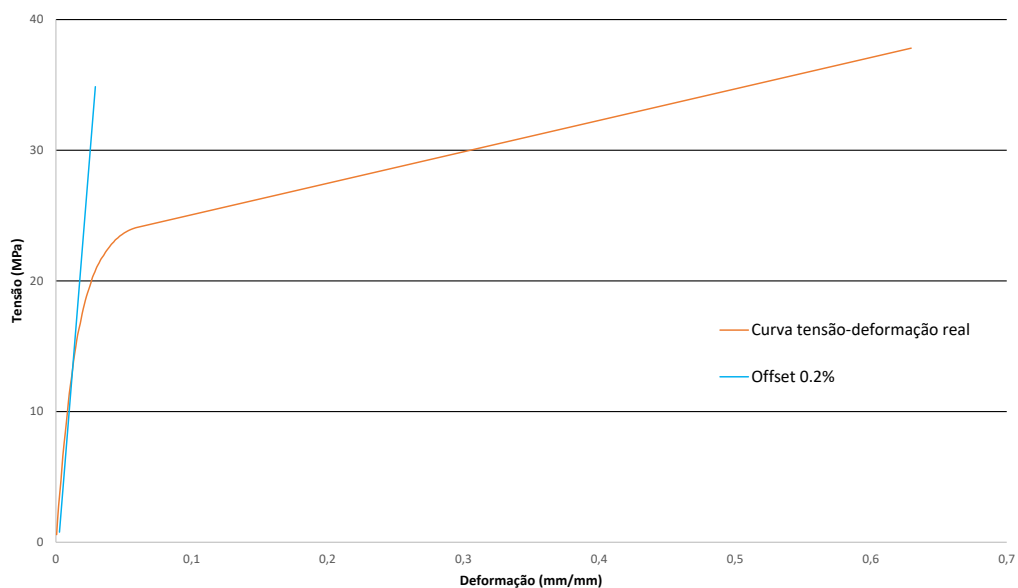


Figura 188 - Cálculo da tensão de cedência do material Exxtral CNU011.

Introduziram-se, por fim, os valores referentes à região elástica e à plástica no Abaqus (Figura 189), esta última com recurso à aplicação da equação (19).

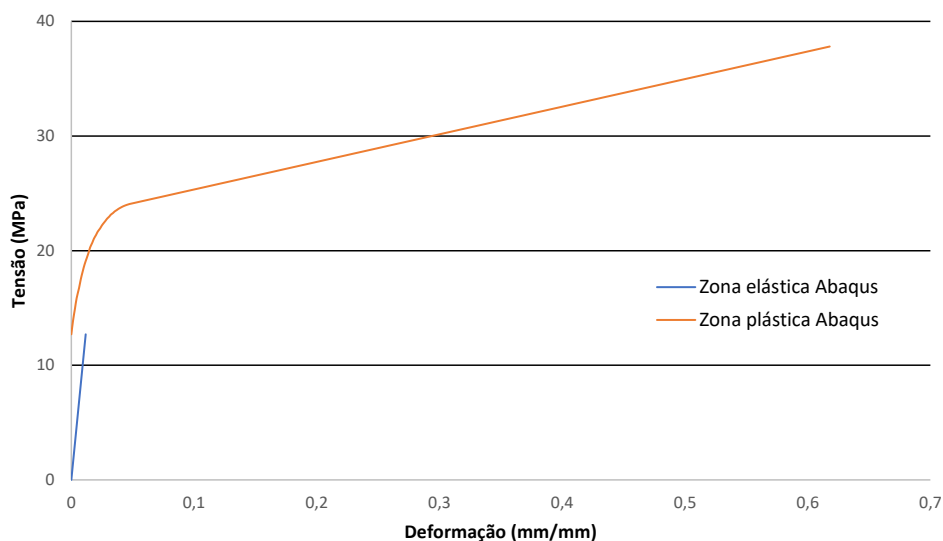


Figura 189 – Introdução da zona elástica e plástica do material Exxtral CNU011 no Abaqus.

Comparando as propriedades do material, mencionadas na ficha técnica do fabricante (Anexo1), com as calculadas neste subcapítulo, é possível verificar que em termos de módulo de elasticidade longitudinal a diferença é reduzida, o que acaba por fazer sentido uma vez que esta propriedade é intrínseca ao material, independentemente da forma de cálculo. No entanto, no que toca à tensão de cedência, o valor calculado é aproximadamente metade do especificado na ficha técnica. Este último valor corrobora o que é dito na ficha técnica e que diz que os dados das propriedades típicas não devem ser utilizados como especificação. Além disso, e visualizando a curva real de tensão deformação da Figura 186, é possível concluir que um valor de 24 MPa constitui um valor bastante otimista. Muito provavelmente o material não conseguiria recuperar totalmente toda a sua elasticidade nestas gamas de valores, contrariamente ao valor calculado, que por se estar a ser conservativo pode ser utilizado como margem de segurança aquando da utilização deste valor nos critérios de falha. Na Tabela 24 apresentam-se as principais diferenças entre os valores calculados e os mencionados na ficha técnica para as propriedades do material.

Tabela 24 - Comparação das propriedades da ficha técnica e as calculadas para o material Exxtral CNU011.

	Módulo de elasticidade longitudinal (MPa)	Tensão de cedência (MPa)	Deformação na cedência (%)	Margem de segurança
Ficha técnica	1200,00	24,00	5,20	-
Propriedades calculadas	1289,90	12,71	1,17	1,88

3.7.2.2 2ª fixação

No que diz respeito à 2ª fixação, o processo de caracterização do material é exatamente igual ao explicado para o material da 1ª fixação. Como referido no capítulo 3.3.1.2, o material que compõe a 2ª fixação é também um PP (Exxtral CMV101A). A curva nominal foi fornecida pela ExxonMobil, resultante do ensaio uniaxial de tração segundo a norma ISO 527, e é seguidamente apresentada na Figura 190.

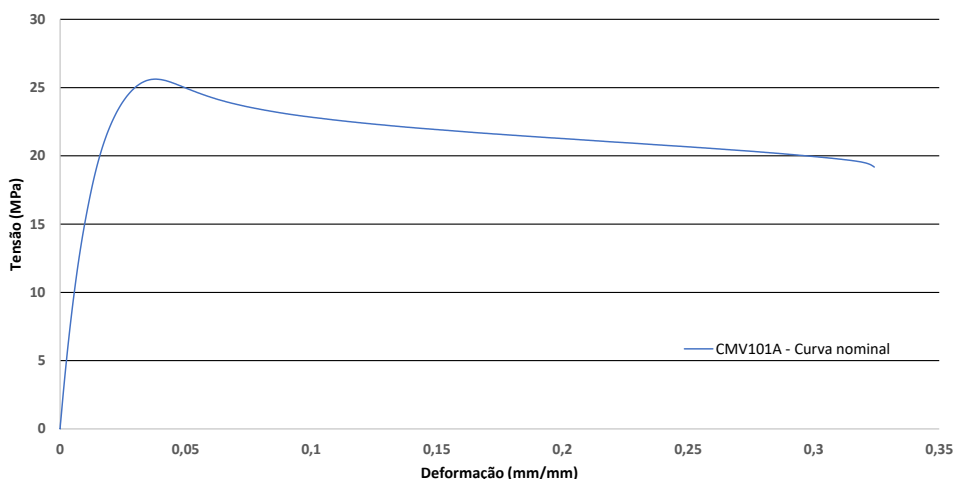


Figura 190 - Curva nominal do material Exxtral CMV101A.

A conversão da curva de tensão/deformação nominal da Figura 190 para a curva de tensão/deformação real, foi realizada de igual forma através da aplicação das equações (14) a (17), mencionadas no capítulo 3.7.2. Na Figura 191 demonstra-se a curva nominal e a curva real resultante da conversão.

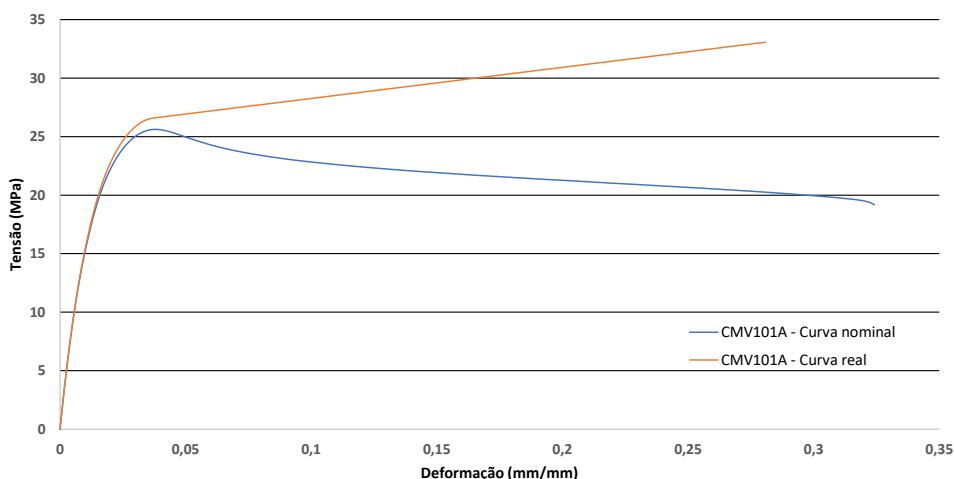


Figura 191 – Curvas de tensão/deformação nominal e real do material Exxtral CMV101A.

Para o cálculo do módulo de elasticidade longitudinal do material, o melhor coeficiente de correlação ao quadrado (R^2) atingido com os dados de tensão e deformação

inseridos foi de 0,9991, o que se traduz num módulo de elasticidade longitudinal de 1942,3 MPa (Figura 192).

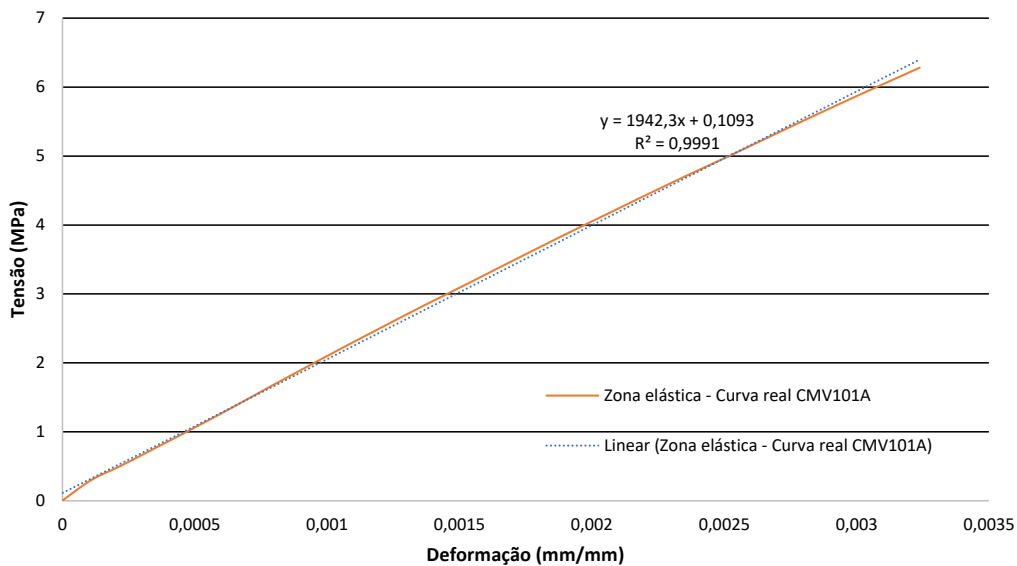


Figura 192 - Determinação do módulo de elasticidade longitudinal do material Exxtral CMV101A com base nos dados reais.

Em relação ao cálculo da tensão de cedência, aplicado o *offset* de 0,2%, obtém-se uma reta linear que intersesta a curva real para um valor de tensão de 15,29 MPa e um valor de deformação correspondente de 0,00986 (Figura 193).

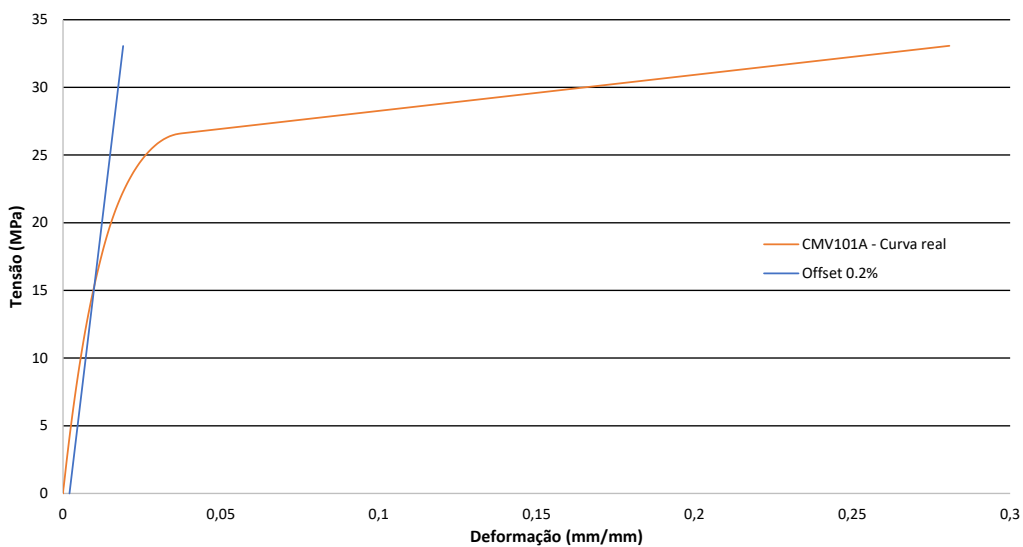


Figura 193 - Cálculo da tensão de cedência do material Exxtral CMV101A.

Introduziram-se, por fim, os valores referentes à região elástica e à plástica no Abaqus (Figura 194), esta última com recurso à aplicação da equação (19).

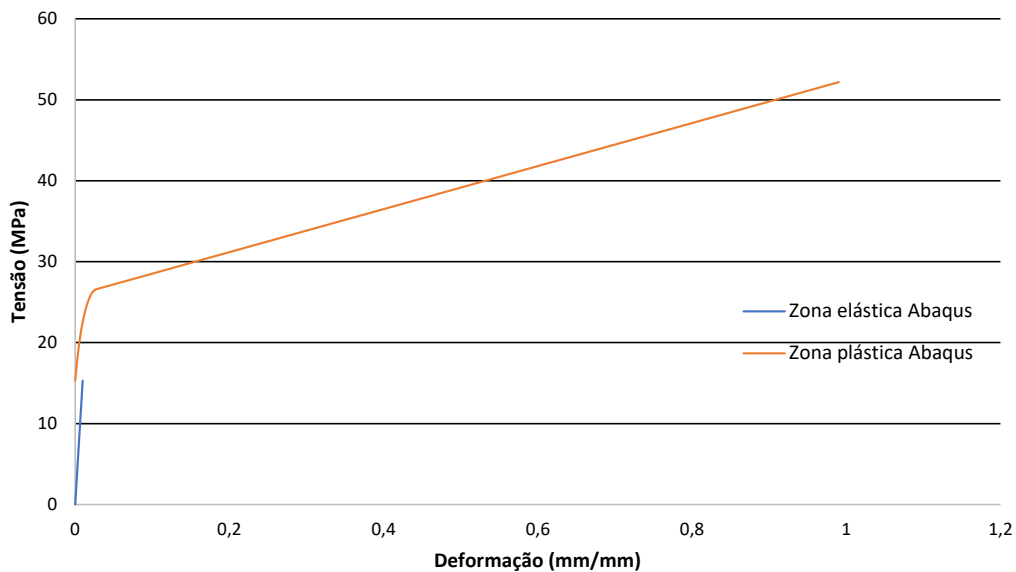


Figura 194 - Introdução da zona elástica e plástica do material Exxtral CMV101A no Abaqus.

Mais uma vez, comparando as propriedades estabelecidas na ficha técnica do material (Anexo2), é notória uma diferença mínima nos valores do módulo de elasticidade longitudinal e uma discrepância nos valores da tensão de cedência calculados de aproximadamente o dobro dos registados na ficha técnica. A Tabela 25 resume as principais diferenças para as propriedades calculadas, referidas ao longo do subcapítulo, e as propriedades na ficha técnica.

Tabela 25 - Comparação das propriedades da ficha técnica e as calculadas para o material Exxtral CMV101A.

	Módulo de elasticidade longitudinal (MPa)	Tensão de cedência (MPa)	Deformação na cedência (%)	Margem de segurança
Ficha técnica	1890,00	25,60	3,60	-
Propriedades calculadas	1942,30	15,29	0,99	1,67

3.7.2.3 3ª fixação

O material que compõe a 3ª fixação é também um PP (Hostakom EKC330N), cuja curva nominal foi fornecida pela LyondellBasell, resultante do ensaio uniaxial de tração à temperatura ambiente, segundo a norma ISO 527 (Figura 195).

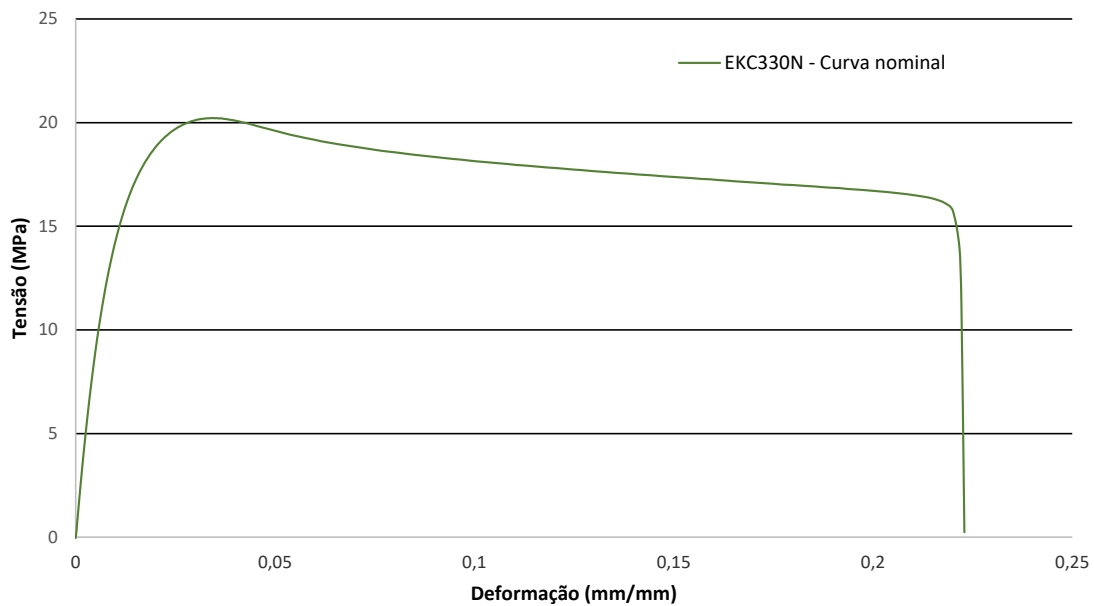


Figura 195 - Curva nominal do material Hostakom EKC330N.

Para a respetiva conversão da curva nominal (Figura 195) na curva real, foram utilizadas as equações (14) a (17) já mencionadas no capítulo 3.7.2. Na Figura 196 demonstra-se a curva real resultante dessa conversão.

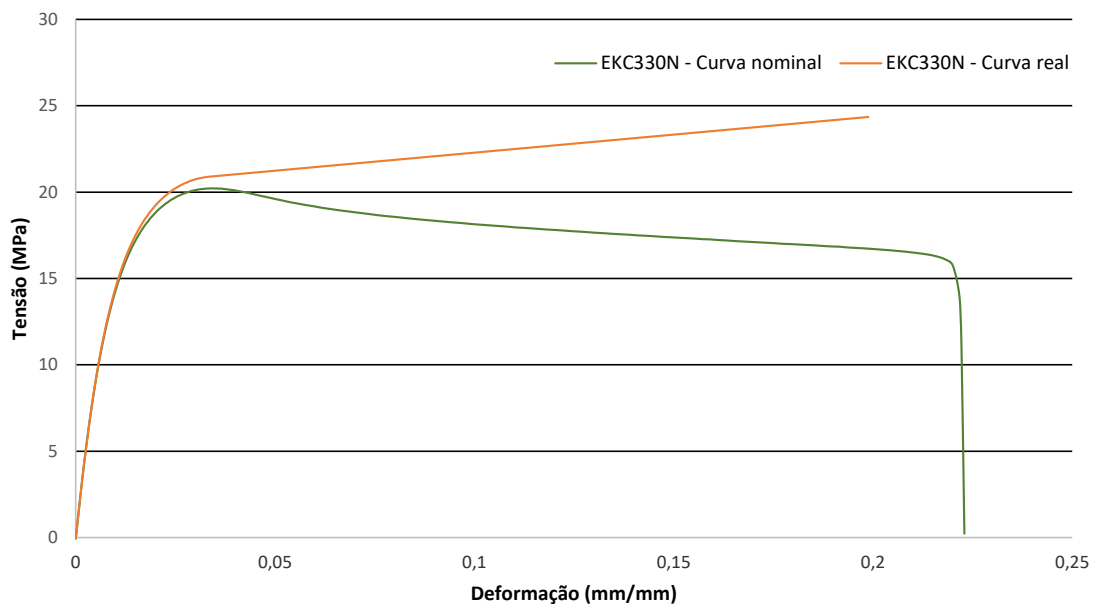


Figura 196 - Curvas de tensão/deformação nominal e real do material Hostakom EKC330N.

Para o cálculo do módulo de elasticidade longitudinal, o melhor coeficiente de correlação ao quadrado (R^2), alcançado com os dados de tensão e deformação inseridos, foi 0,9999, o que se traduz num módulo de elasticidade de 2080,4 MPa (Figura 192).

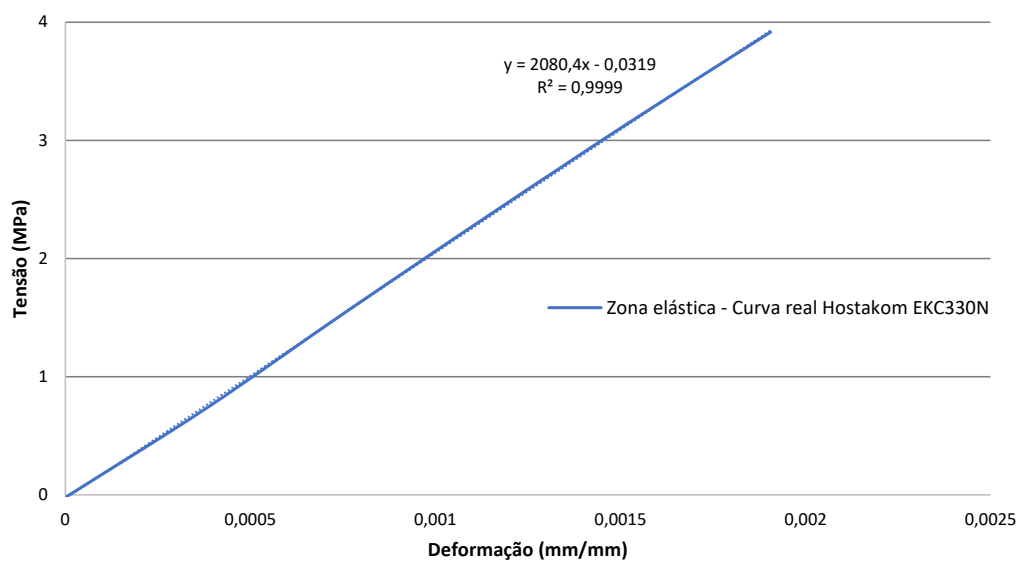


Figura 197 - Determinação do módulo de elasticidade do material Hostakom EKC330N com base nos dados reais.

A tensão de cedência calculada foi 12,83 MPa e o valor de deformação neste ponto foi aproximadamente 0,00816 (Figura 198).

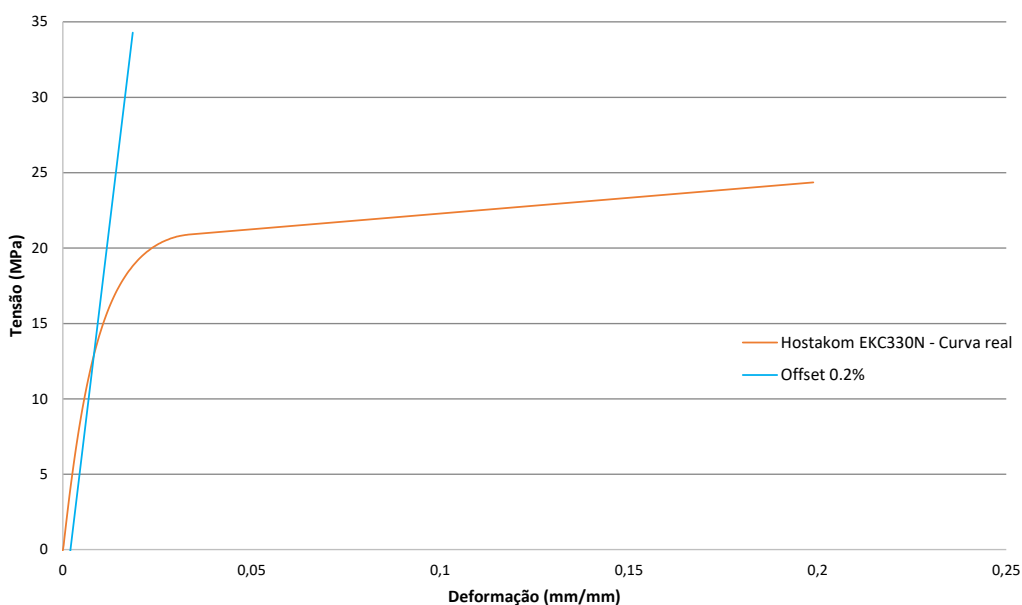


Figura 198 - Cálculo da tensão de cedência do material Hostakom EKC330N.

Por fim, introduziram-se os respetivos valores referentes à região elástica e à plástica no Abaqus (Figura 199), esta última com recurso à aplicação da equação (19).

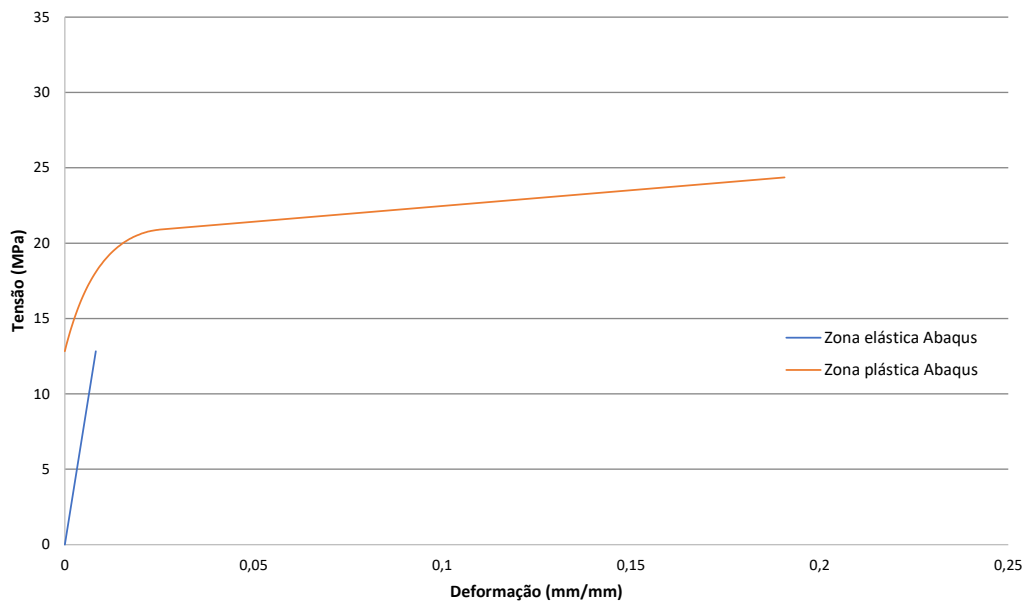


Figura 199 - Introdução da zona elástica e plástica do material Hostakom EKC330N no Abaqus.

No seguimento do procedimento adotado até à presente fixação, de seguida realiza-se na Tabela 26 a respetiva comparação entre os valores calculados das propriedades e os especificados na ficha técnica do material (Anexo3).

Tabela 26 - Comparação das propriedades da ficha técnica e as calculadas para o material Hostakom EKC330N.

	Módulo de elasticidade longitudinal (MPa)	Tensão de cedência (MPa)	Deformação na cedência (%)	Margem de segurança
Ficha técnica	1990,00	21,00	3,40	-
Propriedades calculadas	2080,40	12,83	0,82	1,60

3.7.3 Convergência de malha

Neste subcapítulo pretende-se validar os tamanhos das malhas utilizadas nos modelos de estudo, mais concretamente para os modelos sólidos. Relativamente ao modelo em superfícies da 1ª fixação, visto que este foi preparado num *software* à parte e posteriormente importado no Abaqus, definiu-se logo à partida que o tamanho de aresta deve ser idêntico ao definido para o modelo sólido. Optou-se por este procedimento para evitar a repetição de todo o processo de preparação do modelo por cada novo tamanho de malha gerado. Tendo em consideração o estudo de convergência de malha para o modelo sólido, visto que a solicitação consiste num

deslocamento, o estudo de convergência foi realizado a nível de tensões para um nó arbitrado da malha gerada na geometria [114]. Importa referir que o nó seleccionado não deve estar compreendido numa zona de singularidades numéricas, com risco de o estudo ficar comprometido. Considera-se que uma diferença percentual abaixo dos 10% para a tensão entre malhas consecutivas conduz à convergência pretendida. Para o cálculo do erro relativo aplicou-se a equação (20)

$$\text{Erro relativo (\%)} = \frac{|a - b|}{b} \times 100, \quad (20)$$

onde a diz respeito à tensão registada para o tamanho atual, de entre dois estudados, e b refere-se ao valor de tensão registado para o tamanho anterior de malha.

3.7.3.1 1ª fixação

Para o modelo sólido da 1ª fixação, escolheu-se primeiramente um nó da malha para realizar o estudo de convergência de malha (Figura 200).

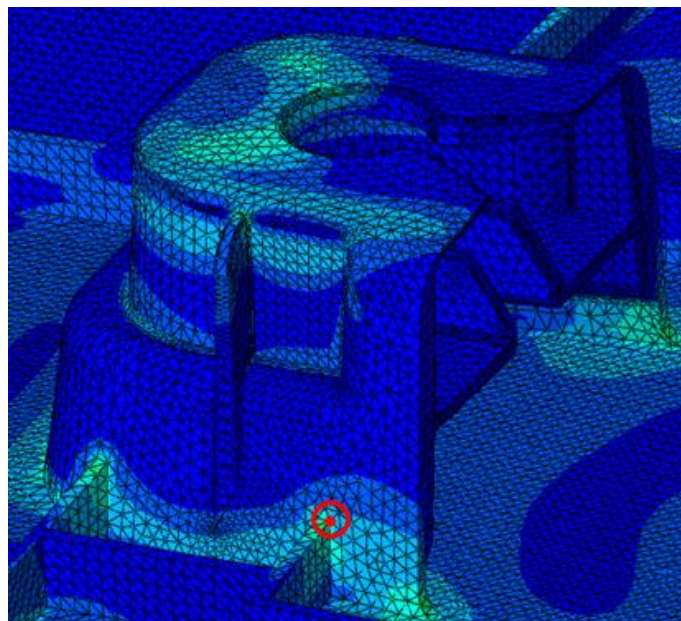


Figura 200 – Nó seleccionado para estudo de convergência de malha no modelo sólido da 1ª fixação.

Os valores de tensão no nó identificado na Figura 200, para as diferentes malhas utilizadas, foram adquiridos para um valor de força de 200 N, valor esse à qual a 1ª fixação deve aguentar, segundo a direção do ensaio de arrancamento. Retiraram-se deste modo os diferentes valores de tensão de von Mises para as diferentes dimensões de malha geradas modelo (Figura 201).

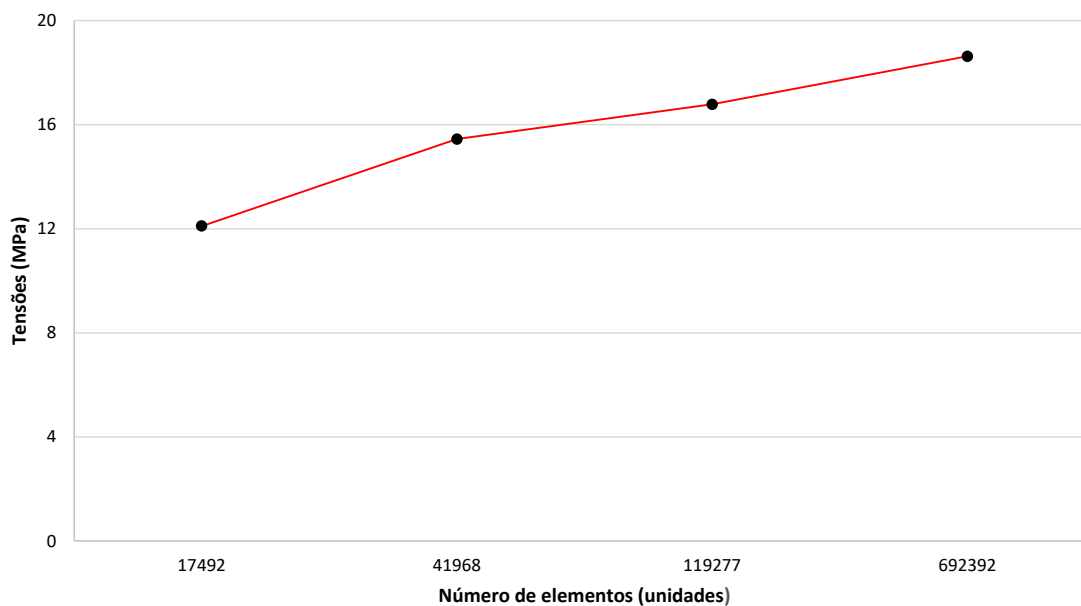


Figura 201 - Estudo de convergência de malha relativo às tensões para o nó definido para estudo no modelo sólido da 1ª fixação.

Na Tabela 27 apresenta-se a variação da variação percentual, após aplicada a equação (20), entre os diferentes tamanhos de malha estudados.

Tabela 27 – Diferenças percentuais entre os diferentes tamanhos de malha estudados para o modelo sólido da 1ª fixação.

Tamanho de malha	Nº de elementos	Tensões (MPa)	Diferença percentual (%)
5 mm	17492	12,11	27,62
3 mm	41968	15,45	8,64
2 mm	119277	16,78	11,01
1 mm	692392	18,63	

Apesar de visualmente o erro relativo ter tendência crescente a partir dos 42000 elementos (Figura 201), denota-se que esta variação ronda os 10% para um tamanho de malha de 1 mm de aresta (Tabela 27). Salienta-se ainda que para 1 mm de malha o número de elementos gerados no modelo é de aproximadamente 692000 elementos. Tendo em conta as dimensões do modelo, optou-se por um tamanho de malha de 1 mm de aresta.

3.7.3.2 2ª fixação

Para o modelo sólido da 2ª fixação, escolheu-se primeiramente um nó da malha para realizar o estudo de convergência de malha (Figura 202).

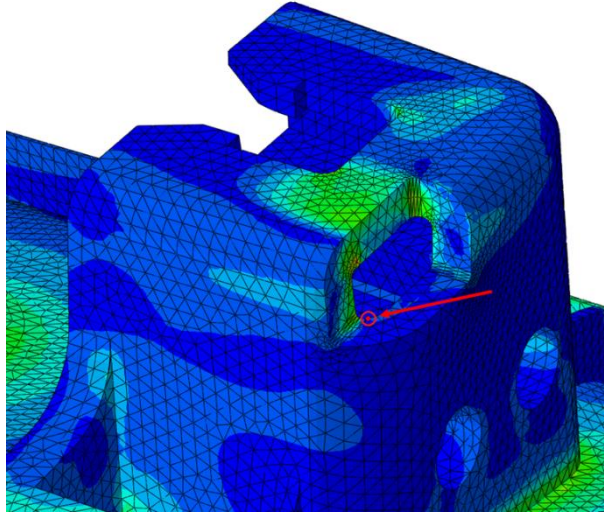


Figura 202 - Nó selecionado para estudo de convergência de malha no modelo sólido da 2ª fixação.

Os valores de tensão de Von Mises no nó identificado na Figura 202, para as diferentes malhas utilizadas, foram adquiridos para um valor de força de 200 N, valor esse à qual a 2ª fixação deve aguentar, segundo a direção do ensaio de arrancamento. Retiraram-se deste modo os diferentes valores de tensão de Von Mises para as diferentes dimensões de malha geradas no modelo (Figura 203).

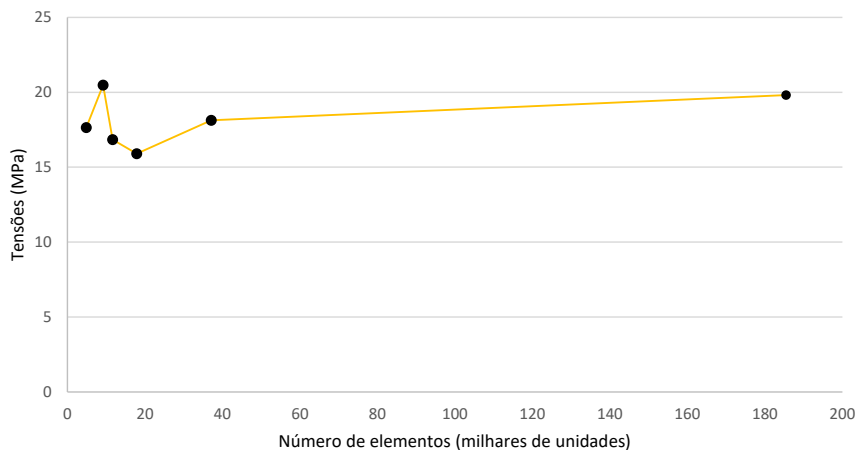


Figura 203 - Estudo de convergência de malha relativo às tensões de Von Mises para o nó definido para estudo no modelo sólido da 2ª fixação.

Na Tabela 28 apresenta-se a variação da diferença percentual aplicada a equação (20), localizada na introdução do capítulo, entre os diferentes tamanhos de malha estudados.

Tabela 28 – Diferença percentual entre os diferentes tamanhos de malha estudados para o modelo sólido da 2ª fixação.

Tamanho de malha	Nº de elementos	Tensões (MPa)	Diferença percentual (%)
10 mm	4837	17,64	16,10
5 mm	9180	20,49	
4 mm	11654	16,84	17,79
3 mm	17869	15,89	5,62
2 mm	37089	18,13	14,06
1 mm	185525	19,81	9,27

Através da análise do gráfico apresentado na Figura 203, visualmente verifica-se que a curva tende a convergir a partir dos 40000 elementos gerados no modelo. Este facto é validado pelo que se observa na Tabela 28, onde se constata que a diferença relativa diminui dos 14% para os 9% para os respetivos tamanhos de malha utilizados de 2 mm (37089 elementos) e 1 mm (185525 elementos). Pelo que se definiu na introdução do capítulo (um erro percentual abaixo dos 10% considerou-se a malha convergida), optou-se pela utilização de uma malha tetraédrica de 1 mm de aresta.

3.7.3.3 3ª fixação

O mesmo procedimento foi adotado para a 3ª fixação, onde se selecionou um nó da malha para realizar o estudo de convergência (Figura 204).

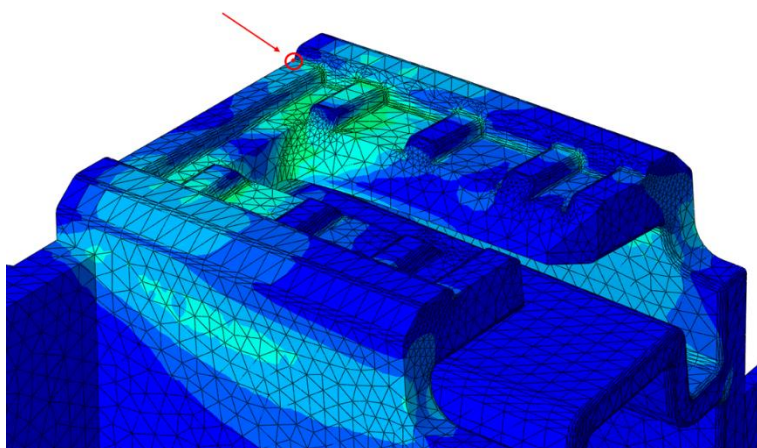


Figura 204 – Nó selecionado para estudo de convergência de malha no modelo sólido da 3ª fixação.

Os valores de tensão no nó identificado na Figura 204, para as diferentes malhas utilizadas, foram adquiridos para um valor de força de 400 N, valor esse à qual a 3ª fixação deve aguentar, segundo a direção do ensaio de arrancamento. Retiraram-se deste modo os diferentes valores de tensão para as diferentes dimensões de malha geradas no modelo (Figura 205).

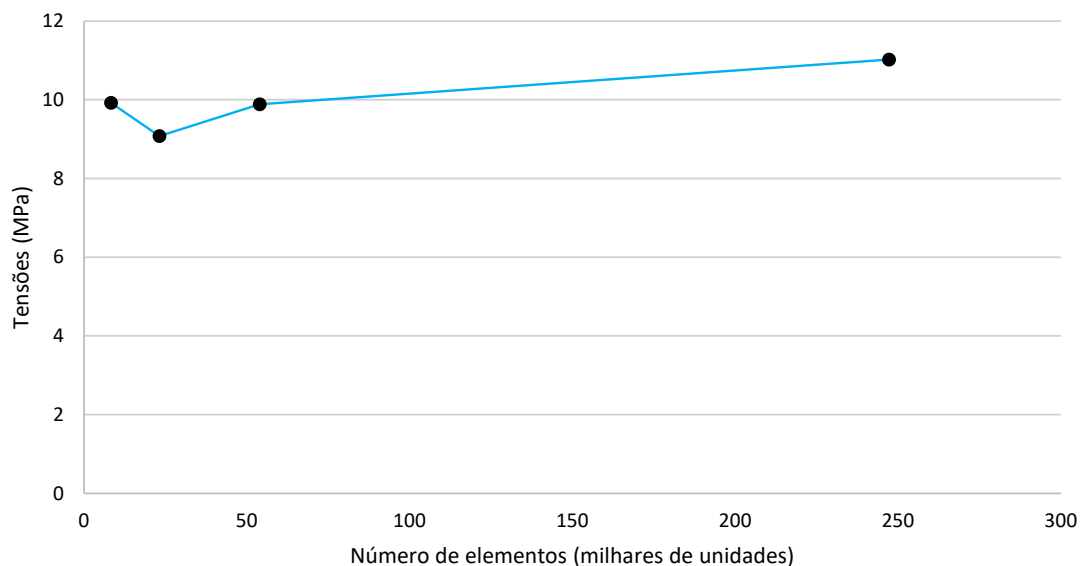


Figura 205 - Estudo de convergência de malha relativo às tensões para o nó definido para estudo no modelo sólido da 3ª fixação.

Na Tabela 29 apresenta-se a variação da diferença percentual aplicada a equação (20), localizada na introdução do capítulo, entre os diferentes tamanhos de malha estudados.

Tabela 29 – Diferença percentual entre os diferentes tamanhos de malha estudados para o modelo sólido da 3ª fixação.

Tamanho de malha	Nº de elementos (unidades)	Tensões (MPa)	Diferença percentual (%)
8 mm	8261	9,92	8,50
3 mm	23143	9,77	
2 mm	53927	9,89	8,96
1 mm	247237	11,02	11,43

Com base no gráfico observado da Figura 205 e dos dados provenientes da Tabela 29, optou-se por um tamanho de malha de 1 mm com um erro relativo associado de aproximadamente 10%.

3.7.4 Resultados obtidos e comparação com os ensaios experimentais

Este capítulo pretende apresentar os resultados obtidos das simulações numéricas e fazer a respetiva correlação com os resultados provenientes dos ensaios experimentais, já apresentados no capítulo 3.6.3.

Algumas particularidades consideradas ao longo do capítulo começam por ser esclarecidas nesta parte introdutória. Iniciou-se esta fase do projeto pela aplicação de um fator de folga de 0,5 às curvas obtidas dos ensaios físicos e apresentadas no capítulo 3.6.3 para salvaguardar eventuais folgas que a máquina de ensaios universal possa apresentar e que afetam os resultados, nomeadamente a nível de rigidez dos modelos de estudo. Este fator foi aplicado a cada deslocamento ($x(i)$), adquirido pelo *software* de aquisição de dados, através da equação (21). As forças de reação mantiveram-se inalteráveis.

$$x(f)(mm) = (x(i) \times 0,5), \quad (21)$$

onde $x(f)$ refere-se aos deslocamentos adquiridos para cada instante já com o fator de folga de 0,5 incluído. Por conseguinte, os novos gráficos força *versus* deslocamento foram traçados para cada fixação e posição de estudo.

Outra das particularidades que importa esclarecer nesta parte do documento prende-se com a metodologia empregue para perceber a discrepância de resultados entre o real e a teoria. Na maior parte das situações, as simulações numéricas não foram levadas até ao ponto de rotura registado nos ensaios físicos (por motivos de não convergência), o que não constitui um problema desde que as forças exigidas no caderno de encargos por parte dos clientes em relação à resistência que as fixações devem suportar (consultar capítulo 3.4) sejam garantidas para posterior avaliação da geometria das fixações. Idealmente, quanto mais do comportamento da simulação se conhecer melhor para fazer as comparações com a realidade. É neste sentido que se utilizaram-se duas abordagens para fazer as correlações: através do declive e da força máxima. Para melhor compreensão do leitor, apresenta-se um exemplo tipo na Figura 206.

No exemplo da Figura 206 observam-se duas curvas força *versus* deslocamento dos ensaios físicos realizados nas posições de estudo 1 e 2 (curva azul e curva laranja) e a curva da simulação numérica. A curva de referência será sempre a numérica e a partir desta terá origem dois patamares. O primeiro patamar é separado por uma linha vertical traçada no ponto de deslocamento correspondente à força exigida pelo cliente para a resistência da fixação na direção de ensaio (neste exemplo esse ponto está distinguido a cor verde sobre a linha do primeiro patamar, o que corresponde ao deslocamento para a força de 200 N na curva na simulação numérica). O segundo patamar nasce da linha vertical traçada a partir do deslocamento correspondente para

a força máxima registada na simulação numérica (neste exemplo esse deslocamento está distinguido com um ponto a cor verde sobre a linha do segundo patamar).

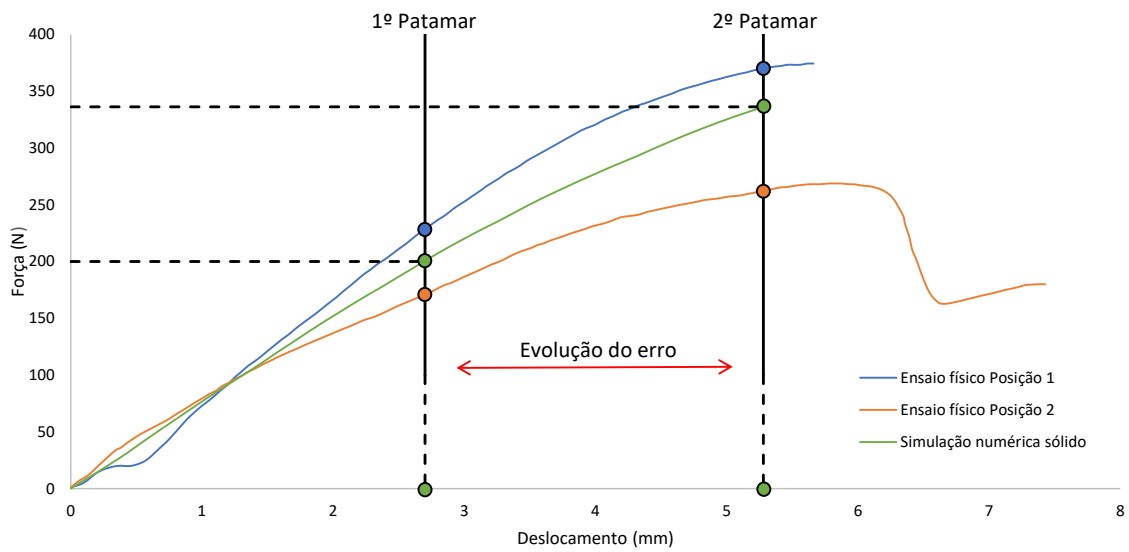


Figura 206 – Exemplo descritivo da metodologia utilizada para efetuar as correlações.

Nesta altura procede-se à restrição das curvas ao primeiro patamar para aplicação das duas abordagens (Figura 207).

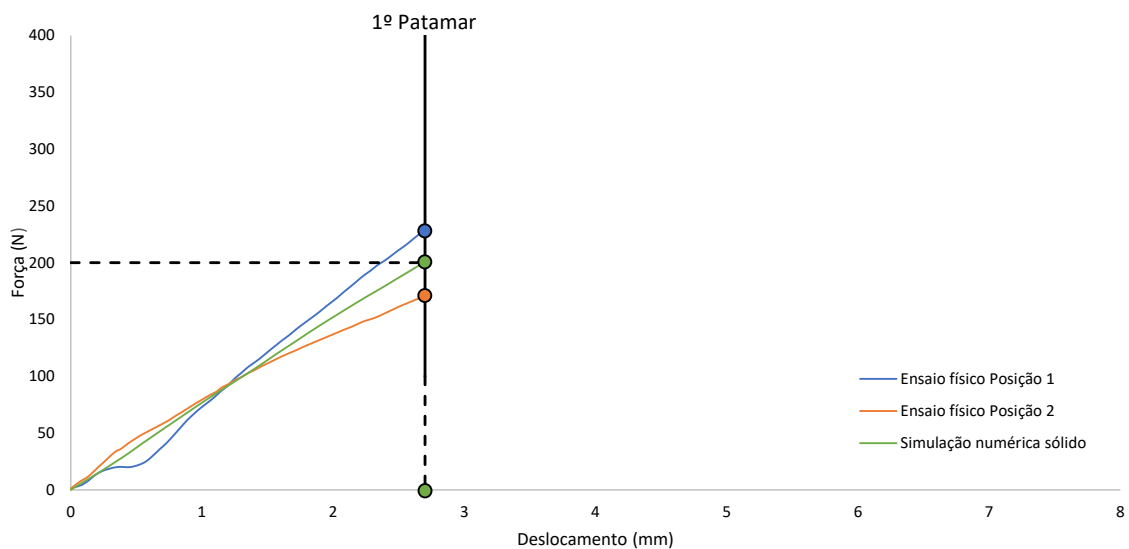


Figura 207 - Restrição das curvas ao 1º patamar.

Com recurso ao *Excel* obtêm-se os declives das curvas neste patamar, por meio das equações das linhas de tendência (Figura 208).

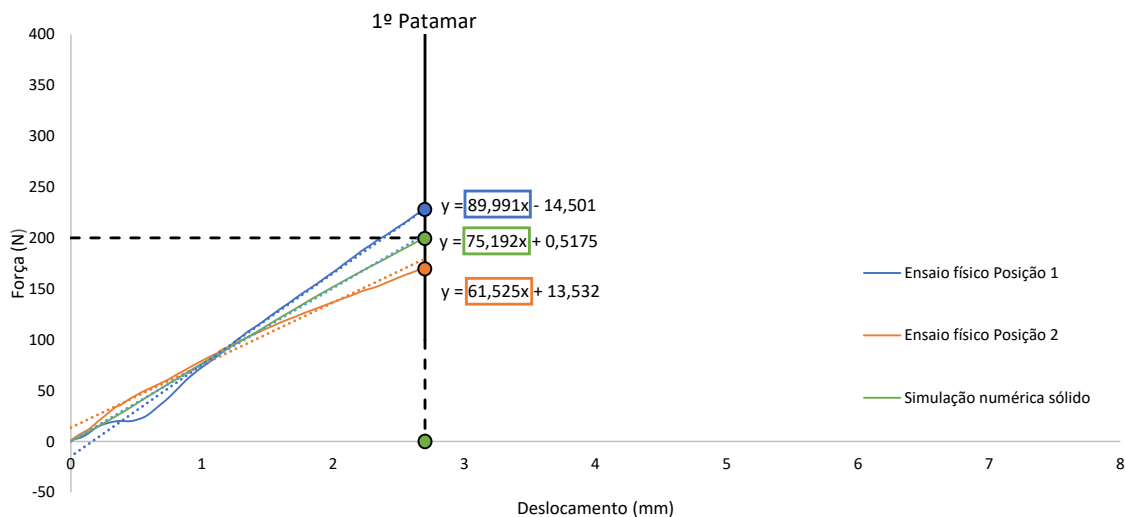


Figura 208 - Obtenção dos declives das curvas no primeiro patamar.

O erro relativo é posteriormente calculado através da equação (22),

$$\text{Erro relativo (\%)} = \left| \frac{Kp - Ks}{Kp} \right| \times 100, \quad (22)$$

onde Kp é a média dos declives das curvas dos ensaios físicos no primeiro patamar e Ks o declive da curva da simulação numérica no primeiro patamar. O cálculo do erro relativo pelas forças máximas (segunda abordagem) é obtido através da equação (23).

$$\text{Erro relativo (\%)} = \left| \frac{Fp - Fs}{Fp} \right| \times 100, \quad (23)$$

onde Fp diz respeito à média das forças dos ensaios físicos obtidas nos pontos sobre a linha vertical do primeiro patamar (pontos a cor azul e laranja no exemplo da Figura 207) e Fs à força estabelecida pelo cliente para a resistência das fixações (no exemplo tipo a força é de 200 N).

No que toca ao segundo patamar, o raciocínio é o mesmo, onde se restringem as curvas até essa zona (Figura 209). A obtenção do erro relativo pela abordagem dos declives é igual à explicada para o primeiro patamar e pode ser revista na Figura 208 e calculada pela equação (22). O cálculo do erro relativo pelas forças máximas (segunda abordagem) é igualmente calculado pela equação (23), com única diferença a ter lugar na força registada para a simulação numérica, Fs , que para o 1º patamar dizia respeito à força estipulada pelo cliente, e no 2º patamar refere-se à força máxima conseguida na simulação numérica. Através desta metodologia consegue-se ter uma perceção do erro em duas zonas de interesse diferentes e a forma como este evolui entre ambas.

Na maioria das análises estruturais um erro até os 10% é aceitável e foi esse o alvo a atingir nas simulações numéricas apresentadas nos subcapítulos seguintes.

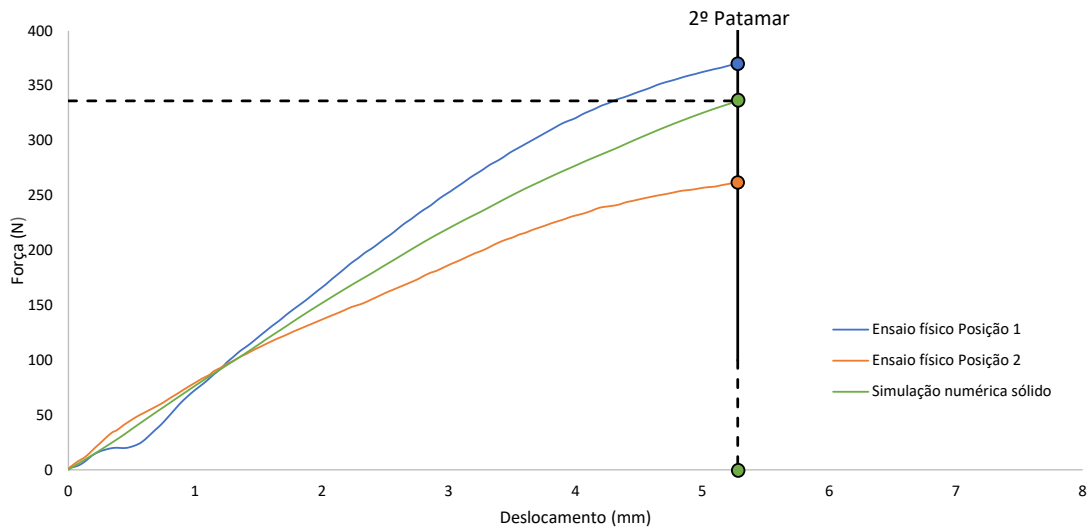


Figura 209 - Restrição das curvas ao 2º patamar.

3.7.4.1 1ª fixação

Neste primeiro subcapítulo referente à 1ª fixação são expostos os resultados provenientes das simulações dos modelos em superfícies e em sólidos. No que diz respeito à simulação na direção do arrancamento, através da aplicação da equação (21) aos dados adquiridos nos ensaios físicos apresentados na Figura 77 do capítulo 3.6.3.1, obteve-se primeiramente as curvas forças *versus* deslocamento com o fator de folga de 0,5 incluído. Após conhecidos os resultados das simulações na direção ao arrancamento, em ambos os modelos, reúne-se na Figura 210 as curvas dos ensaios físicos e numéricos.

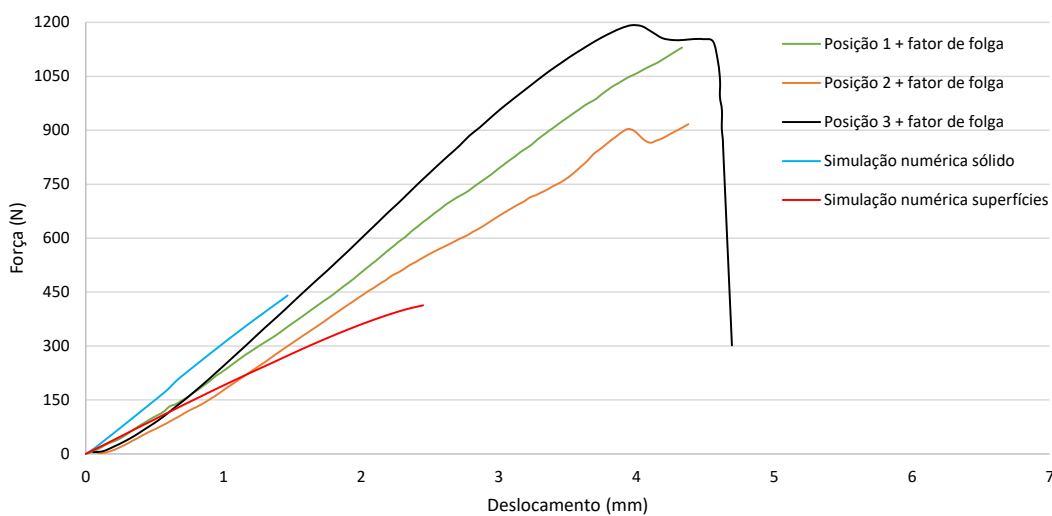


Figura 210 – Curvas força *versus* deslocamento resultantes dos ensaios físicos e das simulações numéricas para a 1ª fixação segundo a direção de ensaio ao arrancamento.

Visualmente, verifica-se na Figura 210 que a curva da simulação numérica do modelo em superfícies (distinguível a cor vermelha) apresenta rigidez inferior às três curvas dos ensaios físicos, contrariamente à curva da simulação do modelo sólido (distinguível a cor azul) que apresenta rigidez ligeiramente superior. Ambas as simulações começam a não convergir para valores semelhantes de força, compreendidos entre os 400 N e os 450 N. Nesta fase procedeu-se à correlação com as curvas experimentais pelo processo explicado na introdução do capítulo. Na Tabela 30 agrupam-se todos os dados necessários para a correlação no primeiro patamar.

Tabela 30 – Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 1º patamar da 1ª fixação na direção de ensaio ao arrancamento.

1º Patamar (Deslocamento = 0,65 mm Força = 200 N)				
	Declive (N/mm)	K_p (N/mm)	Força máxima (N)	F_p (N)
Posição 1	222,36		137,84	
Posição 2	180,47	206,26	99,20	122,69
Posição 3	215,95		131,04	
	K_s (N/mm)		F_s (N)	
Modelo sólido	307,76		200,00	
Modelo superfícies	192,44		124,98	
	Erro relativo (%)		Erro relativo (%)	
Modelo sólido	+49,21		+63,01	
Modelo superfícies	-6,70		+1,87	

Pelos resultados obtidos na Tabela 30, no primeiro patamar, conclui-se que o modelo sólido apresenta valores de erro muito superiores ao que se definiu como objetivo, entre 49 e 63%, e o modelo em superfícies encontra-se dentro do patamar definido como aceitável, com valores de erro compreendidos entre os 6,70 e os 1,87%. Apesar de o modelo em superfícies apresentar melhores resultados neste patamar, visualmente, através da análise da Figura 210, verifica-se que a curva tende a distanciar-se das restantes para valores de deslocamento superiores, o que irá fazer evoluir o erro. Este fator irá ser confirmado pelos valores calculados para o segundo patamar e que se passa a apresentar na Tabela 31.

Tabela 31 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 2º patamar da 1ª fixação na direção de ensaio ao arrancamento.

2º Patamar (Deslocamento = 1,46 mm Força = 440,24 N)				
	Declive (N/mm)	Kp (N/mm)	Força máxima (N)	Fp (N)
Posição 1	249,00		352,42	
Posição 2	221,82	256,66	298,05	351,75
Posição 3	299,17		404,79	
	Ks (N/mm)		Fs (N)	
Modelo sólido	305,97		440,24	
Modelo superfícies	187,18		272,13	
	Erro relativo (%)		Erro relativo (%)	
Modelo sólido	+19,21		+25,16	
Modelo superfícies	-27,07		-22,64	

Através dos valores de erro obtidos para o segundo patamar, conclui-se que a discrepância entre os resultados provenientes da simulação numérica do modelo sólido em comparação com os resultados físicos, face ao consumado para o primeiro patamar, tende a diminuir para valores entre os 19 e 25%. Para o modelo em superfícies confirma-se o que se verificou visualmente e que se prende com a divergência para com o modelo real para valores de deslocamento entre os 0,65 e 1,46 mm. Neste último anotam-se diferenças compreendidas entre os 22 e os 27%. Perante o exposto, o modelo sólido nesta direção de ensaio, apesar da diferença de 10 a 15% do valor ideal, constitui uma melhor aproximação do que o modelo em superfícies.

Relativamente à simulação ao corte na direção B, após aplicação da equação (21) aos dados adquiridos nos ensaios físicos apresentados na Figura 78 do capítulo 3.6.3.1, obtiveram-se as curvas forças *versus* deslocamento com o fator de folga de 0,5 incluído. Na Figura 211 são adicionadas as curvas numéricas, para ambos os modelos, resultantes das simulação segundo a direção B, às curvas experimentais. Numa primeira análise à Figura 211, verifica-se que as curvas resultantes da simulação no modelo em superfícies e do modelo sólido apresentam comportamento semelhante. Ambas as simulações terminam para valores de força entre os 305 N e os 320 N.

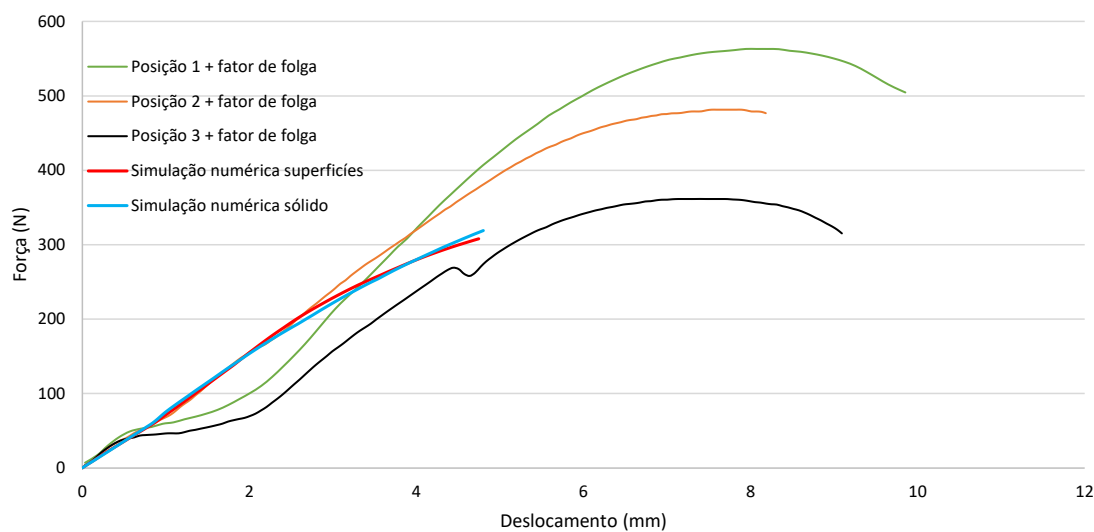


Figura 211 - Curvas força *versus* deslocamento resultantes dos ensaios físicos e das simulações numéricas para a 1ª fixação segundo a direção de ensaio ao corte (direção B).

Na Tabela 32 agrupam-se os dados necessários para a correlação no primeiro patamar.

Tabela 32 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 1º patamar da 1ª fixação na direção de ensaio ao corte (direção B).

1º Patamar (Deslocamento = 1,95 mm Força = 150 N)				
	Declive (N/mm)	K_p (N/mm)	Força máxima (N)	F_p (N)
Posição 1	40,32		97,04	
Posição 2	75,05	47,21	151,63	105,50
Posição 3	26,26		67,84	
	K_s (N/mm)		F_s (N)	
Modelo sólido	78,00		150,00	
Modelo superfícies	76,69		150,65	
	Erro relativo (%)		Erro relativo (%)	
Modelo sólido	+65,20		+42,18	
Modelo superfícies	+62,43		+42,79	

Os valores elevados de erro em ambos os modelos, no primeiro patamar, devem-se à pré-tensão provocada pelos elementos fixadores sentida no início do ensaio físico. Adicionalmente, conclui-se que por ambas as metodologias de correlação (declive e força máxima) os valores de erro são praticamente iguais para ambos os modelos. Na Tabela 33 agrupam-se os dados para a correlação no segundo patamar.

Tabela 33 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 2º patamar da 1ª fixação na direção de ensaio ao corte (direção B).

2º Patamar (Deslocamento = 4,75 mm Força = 308,09 N)				
	Declive (N/mm)	K_p (N/mm)	Força máxima (N)	F_p (N)
Posição 1	85,14		401,40	
Posição 2	81,22	75,43	376,94	348,60
Posição 3	59,94		267,47	
	K_s (N/mm)		F_s (N)	
Modelo sólido	68,47		316,51	
Modelo superfícies	68,53		308,09	
	Erro relativo (%)		Erro relativo (%)	
Modelo sólido	-9,23		-9,21	
Modelo superfícies	-9,15		-11,62	

No segundo patamar, e pelo que se observa dos valores apresentados na Tabela 33, a evolução do erro tendo a diminuir para valores muito próximos da gama do que se definiu como aceitável (10%), em ambos os modelos. Destaca-se de igual forma a proximidade de resultados entre ambos os modelos.

Por fim, para a direção de ensaio ao corte, segundo a direção C, após aplicação da equação (21) aos dados adquiridos nos ensaios físicos apresentados na Figura 79 do capítulo 3.6.3.1, obtiveram-se as curvas força *versus* deslocamento com inclusão do fator de folga de 0,5. As curvas numéricas de ambos os modelos foram agregadas posteriormente às curvas experimentais (Figura 212). Nesta direção de ensaio, à semelhança da direção B, as curvas das simulações em ambos os modelos apresentam comportamentos praticamente idênticos. As forças máximas registadas foram de 336,28 N e 311,10 N para o modelo sólido e o modelo em superfícies, respetivamente.

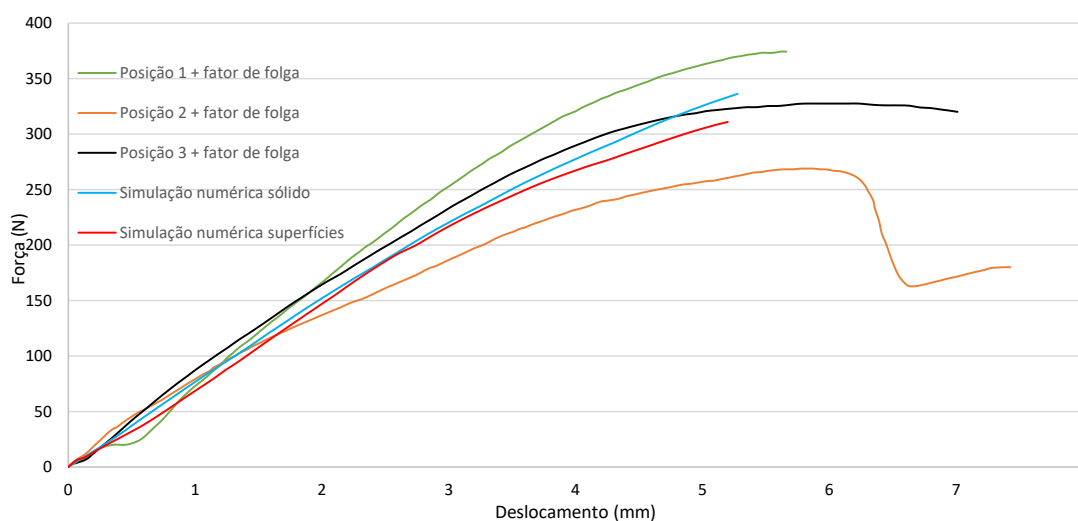


Figura 212 - Curvas força *versus* deslocamento resultantes dos ensaios físicos e das simulações numéricas para a 1ª fixação segundo a direção de ensaio ao corte (direção C).

A correlação para o primeiro patamar é de seguida demonstrada na Tabela 34.

Tabela 34 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 1º patamar da 1ª fixação na direção de ensaio ao corte (direção C).

1º Patamar (Deslocamento = 1,97 mm Força = 150 N)				
	Declive (N/mm)	K_p (N/mm)	Força máxima (N)	F_p (N)
Posição 1	84,48		163,97	
Posição 2	67,51	80,13	135,46	153,96
Posição 3	88,40		162,46	
	K_s (N/mm)		F_s (N)	
Modelo sólido	76,71		150,00	
Modelo superfícies	73,93		144,76	
	Erro relativo (%)		Erro relativo (%)	
Modelo sólido	-4,27		-2,57	
Modelo superfícies	-7,74		-5,98	

A maior nota de destaque neste patamar é a influência praticamente inexistente da pré-tensão provocada pelos elementos fixadores no início do ensaio físico, contrariamente ao que se observou para a direção B. Este facto é baseado nos valores do erro relativo estarem abaixo dos 10%, tanto para o modelo sólido como para o modelo em superfícies. Seguidamente, apresentam-se as correlações no segundo patamar (Tabela 35).

Tabela 35 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 2º patamar da 1ª fixação na direção de ensaio ao corte (direção C).

2º Patamar (Deslocamento = 5,20 mm Força = 311,10 N)				
	Declive (N/mm)	K_p (N/mm)	Força máxima (N)	F_p (N)
Posição 1	77,39		368,34	
Posição 2	49,54	64,32	260,50	317,17
Posição 3	66,02		322,67	
	K_s (N/mm)		F_s (N)	
Modelo sólido	65,34		333,27	
Modelo superfícies	62,73		311,10	
	Erro relativo (%)		Erro relativo (%)	
Modelo sólido	1,59		5,08	
Modelo superfícies	2,47		1,92	

Tendencialmente, o erro relativo em ambos os modelos tende a estabilizar. No modelo sólido varia até os 5%, enquanto no modelo em superfícies esse erro pode chegar aos 2,5%.

Como conclusão, comparando os resultados provenientes dos modelos sólidos e dos modelos em superfícies, se se colocarem de parte os resultados do ensaio de arrancamento (comportamentos divergem para valores de deslocamento superiores), é notória a existência de uma proximidade do comportamento entre ambos, tal como se verificou nas direções de ensaio ao corte. A nível de precisão de resultados, não existem grandes discrepâncias entre eles, com os valores obtidos no final das simulações a estarem compreendidos dentro do intervalo que se aceitou aceitável para uma avaliação a nível estrutural das fixações, à exceção do ensaio ao

arrancamento no qual os valores de erro andam na casa dos 20%. Apesar desta constatação, decidiu-se optar pelos modelos sólidos para a análise geométrica da segunda e 3ª fixação, isto porque, existem simplificações da conversão do modelo sólido para o modelo em superfícies (como por exemplo, a omissão de alguns raios ou aproximações de espessuras) que no momento do processo iterativo comprometem a avaliação da geometria da fixação. Deste modo, achou-se por bem a análise estrutural das restantes fixações nos modelos sólidos que, apesar de serem mais morosos, representam a geometria real das fixações. No entanto, a aproximação por superfícies pode ser viável para geometrias menos complexas.

3.7.4.2 2ª fixação

Neste capítulo encontram-se expostos os resultados nas diferentes direções de ensaio para o modelo sólido da 2ª fixação. O ensaio experimental da fixação da posição 3 não será tido em conta para efeitos de correlação, pelos motivos explicados no capítulo 3.6.3.2. À semelhança do que se fez para a 1ª fixação, numa primeira fase, no que diz respeito à direção de ensaio ao arrancamento, obtiveram-se as curvas força *versus* deslocamento com o fator de folga de 0,5, com recurso à aplicação da equação (21) aos dados adquiridos nos ensaios físicos apresentados na Figura 83 do capítulo 3.6.3.2. Após a conclusão da simulação numérica, juntou-se a respetiva curva às curvas experimentais (Figura 213).

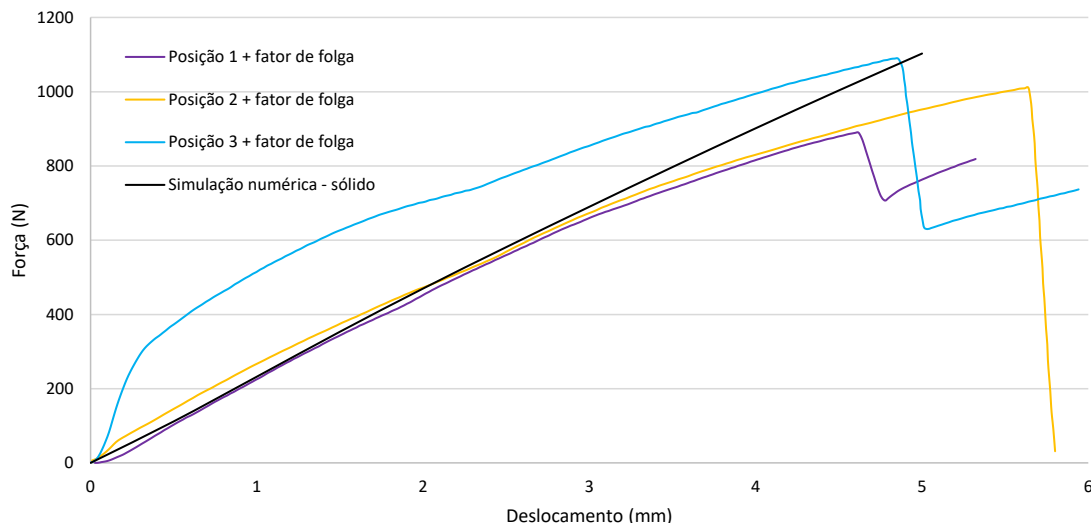


Figura 213 - Curvas força *versus* deslocamento resultantes dos ensaios físicos e das simulações numéricas para a 2ª fixação segundo a direção de ensaio ao arrancamento.

Pela análise da Figura 213, verifica-se que a simulação numérica supera as forças máximas registadas nos ensaios experimentais em aproximadamente 1100 N. Por este motivo, neste caso em específico, aquando da correlação no segundo patamar, a força máxima tida em conta foi a registada na posição 1 (818,72 N), para que seja possível

comparar a simulação numérica com as curvas experimentais antes da rotura. Na Tabela 36 começa-se por apresentar a correlação no patamar definido pela força estipulada pela Renault que as fixações devem suportar ao arrancamento (200 N).

Tabela 36 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 1º patamar da 2ª fixação na direção de ensaio ao arrancamento.

1º Patamar (Deslocamento = 0,87 mm Força = 200 N)				
	Declive (N/mm)	Kp (N/mm)	Força máxima (N)	Fp (N)
Posição 1	245,50	255,01	191,16	213,13
Posição 2	264,51		235,11	
	Ks (N/mm)		Fs (N)	
Modelo sólido	230,50		200,00	
	Erro relativo (%)		Erro relativo (%)	
Modelo sólido	-9,61		-6,16	

Seguidamente, demonstra-se os valores no segundo patamar (Tabela 37).

Tabela 37 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 2º patamar da 2ª fixação na direção de ensaio ao arrancamento.

2º Patamar (Deslocamento = 4,50 mm Força = 1003,6 N)				
	Declive (N/mm)	Kp (N/mm)	Força máxima (N)	Fp (N)
Posição 1	203,56	199,94	879,88	887,33
Posição 2	196,32		894,78	
	Ks (N/mm)		Fs (N)	
Modelo sólido	224,34		1003,60	
	Erro relativo (%)		Erro relativo (%)	
Modelo sólido	+12,20		+13,10	

Pelos valores expostos na Tabela 36 e Tabela 37 conclui-se que a solução numérica tende a divergir dos resultados experimentais para valores de deslocamento entre os 0,87 e os 4,50 mm, ainda assim no limiar dos 10% de erro, mais concretamente entre os 12 e os 13%.

No que concerne às direções de corte, antes de prosseguir à exposição dos resultados das correlações, destaque-se que estas foram severamente afetadas pela pré-tensão provocada pelos elementos fixadores dos modelos no início dos ensaios, daí os valores elevados de erro que são observados no primeiro patamar. Para a direção B, apresentam-se na Figura 214 as curvas experimentais já com o fator de folga incluído e a respetiva curva resultante da simulação numérica.

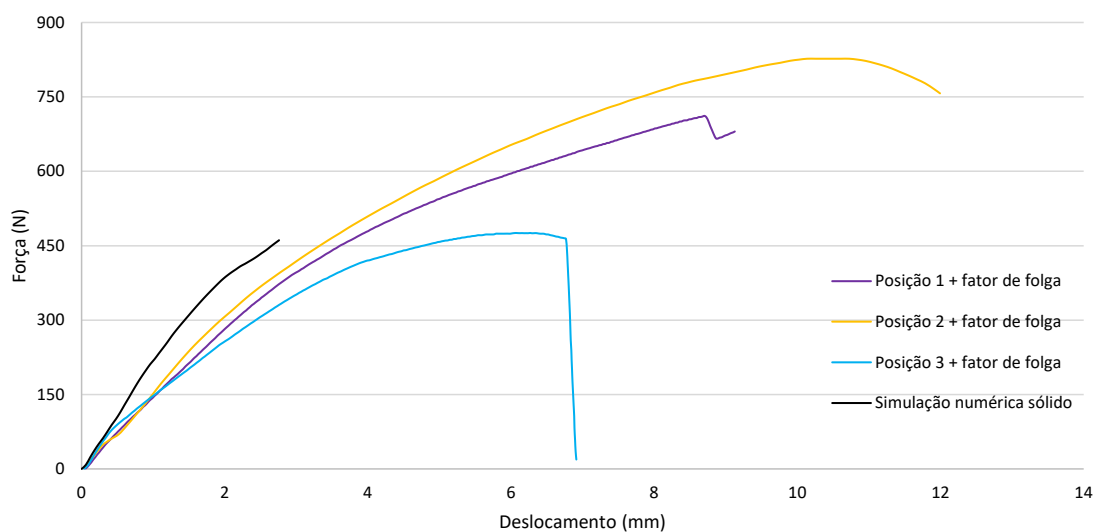


Figura 214 - Curvas força *versus* deslocamento resultantes dos ensaios físicos e das simulações numéricas para a 2ª fixação, segundo a direção de ensaio ao corte (direção B).

À primeira vista, através da visualização da Figura 214, acontece que a curva da simulação apresenta maior rigidez em comparação com as experimentais. A simulação atinge uma força máxima registada de 460,87 N. Na Tabela 38 reúnem-se os dados relativos à correlação no primeiro patamar.

Tabela 38 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 1º patamar da 2ª fixação na direção de ensaio ao corte (direção B).

1º Patamar (Deslocamento = 0,69 mm Força = 150 N)				
	Declive (N/mm)	<i>K_p</i> (N/mm)	Força máxima (N)	<i>F_p</i> (N)
Posição 1	160,80	149,19	99,04	97,16
Posição 2	137,58		95,29	
	<i>K_s</i> (N/mm)		<i>F_s</i> (N)	
Modelo sólido	220,28		150,00	
	Erro relativo (%)		Erro relativo (%)	
Modelo sólido	+27,88		+54,38	

No segundo patamar, os valores são os apresentados na Tabela 39.

Tabela 39 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 2º patamar da 2ª fixação na direção de ensaio ao corte (direção B).

2º Patamar (Deslocamento = 2,76 mm Força = 460,87 N)				
	Declive (N/mm)	<i>K_p</i> (N/mm)	Força máxima (N)	<i>F_p</i> (N)
Posição 1	148,24	142,66	373,07	383,66
Posição 2	137,07		394,25	
	<i>K_s</i> (N/mm)		<i>F_s</i> (N)	
Modelo sólido	170,71		460,87	
	Erro relativo (%)		Erro relativo (%)	
Modelo sólido	+19,67		+20,12	

Numa primeira instância confirma-se o efeito da pré-tensão no início do ensaio constatado anteriormente, já que os resultados do erro no primeiro patamar apresentam valores elevados, que variam entre os 28 a 54%. Estes valores têm tendência a diminuir no segundo patamar para percentagens a rondar os 20%.

Apresentam-se na Figura 215 as curvas experimentais para a direção C já com o fator de folga incluído e a respetiva curva resultante da simulação numérica.

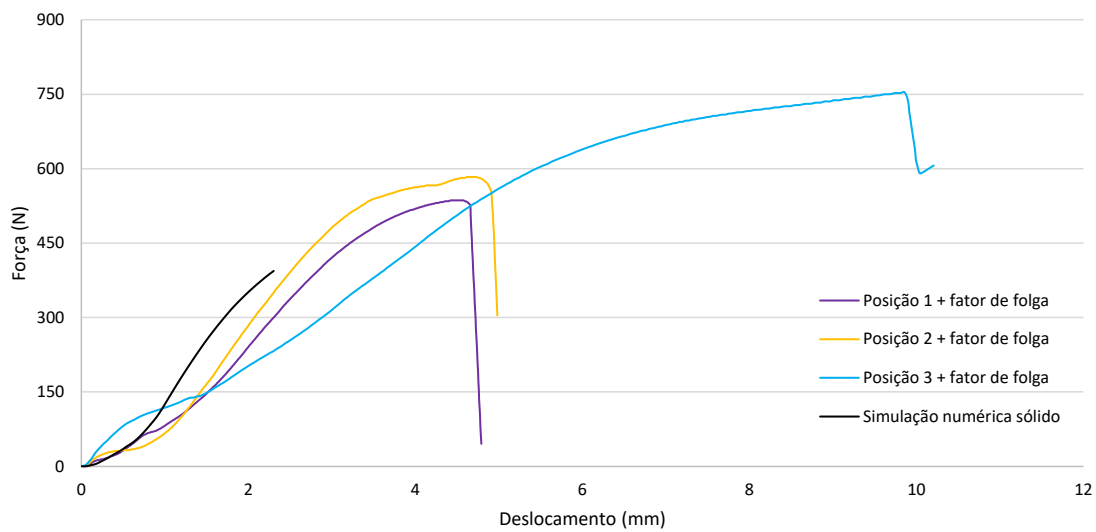


Figura 215 - Curvas força *versus* deslocamento resultantes dos ensaios físicos e das simulações numéricas para a 2ª fixação, segundo a direção de ensaio ao corte (direção C).

À semelhança do que aconteceu na direção B, a curva numérica resultante da simulação na direção C demonstra comportamento mais rígido em comparação com as curvas experimentais. Nesta direção, a simulação finaliza com um valor de força máximo registado de 393,79 N. Na Tabela 38 reúnem-se os dados relativos à correlação no primeiro patamar.

Tabela 40 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 1º patamar da 2ª fixação na direção de ensaio ao corte (direção C).

1º Patamar (Deslocamento = 1,09 mm Força = 150 N)				
	Declive (N/mm)	K_p (N/mm)	Força máxima (N)	F_p (N)
Posição 1	89,22	73,58	91,54	85,09
Posição 2	57,94		78,64	
	K_s (N/mm)		F_s (N)	
Modelo sólido	138,46		150,00	
	Erro relativo (%)		Erro relativo (%)	
Modelo sólido	+88,17		+76,29	

As diferenças percentuais para o segundo patamar são apresentadas na Tabela 41.

Tabela 41 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 2º patamar da 2ª fixação na direção de ensaio ao corte (direção C).

2º Patamar (Deslocamento = 2,30 mm Força = 393,79 N)				
	Declive (N/mm)	Kp (N/mm)	Força máxima (N)	Fp (N)
Posição 1	130,48	143,85	299,68	324,69
Posição 2	157,22		349,70	
	Ks (N/mm)		Fs (N)	
Modelo sólido	195,66		393,79	
	Erro relativo (%)		Erro relativo (%)	
Modelo sólido	+36,02		+21,28	

Analisando os dados fornecidos na Tabela 40 e Tabela 41, verificam-se mais uma vez os elevados valores de erro até aos 150 N (entre os 76% e os 88%), superiores aos registados na direção B (entre os 27% e os 54%). Entre 150 N e 390 N verifica-se uma descida das diferenças de erro, com uma variação entre os 21% e os 36%.

3.7.4.3 3ª fixação

Por fim, para a 3ª fixação, apresenta-se na Figura 216 a curva numérica força *versus* deslocamento, juntamente com as curvas experimentais com o fator de folga de 0,5 incluído, para a direção de ensaio ao arrancamento.

A análise da Figura 216 mostra que a curva numérica se encontra compreendida entre as curvas experimentais de cada posição de estudo. A simulação finaliza para um valor de força de 400 N, valor esse que, recordando, a Audi estabelece para a resistência que a fixação deve suportar na direção ao arrancamento.

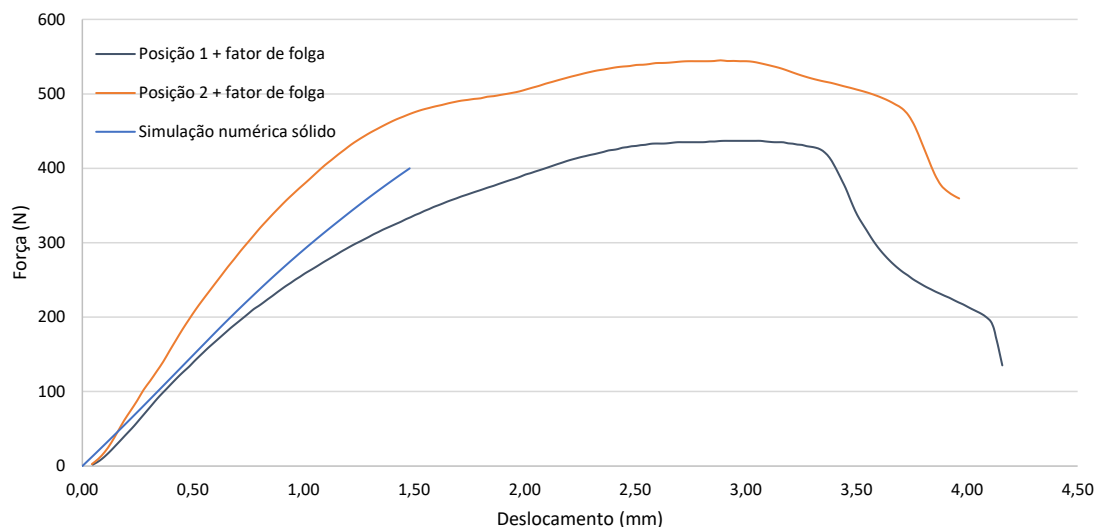


Figura 216 - Curvas força *versus* deslocamento resultantes dos ensaios físicos e das simulações numéricas para a 3ª fixação segundo a direção de ensaio ao arrancamento.

Sendo assim, definiram-se as diferenças de erro no patamar dos 400 N na Tabela 42.

Tabela 42 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 1º patamar da 3ª fixação na direção de ensaio ao arrancamento.

<u>1º Patamar (Deslocamento = 1,48 mm Força = 400 N)</u>				
	Declive (N/mm)	Kp (N/mm)	Força máxima (N)	Fp (N)
Posição 1	236,21	288,93	334,05	403,50
Posição 2	341,64		472,96	
	Ks (N/mm)		Fs (N)	
Modelo sólido	275,66		400,00	
	Erro relativo (%)		Erro relativo (%)	
Modelo sólido	- 4,59		- 0,89	

No segundo patamar, a força máxima registada na simulação numérica coincide com a resistência que o cliente estabelece para a fixação na direção ao arrancamento, ficando a correlação para o primeiro patamar sem efeito. Pela observação da Tabela 42, conclui-se que o erro relativo varia entre os 0,9% e os 4,6%, pelo que encontra dentro do intervalo dos 10% estipulado como aceitável.

Seguidamente, apresenta-se na Figura 217 a curva numérica e as experimentais (aplicado o fator de folga de 0,5), para a direção de ensaio ao corte (direção B).

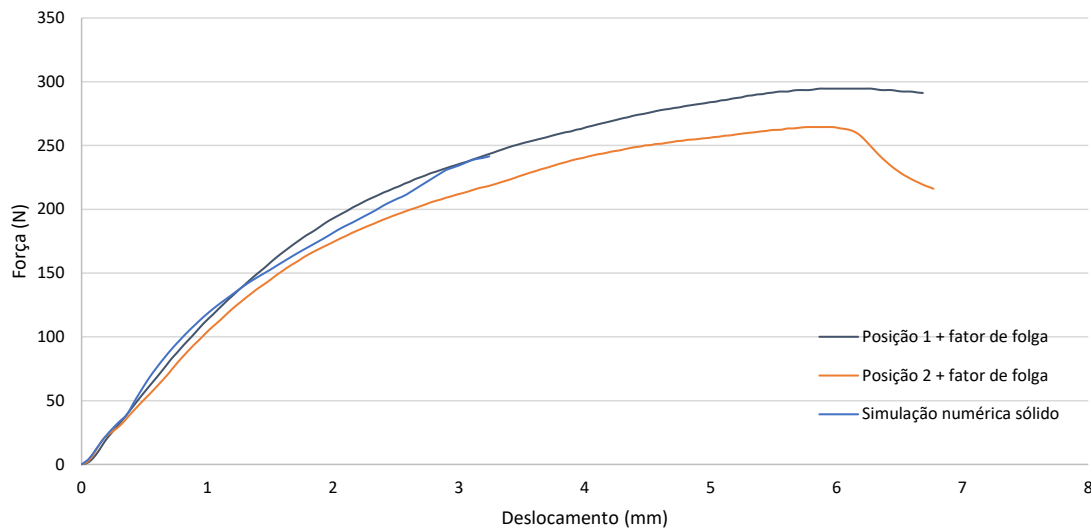


Figura 217 - Curvas força *versus* deslocamento resultantes dos ensaios físicos e das simulações numéricas para a 3ª fixação, segundo a direção de ensaio ao corte (direção B).

A força máxima suportada registada para a simulação numérica na direção B foi de 241,60 N. Como referido no capítulo 3.4, a força que esta esta fixação deve suportar nesta direção foi obtida do caderno de encargos da Renault (200 N). Assim, reúnem-se na Tabela 43 os dados relativos ao 1º patamar.

Tabela 43 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 1º patamar da 3ª fixação na direção de ensaio ao corte (direção B).

1º Patamar (Deslocamento =1,45 mm Força = 150 N)				
	Declive (N/mm)	K_p (N/mm)	Força máxima (N)	F_p (N)
Posição 1	110,81	105,78	153,55	147,37
Posição 2	100,75		141,20	
	K_s (N/mm)		F_s (N)	
Modelo sólido	108,83		150,00	
	Erro relativo (%)		Erro relativo (%)	
Modelo sólido	+2,88		+1,78	

Na Tabela 44 apresentam-se os erros para o 2º patamar.

Tabela 44 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 2º patamar da 3ª fixação na direção de ensaio ao corte (direção B).

2º Patamar (Deslocamento = 3,24 mm Força = 241,60 N)				
	Declive (N/mm)	K_p (N/mm)	Força máxima (N)	F_p (N)
Posição 1	75,93	71,78	243,22	230,80
Posição 2	67,62		218,38	
	K_s (N/mm)		F_s (N)	
Modelo sólido	72,51		241,60	
	Erro relativo (%)		Erro relativo (%)	
Modelo sólido	+1,02		+4,68	

Tanto para o 1º patamar como para o 2º patamar verifica-se, pela observação da Tabela 43 e Tabela 44, que os as diferenças percentuais entre o numérico e o experimental se encontram compreendidas entre os 1,0% e os 4,7%, o que constitui um bom ponto de partida para tirar as devidas conclusões, no que a esta direção diz respeito.

Finalmente, para a outra direção de ensaio ao corte (direção C), apresenta-se na Figura 218 a curva numérica e as experimentais (aplicado o fator de folga de 0,5).

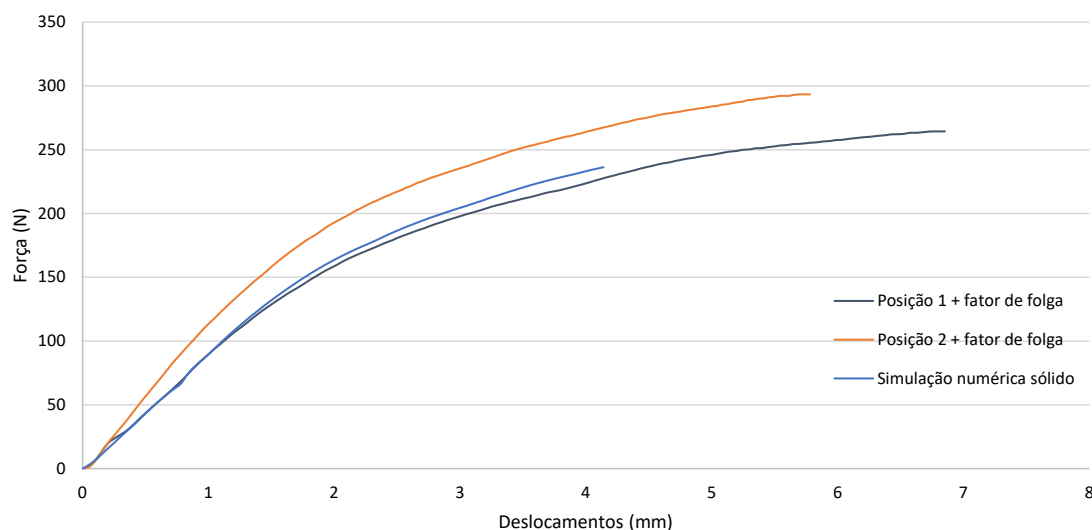


Figura 218 - Curvas força versus deslocamento resultantes dos ensaios físicos e das simulações numéricas para a 3ª fixação, segundo a direção de ensaio ao corte (direção C).

Como se verificou para a direção B, nesta direção a curva numérica também se encontra compreendida entre as duas curvas experimentais, finalizando a simulação para um valor de força de 236,23 N. Na Tabela 45 começa-se por apresentar as correlações no 1º patamar.

Tabela 45 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 1º patamar da 3ª fixação na direção de ensaio ao corte (direção C).

1º Patamar (Deslocamento = 1,77 mm Força = 150 N)				
	Declive (N/mm)	<i>K_p</i> (N/mm)	Força máxima (N)	<i>F_p</i> (N)
Posição 1	84,93	95,07	145,38	161,75
Posição 2	105,22		178,11	
	<i>K_s</i> (N/mm)		<i>F_s</i> (N)	
Modelo sólido	88,63		150,00	
	Erro relativo (%)		Erro relativo (%)	
Modelo sólido	-6,78		-7,26	

Respeitante ao 2º patamar, os seguintes dados são apresentados (Tabela 46).

Tabela 46 - Correlação entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas no 2º patamar da 3ª fixação na direção de ensaio ao corte (direção C).

2º Patamar (Deslocamento = 4,14 mm Força = 236,23 N)				
	Declive (N/mm)	<i>K_p</i> (N/mm)	Força máxima (N)	<i>F_p</i> (N)
Posição 1	54,15	58,43	227,60	247,47
Posição 2	62,72		267,34	
	<i>K_s</i> (N/mm)		<i>F_s</i> (N)	
Modelo sólido	57,07		236,23	
	Erro relativo (%)		Erro relativo (%)	
Modelo sólido	-2,34		-4,54	

Como conclusão, verifica-se que a curva numérica tende a convergir para um erro percentual entre os 2% e os 4,5%, valores estes muito próximos daqueles obtidos para a direção B. Em todas as direções de ensaio, os resultados das simulações no 1º e 2º patamar apresentam erros abaixo dos 10%, o que faz com que a 3ª fixação seja a que apresentou menos discrepâncias entre o experimental e o numérico, em comparação com as outras duas fixações.

3.7.5 Discussão crítica

Face aos resultados apresentados para cada fixação no capítulo 3.7.4, no presente capítulo prossegue-se à análise das zonas críticas em cada direção de ensaio. A avaliação da geometria das fixações foi baseada numa variável denominada pelo Abaqus de PE “*Plastic strain*” que alude a uma das componentes da deformação inelástica (deformação principal máxima). Este valor foi definido para cada fixação com conhecimento da deformação na cedência calculada no capítulo 3.7.2. Como critério de falha, e tendo em conta o que foi explicado até esta fase da dissertação, definiu-se que todas as zonas acima do valor da deformação calculado na cedência para cada fixação estavam não conformes e necessitavam de melhorias.

3.7.5.1 1ª fixação

No que diz respeito à 1ª fixação, o valor calculado da deformação na cedência com base nas propriedades reais do material foi de 0,01173, podendo este ser consultado na Tabela 24 do capítulo 3.7.2.1. Numa primeira fase, na direção de ensaio ao arrancamento, introduziu-se este valor de deformação no Abaqus, para uma força de 200 N, de forma a limitar as zonas críticas, e estabeleceu-se um valor máximo de deformação de 3% (Figura 219).

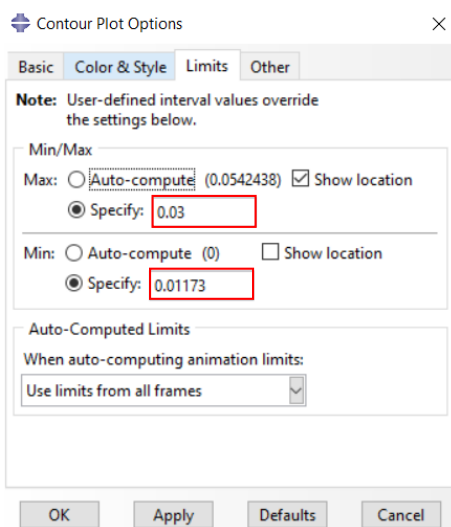


Figura 219 – Estabelecimento dos limites mínimos e máximos de deformação para a direção de ensaio ao arrancamento da 1ª fixação.

Relativamente ao modelo em superfícies, para um valor de força igual a 200 N, assinalam-se na Figura 220 as zonas que se encontram no regime plástico. Para uma melhor compreensão, os corpos rígidos foram removidos da análise.

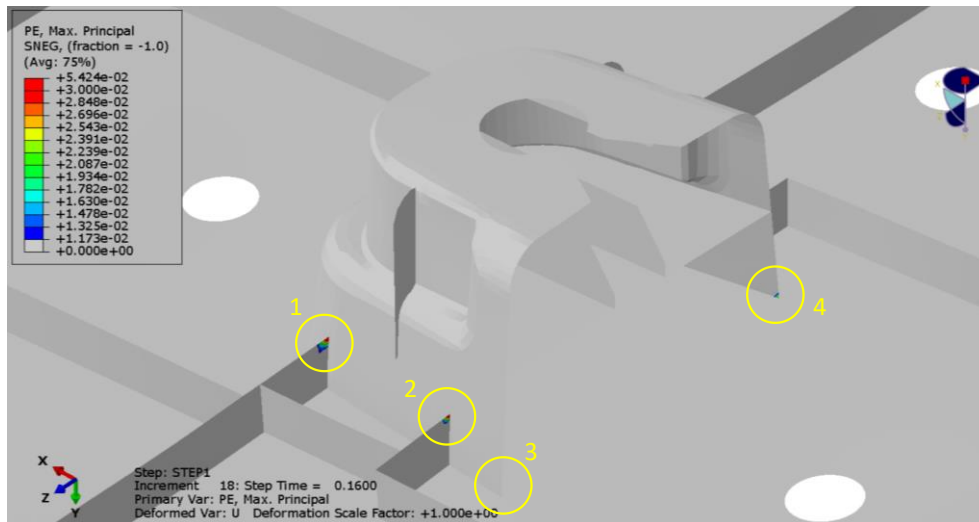


Figura 220 – Zonas que se encontram plastificadas para um valor de força de 200 N no modelo em superfícies da 1ª fixação, segundo a direção de ensaio ao arrancamento.

Através da análise da Figura 220, pode-se dizer que os frisos de reforço da peça nas zonas laterais 1 e 2 são das zonas mais solicitadas pela força de arrancamento. Na zona 2 em concreto, regista-se um valor máximo de deformação de 5,4%. As zonas 3 e 4, tal como se observou no capítulo 3.6.3.1 “Resultados dos ensaios”, constituem áreas frágeis comuns a todas as fixações ao arrancamento e são das primeiras a ceder. Nesta fixação em específico, estas áreas registam valores de deformação de aproximadamente 1% e 3%, respetivamente. As deformações sentidas nas zonas 1 e 2 são igualmente visíveis do lado oposto do porta agrafos. Para o modelo sólido da Figura 221, as zonas que plastificam são as identificadas na Figura 220, à exceção da zona 3.

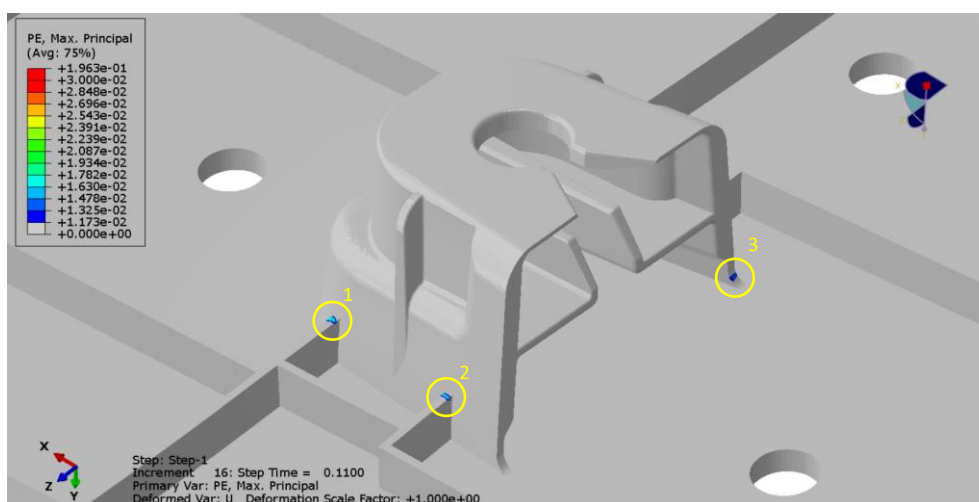


Figura 221 - Zonas que se encontram plastificadas para um valor de força de 200 N no modelo sólido da 1ª fixação, segundo a direção de ensaio ao arrancamento.

As deformações registadas nas zonas 1 e 2 da Figura 221 rondam os 2% e têm início para valores de força aplicados de 180 N, enquanto na zona 3 as deformações plásticas têm início para valores de força a rondar os 200 N com 1% de deformação, aproximadamente. A área abrangida pela elipse, demarcada na Figura 222 com o número 4, constituiu outra zona onde se dá a plastificação e que o modelo em superfícies não identificou. As deformações visualizadas fora da elipse devem-se ao impacto da ferramenta no friso esquerdo superior durante a aplicação da força. No friso direito superior, apesar de não ser visível, estas deformações também são sentidas.

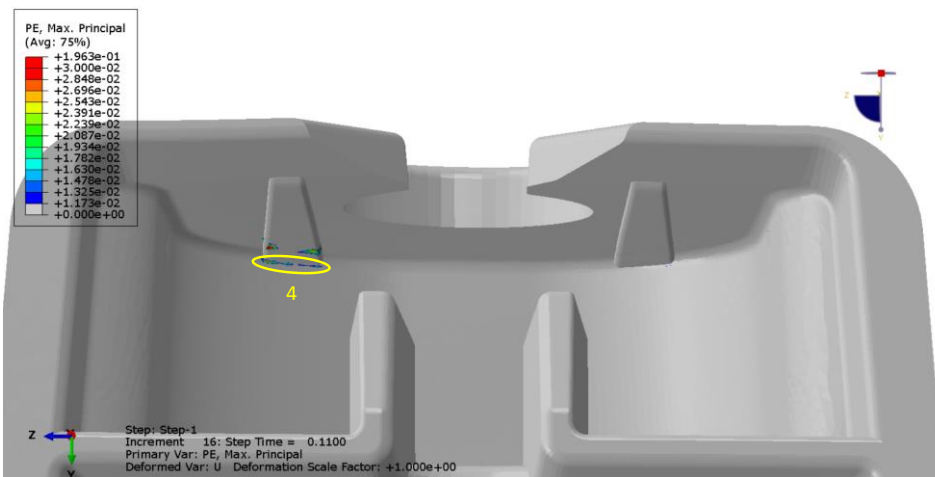


Figura 222 - Zona interior da 1ª fixação plastificada do modelo sólido para um valor de força de 200 N, segundo a direção de ensaio ao arrancamento.

Para um valor de força igual a 150 N, segundo a direção de ensaio B, registam-se na Figura 223 as zonas do modelo sólido que se encontram no regime plástico. Os limites de deformação, estabelecidos para delimitar estas zonas, são os mesmos apresentados na Figura 222.

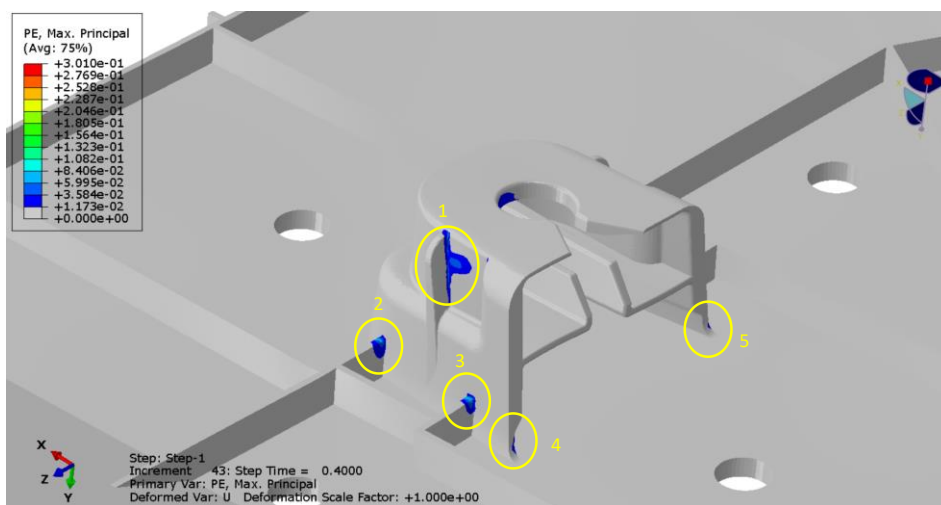


Figura 223 - Zonas que se encontram plastificadas para um valor de força de 150 N no modelo sólido da 1ª fixação, segundo a direção de ensaio ao corte (direção B).

A zona 1, devido ao impacto da ferramenta na zona lateral do porta agrafó, constitui uma das primeiras regiões a ceder com um valor de deformação que pode alcançar os 10%. Adicionalmente, a força lateral provoca nos frisos laterais da zona 2 e 3 uma deformação de aproximadamente 7%. Estas duas últimas zonas, a par com a zona 1, são das primeiras a ceder para valores de força entre os 80 N e os 90 N. Para além destas zonas, as regiões 4 e 5 também apresentam deformação plástica à semelhança do que se visualizou para o ensaio ao arrancamento. No interior da fixação (Figura 224) as zonas assinaladas passam o limite de cedência.

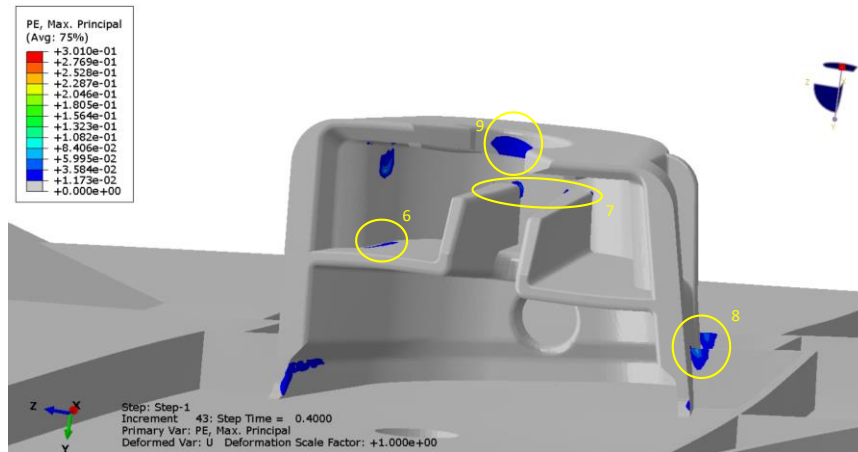


Figura 224 - Zonas interiores da 1ª fixação plastificadas do modelo sólido para um valor de força de 150 N, segundo a direção de ensaio ao corte (direção B).

Tanto a zona 6 como a zona 7 têm valores de deformação plástica compreendidos entre os 1% e os 5%. Os frisos laterais (região 8) estão sujeitos a esforços de tração devido à direção da força de corte e anotam valores máximos de deformação plástica na ordem dos 8%. Para a zona 9 regista-se 1% de deformação plástica.

Finalmente, para a direção de ensaio C, no que toca ao modelo em superfícies, as seguintes áreas são assinaladas na Figura 225 para um valor de força de 150 N.

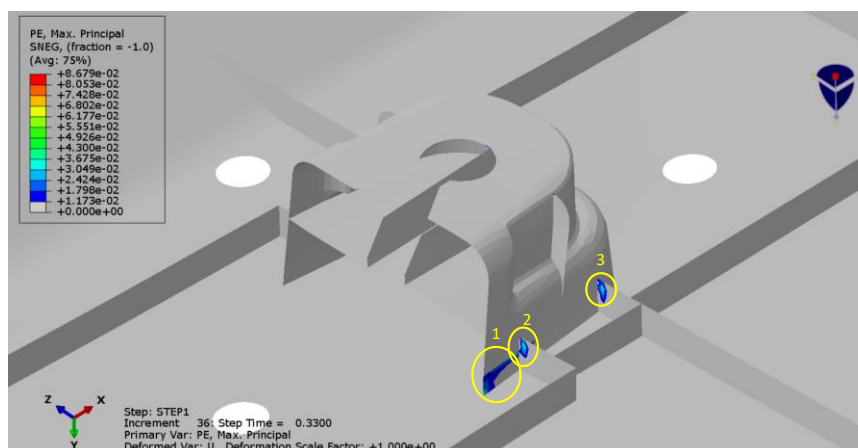


Figura 225 - Zonas que se encontram plastificadas para um valor de força de 150 N no modelo em superfícies da 1ª fixação, segundo a direção de ensaio ao corte (direção C).

As regiões identificadas na Figura 225 são comuns às referidas para a direção de ensaio B, mas do lado oposto do porta agrafó e suportam valores de força máximos semelhantes. Em ambos os casos o valor de deformação plástica ronda os 4%.

3.7.5.2 2ª fixação

Referente à 2ª fixação, o valor calculado da deformação na cedência com base nas propriedades reais do material foi de 0,00986, podendo este ser consultado na Tabela 25 do capítulo 3.7.2.2. Numa primeira fase, na direção de ensaio ao arrancamento, introduziu-se este valor de deformação no Abaqus, para uma força de 200 N, de forma a limitar as zonas críticas e estabeleceu-se um valor máximo de deformação de 3% (Figura 226).

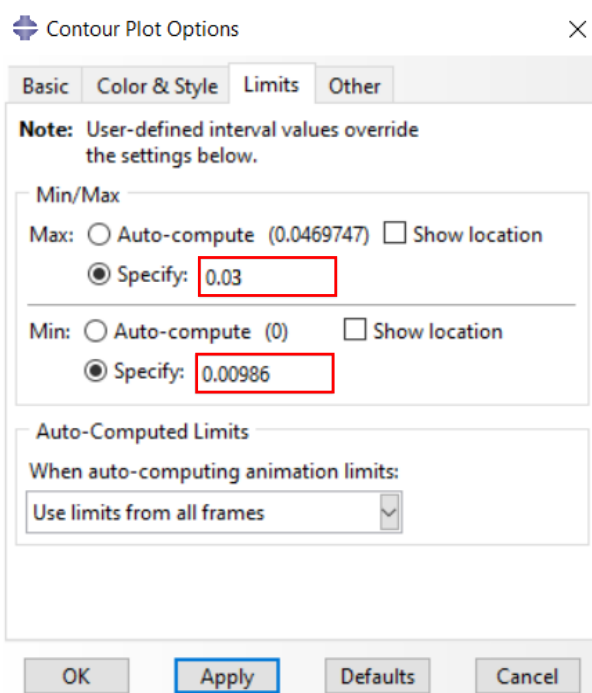


Figura 226 - Estabelecimento dos limites mínimos e máximos de deformação para a direção de ensaio ao arrancamento da 2ª fixação.

Definidos os limites de deformação, apresentam-se na Figura 227 as zonas críticas às quais a 2ª fixação deve ser alvo de melhorias.

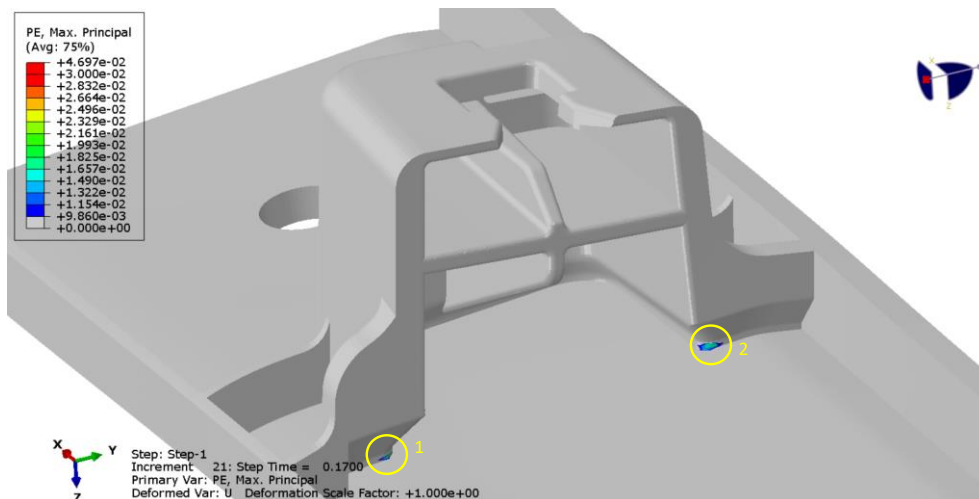


Figura 227 - Zonas críticas para um valor de força de 200 N no modelo sólido da 2ª fixação, segundo a direção de ensaio ao arrancamento.

À semelhança do que se verificou na 1ª fixação para a direção de ensaio ao arrancamento, as regiões identificadas com os números 1 e 2 na Figura 227 constituem zonas de falha comuns entre fixações e apresentam valores de deformação plástica entre os 1% e os 2% para os 200 N. O rasgo que o porta agrafó possui para realizar o guiamento do *clip* durante a montagem acaba por fragilizar esta zona durante o arrancamento, originando valores de deformação máxima para as regiões 1 e 2 de 1% e 2%, respetivamente (Figura 228). Tanto as zonas identificadas Figura 227, como na Figura 228, iniciam o processo de deformação irreversível para valores de força entre os 180-190 N.

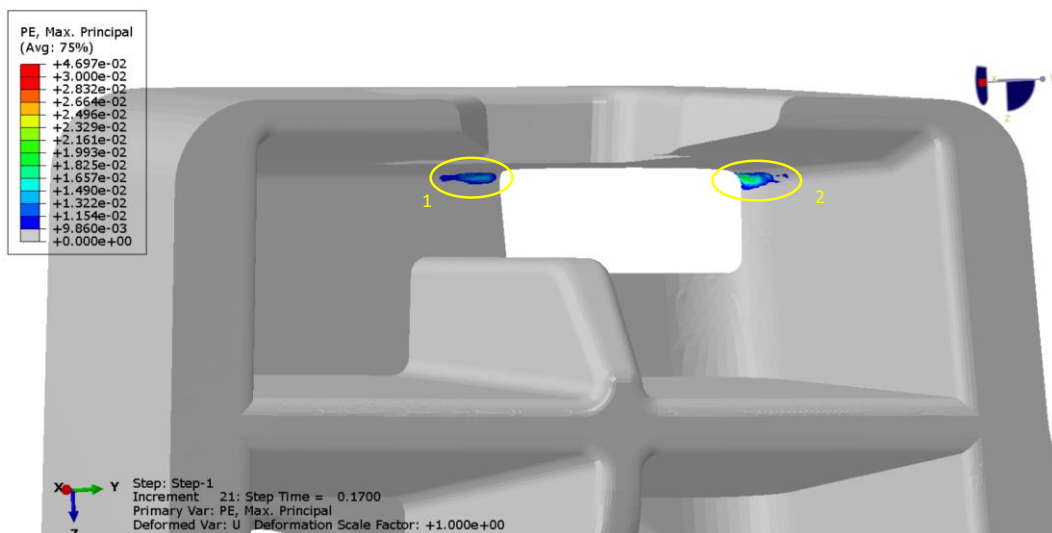


Figura 228 – Regiões críticas da 2ª fixação no interior do porta agrafó para um valor de força de 200 N, segundo a direção de ensaio ao arrancamento, no modelo sólido.

Para um valor de força de 150 N esta fixação não apresenta zonas críticas nas direções de corte (direção B e C), exceto nas zonas de contato entre o *clip* e o porta agrafó

(Figura 229). Os limites mínimos e máximos de deformação para a direção ao corte são os estabelecidos na Figura 226.

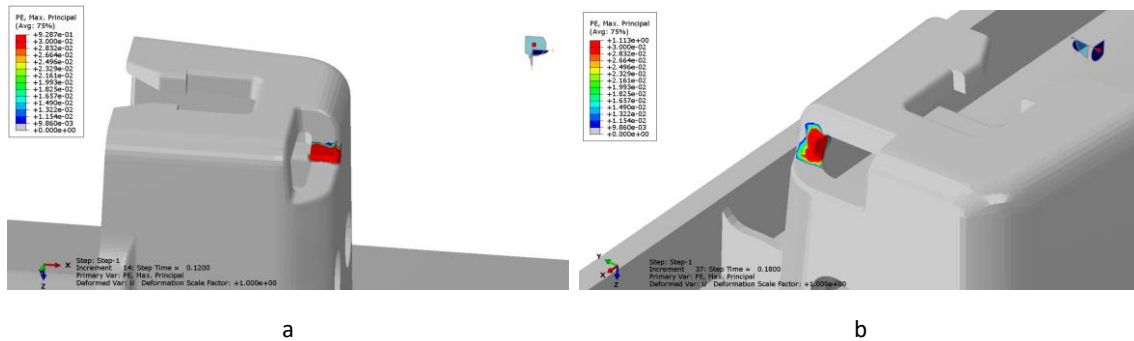


Figura 229 – Deformação plástica na zona de impacto entre o *clip* e o porta agrafos: a) na direção B; b) na direção C.

3.7.5.3 3ª fixação

No que concerne à 3ª fixação, o valor calculado da deformação na cedência com base nas propriedades reais do material foi de 0,00816, podendo este ser consultado na Tabela 26 do capítulo 3.7.2.3. Numa primeira fase, na direção de ensaio ao arrancamento, introduziu-se este valor de deformação no Abaqus, para uma força de 400 N, de forma a limitar as zonas críticas e estabeleceu-se um valor máximo de deformação de 3% (Figura 226).

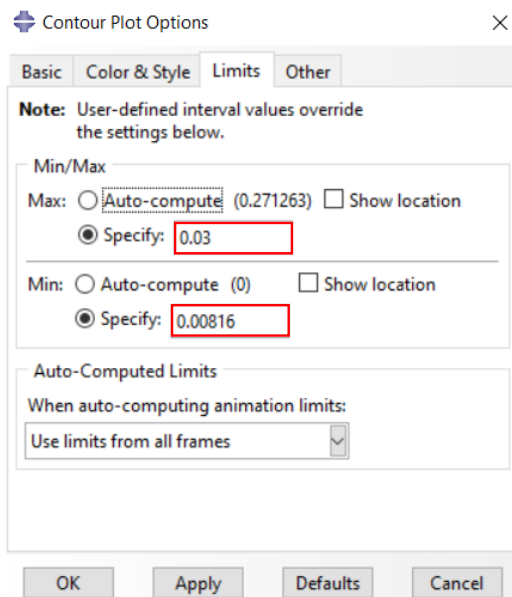


Figura 230 - Estabelecimento dos limites mínimos e máximos de deformação para a direção de ensaio ao arrancamento da 2ª fixação.

Na Figura 231 identificam-se as primeiras zonas do modelo situadas no regime plástico para uma força de 400 N.

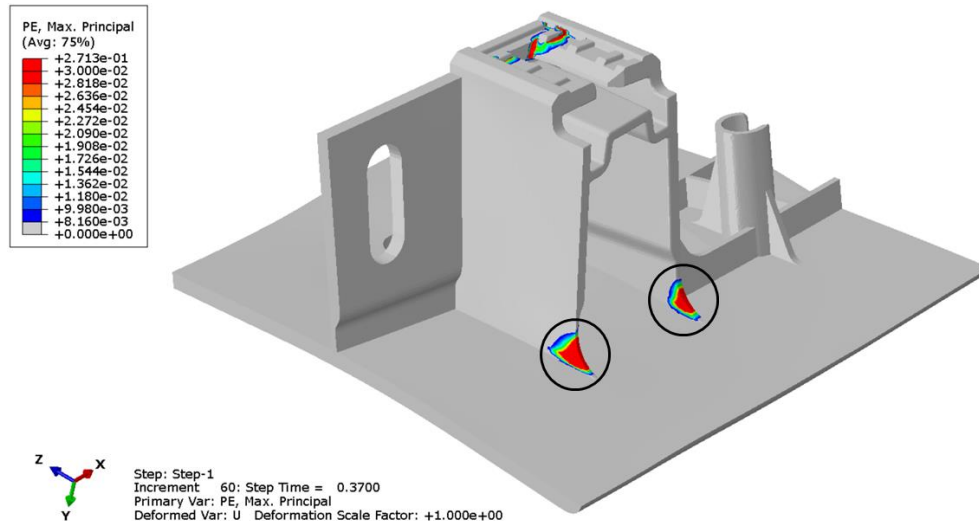


Figura 231 – Regiões plastificadas no modelo da 3ª fixação, na direção de ensaio ao arrancamento, para um valor de força de 400 N.

Através da Figura 231, verifica-se que as duas zonas assinaladas com círculos pretos, na parte inferior do porta agrafo, apresentam uma valor de deformação plástica máxima a rondar os 7%. Estas duas regiões iniciam a plastificação para valores de força entre os 150 N e os 160 N e são das primeiras zonas a plastificar (Figura 232).

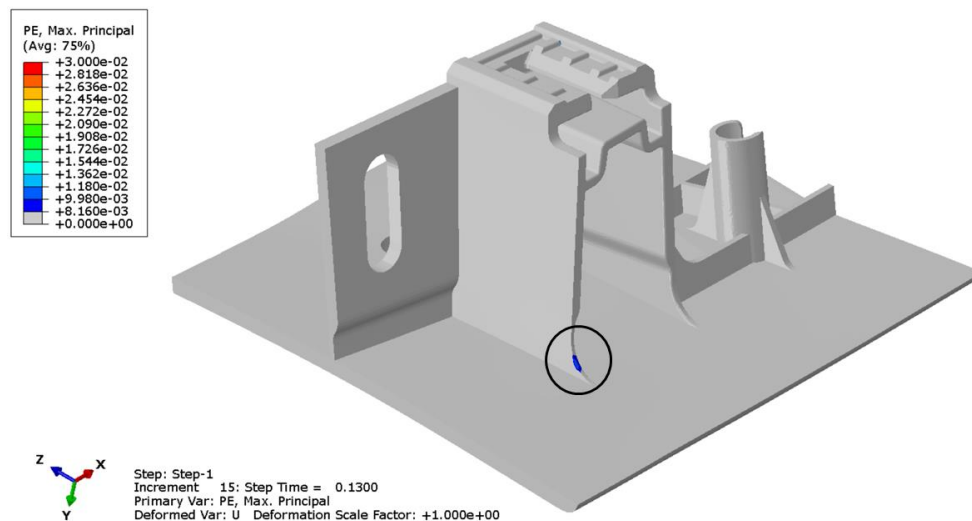


Figura 232 – Início da plastificação no modelo de ensaio ao arrancamento da 3ª fixação.

Além destas duas zonas, outra área que plastifica a par com as duas inferiores reside na parte superior do porta agrafo, onde o *clip* faz batente, com um valor de deformação plástica máxima a rondar os 27% (Figura 233).

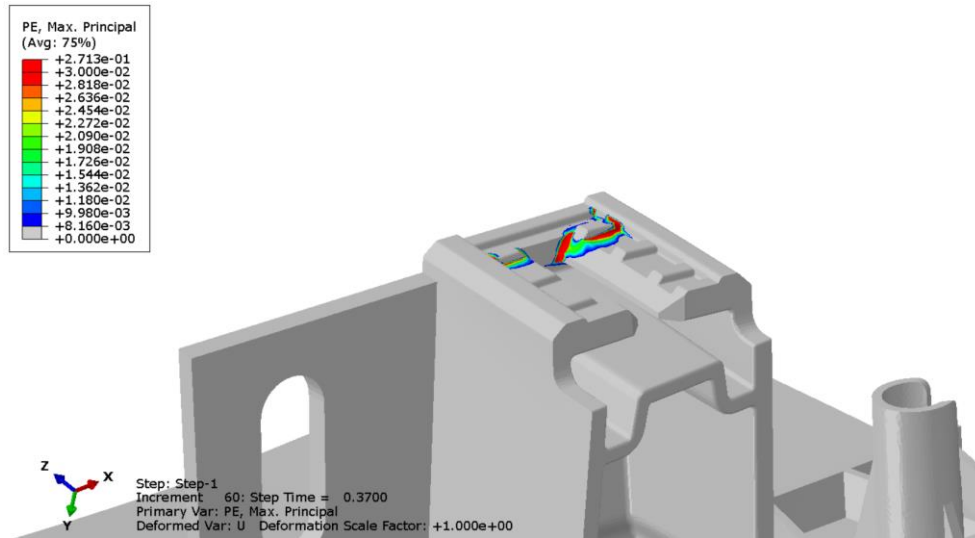


Figura 233 - Regiões plastificadas na zona superior do modelo da 3ª fixação, na direção de ensaio ao arrancamento para uma força de 400 N.

Na zona do raio interior do porta agrafos regista-se de igual forma uma zona de plastificação de material com um valor máximo a rondar os 6% (Figura 234).

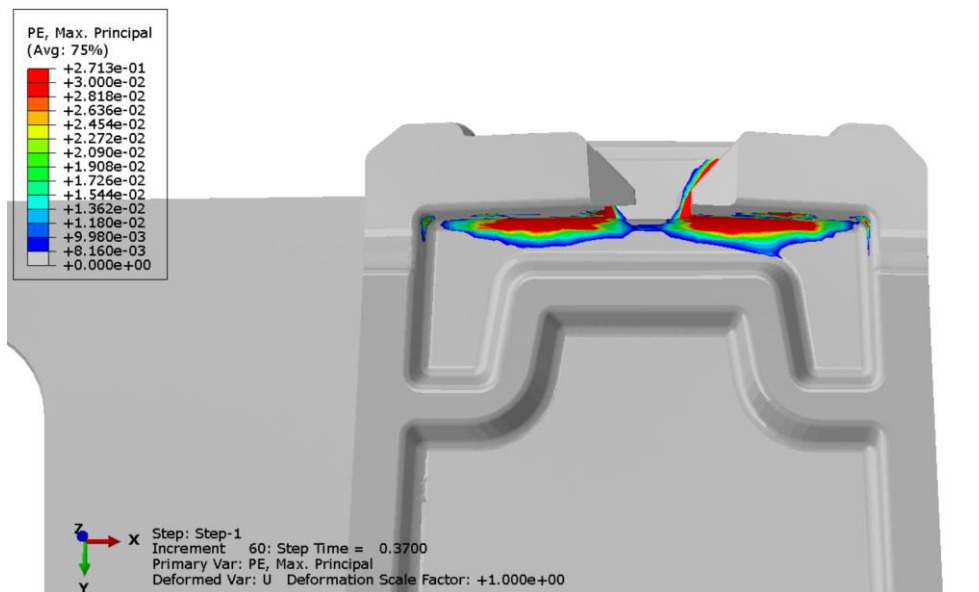


Figura 234 – Zonas de plastificação de plástico no raio interior do porta agrafos do modelo da 3ª fixação, para o ensaio ao arrancamento.

A última região de plastificação está localizada na zona de trás do porta agrafos onde se regista um valor de PE máximo a rondar os 4% (Figura 235).

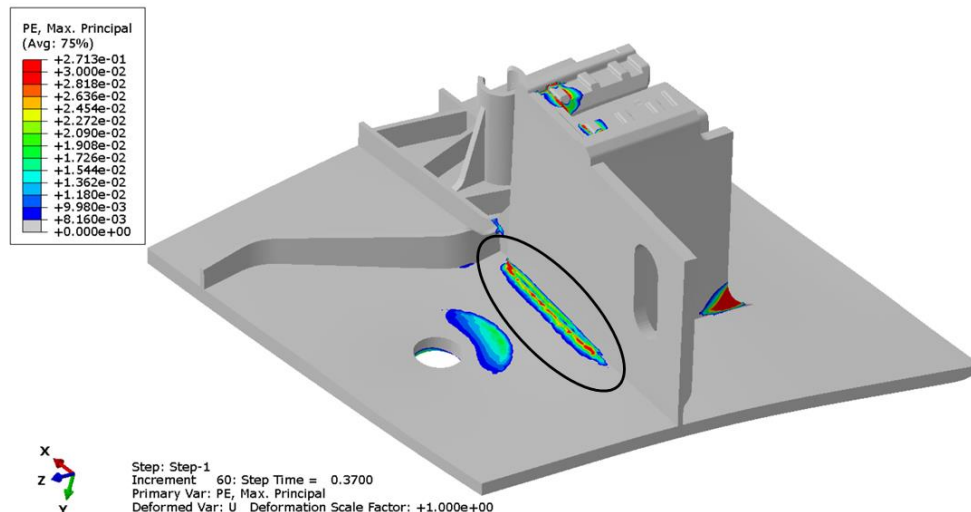


Figura 235 – Região de deformação plástica localizada na parte de trás do porta agrafado do modelo da 3ª fixação, para o ensaio ao arrancamento.

Esta zona é mais propícia a apresentar deformações plásticas, uma vez que se encontra muito próxima da zona de fixação do modelo à mesa da máquina de tração, o que pode estar a causar um aumento irrealista das deformações relativamente à solicitação real da fixação ao arrancamento.

No que toca à direção de ensaio ao corte (direção B), limitaram-se os valores de deformação da análise, através da introdução do valor calculado da deformação na cedência e de um valor máximo de deformação de 3%, tal como já demonstrado na Figura 226. Para uma força de 150 N, as zonas críticas destacam-se na Figura 236.

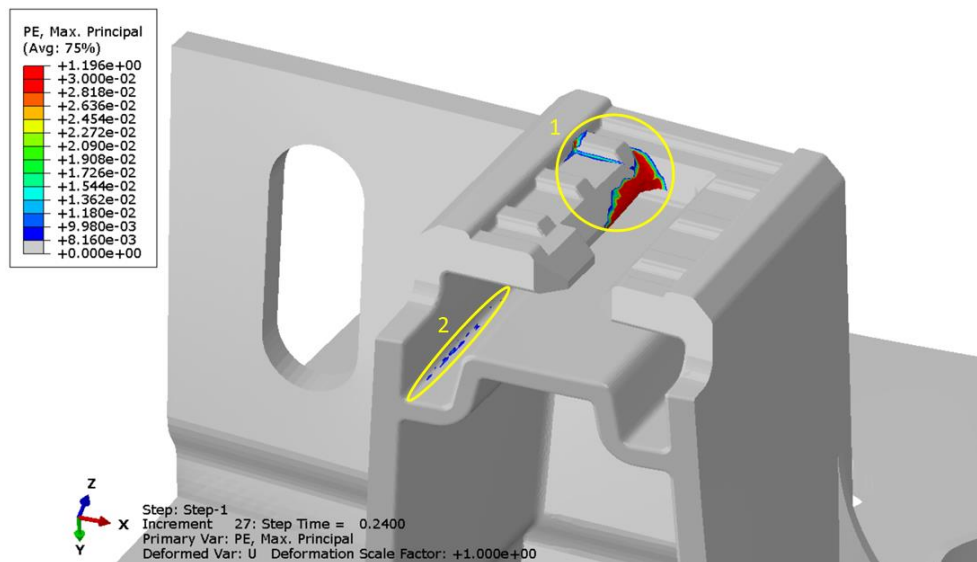


Figura 236 - Regiões de plastificação do plástico localizadas na zona superior do porta agrafado para uma força de 150 N no modelo da 3ª fixação, para o ensaio na direção ao corte (direção B).

As deformações visualizadas na área abrangida pela zona 1 devem-se essencialmente ao impacto do *clip*, propagando-se para os frisos superiores de reforço e têm início

para valores de força entre os 70-80 N. A zona do raio abrangida pela região 2 plastifica para valores muito próximos dos 150 N e regista deformação plástica na casa dos 1%. Os raios interiores identificados na Figura 237 também veem a sua geometria a deformar irreversivelmente.

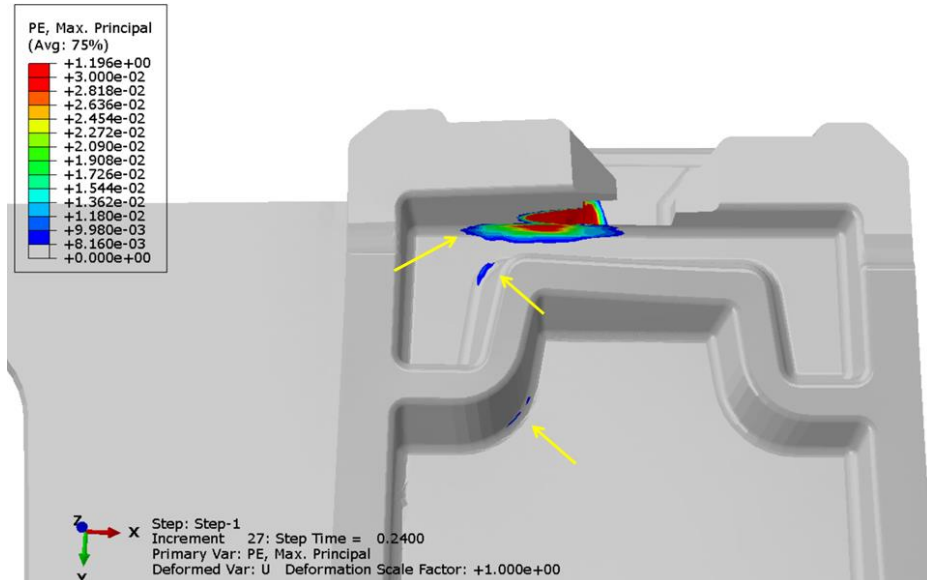


Figura 237 – Deformação plástica nos raios internos do modelo da 3ª fixação para a direção de ensaio ao corte (direção B).

Finalmente, para a outra direção de ensaio ao corte (direção C), limitaram-se novamente os valores de deformação da análise, através da introdução dos dados na Figura 226. Para uma força de 150 N, as zonas críticas destacam-se na Figura 238.

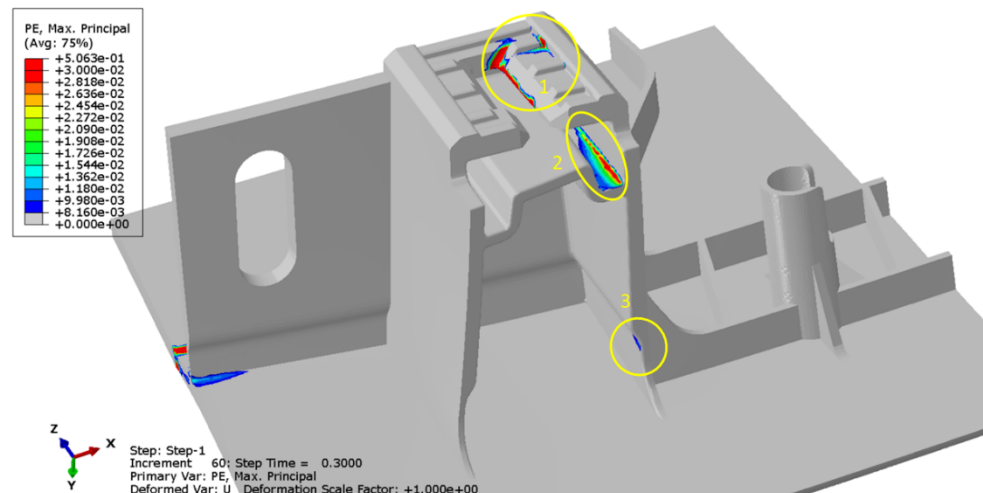


Figura 238 - Regiões de plastificação do plástico no porta agrafos do modelo da 3ª fixação para um valor de força de 150 N, relativamente ao ensaio na direção ao corte (direção C).

Em relação à direção B, pela observação da Figura 238, conclui-se que as deformações plásticas registadas na zona 1 são idênticas devido ao impacto do *clip*, aquando da aplicação da força. Já na zona 2, apesar de as deformações plásticas serem comuns, na

direção C são mais notórias, pela razão de os reforços laterais do porta agrafo favorecerem mais a direção de ensaio ao corte no sentido B do que no sentido C. Resultante de este desfavorecimento dos reforços laterais, surgem novas zonas com deformações plásticas, nomeadamente na área abrangida pela zona 3. Nesta direção em específico, para valores de força a rondar os 50 N, observa-se na zona 1 da Figura 238 o início da plastificação. As deformações plásticas observadas para os raios interiores, indicados para a direção B, são novamente sentidas para a direção C (Figura 239).

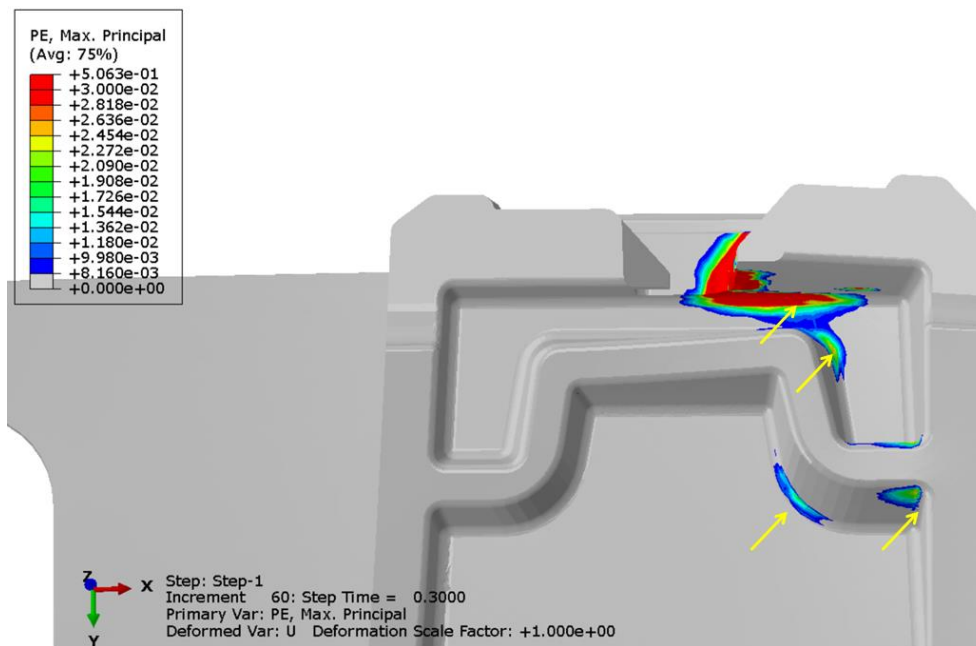


Figura 239 – Deformação plástica nos raios internos do modelo da 3ª fixação para a direção de ensaio ao corte (direção C).

3.8 Melhoria da geometria das fixações

O presente capítulo é utilizado para expor as propostas de melhoria das fixações com base nos resultados demonstrados no capítulo 3.7.5.

3.8.1 *Brainstorming* de ideias de melhoria

Para cada fixação, as primeiras iterações visam encontrar uma solução ao arrancamento. A iteração que cumprir as especificações ao arrancamento, posteriormente, será testada e modificada para cumprir as especificações nas duas direções ao corte.

3.8.1.1 1ª fixação

3.8.1.1.1 1ª iteração

Depois de uma análise às regiões críticas apresentadas na Figura 221 do capítulo 3.7.5.1 na direção de ensaio ao arrancamento, decidiu-se numa primeira instância implementar dois frisos a 45 graus (estes 45 graus são em relação ao eixo y ou o eixo de extração do movimento) na parte frontal do porta agrafó (a vermelho na Figura 240). Embora a geometria do porta agrafó original esteja praticamente a cumprir com as especificações do caderno de encargos (ao arrancamento), sabe-se de antemão que a rotura tem início na zona frontal inferior do porta agrafó, tal como de demonstrou no capítulo 3.6.3.1. Assim, com esta implementação consegue-se melhorar a geometria em dois sentidos.

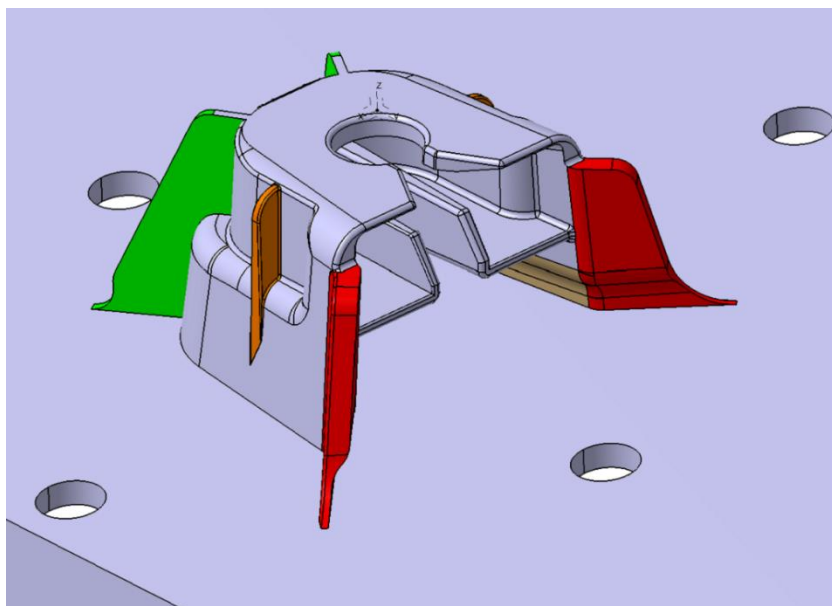


Figura 240 - Modificações geométricas realizadas na 1ª fixação relativas à 1ª iteração.

Apesar de, na análise descrita no capítulo 3.6.3.1, a parte de trás do porta agrafó não registar deformações permanentes, optou-se por colocar dois frisos a 45 graus nesta zona (identificados a cor verde na Figura 240). Para além de melhorar a resistência nas três direções de teste, esta alteração dá estabilidade ao porta agrafó durante o movimento de extração do *slider* (o *slider* corresponde ao bloco de aço que fará o formato interior do porta agrafó). As espessuras dos frisos foram de 1 mm, respeitando a espessura mínima para evitar chupados, e o ângulo de saída aplicado foi 0,25 graus. A aplicação do *draft* foi dado de forma que a espessura nas zonas superiores dos frisos fosse no mínimo 0,8 mm, para garantir um correto enchimento.

A altura da redução de espessura (identificada a cor castanha na Figura 241) foi alterada para um valor mínimo de 1,5 mm. Desta forma a fixação ganha mais estabilidade tanto ao arrancamento como ao corte.

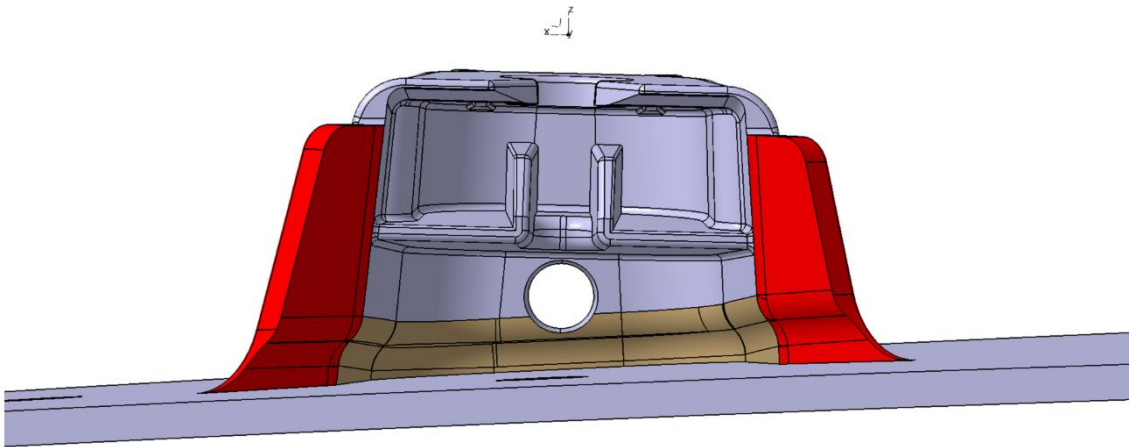


Figura 241 - Vista frontal da 1ª fixação relativa à 1ª iteração.

Por último, os frisos laterais identificados com a cor laranja na Figura 240 foram deslocados 3 mm no sentido apresentado na Figura 242 de forma a ficarem alinhados com o epicentro da deformação durante os ensaios ao corte.

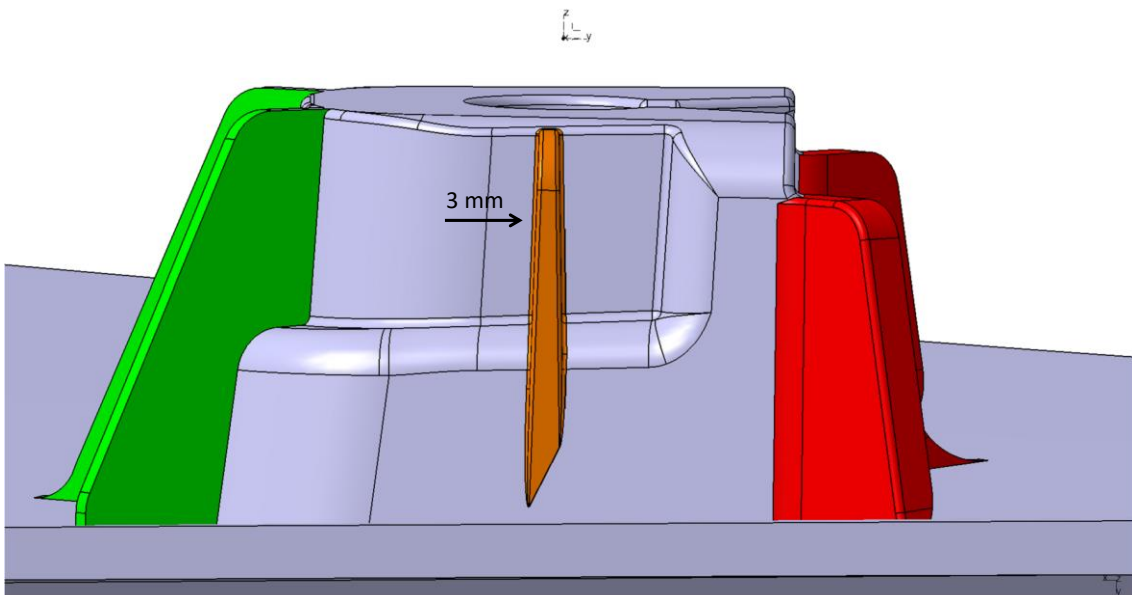


Figura 242 - Deslocação dos frisos laterais da 1ª fixação na 1ª iteração.

3.8.1.1.1.1 Quantificação das melhorias obtidas – 1ª iteração

Após implementação das melhorias, seguiu-se a simulação numérica ao arrancamento. O processo de preparação da simulação foi igual à explicada para o modelo original da 1ª fixação, apresentado no capítulo 3.7.1.1.2. Os resultados obtidos permitiram concluir que a colocação de frisos a 45 graus faz com que a fixação suporte 330 N antes do início da cedência na zona frontal. Os frisos traseiros começam a deformar irreversivelmente (aproximadamente 1% de deformação) para valores de força a rondar os 220 N (Figura 243).

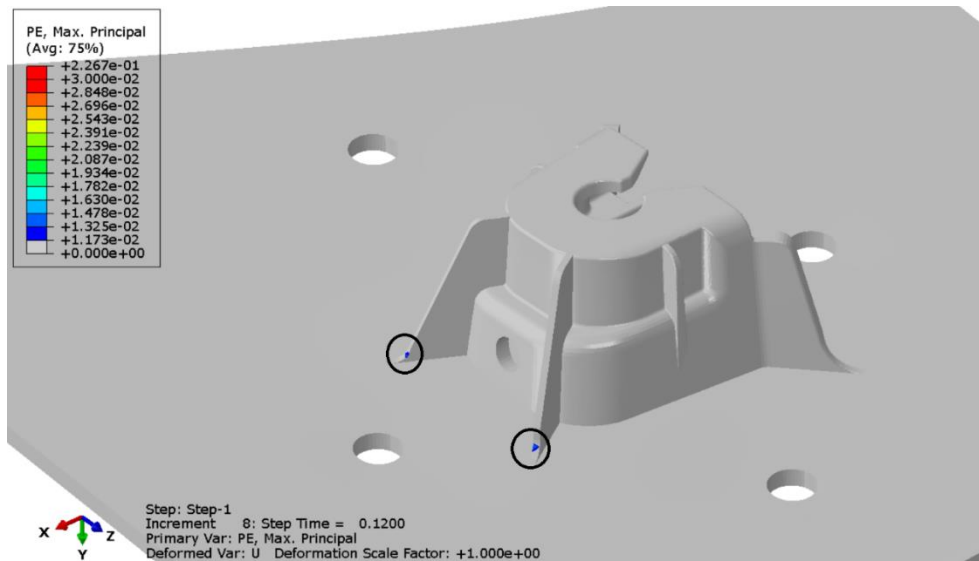


Figura 243 – Início da deformação plástica nos frisos traseiros para uma valor de força de 220 N, após simulação segundo a direção de arrancamento, referentes à 1ª iteração da 1ª fixação.

Na zona interior do porta agravo, o raio do fundo, assinalado com as setas na Figura 244, inicia a cedência aos 210 N.

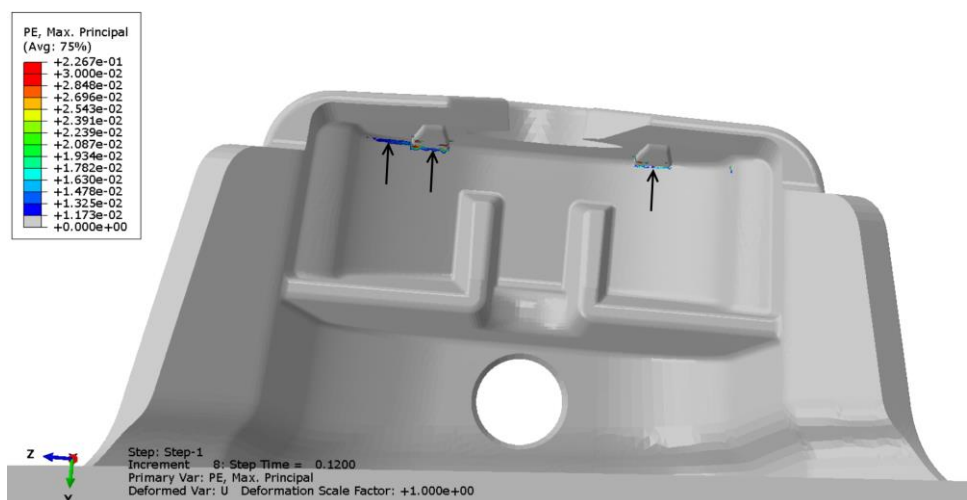


Figura 244 - Início da deformação plástica na zona interior do porta agravo para uma valor de força de 210 N, após simulação segundo a direção de arrancamento, referentes à 1ª iteração da 1ª fixação.

Uma vez que a geometria apresentada na Figura 240 cumpre com os requisitos ao arrancamento, prosseguiu-se à realização da simulação numa das direções ao corte (direção B). Na Figura 245 apresentam-se as zonas deformadas plasticamente para um valor de força de 120 N.

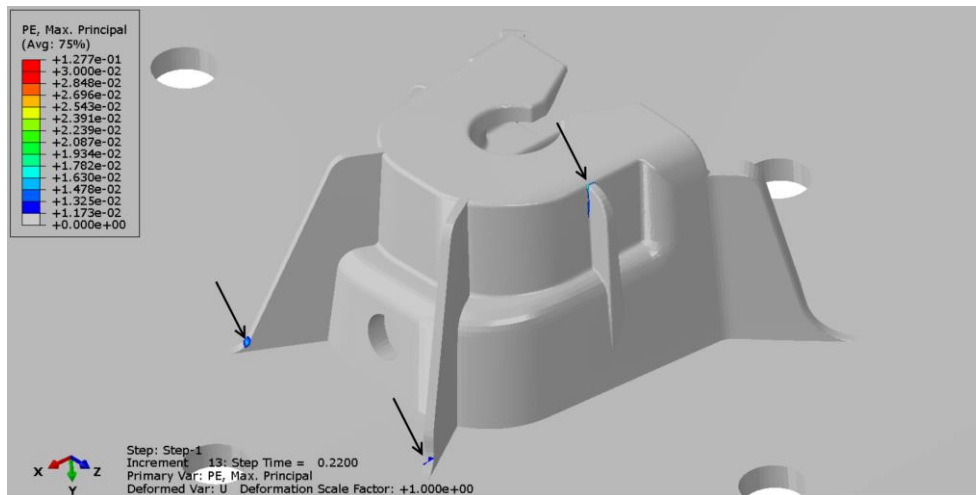


Figura 245 – Zonas plastificadas para uma força de 120 N no exterior do porta agravo da 1ª fixação, segundo a direção de ensaio B, relativamente à 1ª iteração.

As zonas críticas na zona interior do porta agravo encontram-se identificadas na Figura 246.

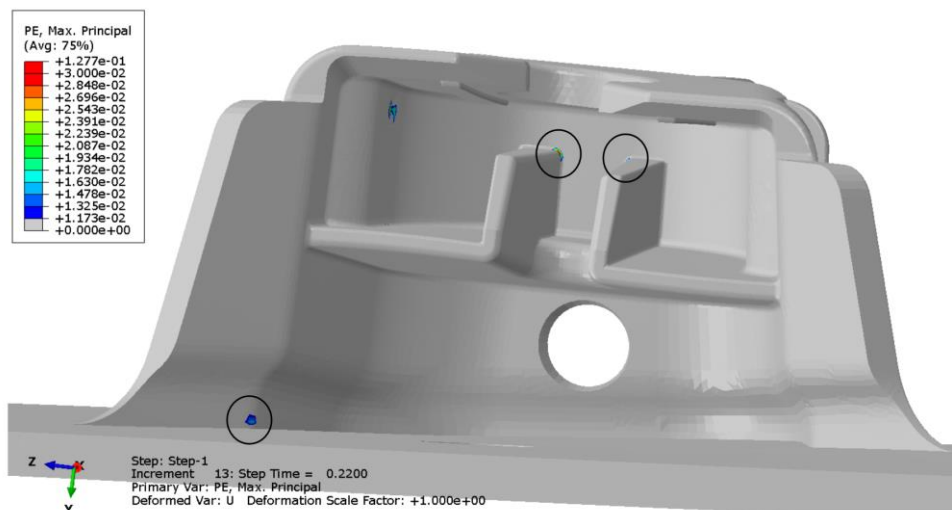


Figura 246 – Zonas plastificadas para uma força de 120 N no interior do porta agravo da 1ª fixação, segundo a direção de ensaio B, relativamente à 1ª iteração.

3.8.1.1.2 2ª iteração

Apesar de a 1ª iteração estar dentro dos valores definidos pela Renault no que toca à resistência da fixação nas direções de ensaio ao arrancamento e ao corte, decidiu-se implementar uma 2ª iteração para tentar melhorar o desempenho da fixação (Figura 247).

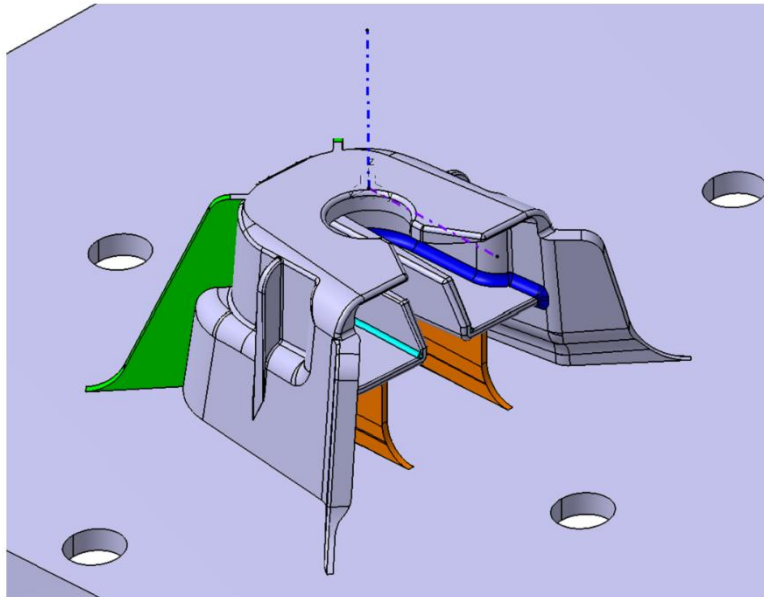


Figura 247 – Modificações geométricas realizadas na 1ª fixação relativas à 2ª iteração.

Numa primeira instância adicionaram-se dois frisos intermédios, destacados a cor laranja na Figura 247, com o intuito de dar mais estabilidade ao porta-agrafo. A espessura destes frisos deve ser 1 mm (40% a espessura do componente) para evitar chupados. As dimensões dos raios identificados a diferentes cores na Figura 248 foram alterados em relação à 1ª iteração.

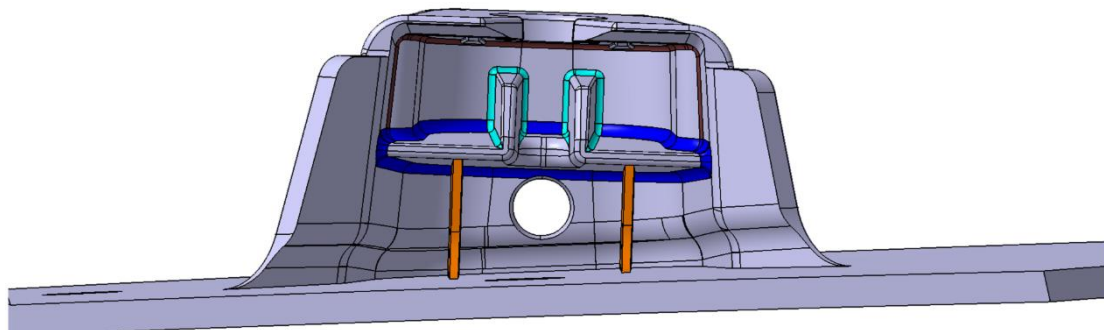


Figura 248 – Vista frontal do porta-agrafo da 1ª fixação referente à 2ª iteração.

O raio identificado a cor azul-escuro na Figura 248 viu a sua dimensão a ser alterada de 0,5 mm para 1 mm, enquanto o raio identificado a cor azul-claro foi alterada de um raio inexistente para 0,5 mm. O raio superior identificado a cor castanha, também na Figura 248, foi alterado para de 0,25 mm para 0,5 mm. Na zona de trás do porta-agrafo aumentou-se a inclinação dos frisos, distinguidos a cor verde na Figura 249, em relação ao eixo de extração do movimento (identificado pela linha roxa a tracejado na Figura 249), para 50°, na expectativa de tentar melhorar a fixação na direção ao corte sem prejudicar o comportamento ao arrancamento.

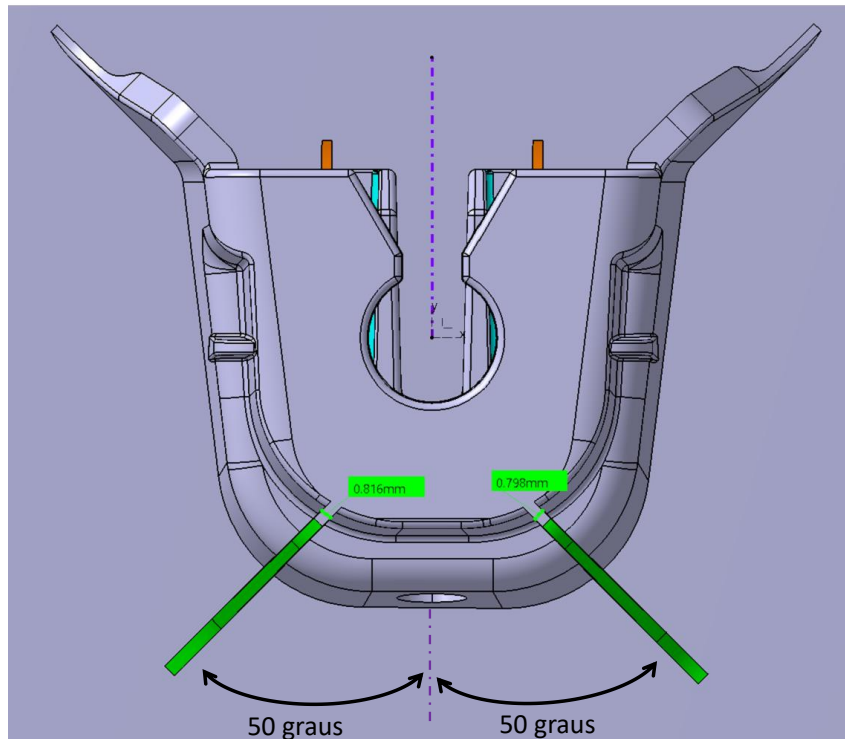


Figura 249 – Aumento da inclinação para 50° dos frisos traseiros na 2ª iteração da 1ª fixação.

Na Figura 249 verificam-se ainda as dimensões das espessuras dos frisos na zona superior, que devem ser pelo menos 0,8 mm. Na Figura 250 demonstra-se a análise de desmoldagem para esta iteração segundo o eixo y (eixo identificado pela linha roxa a tracejado na Figura 249) para 0,25°.

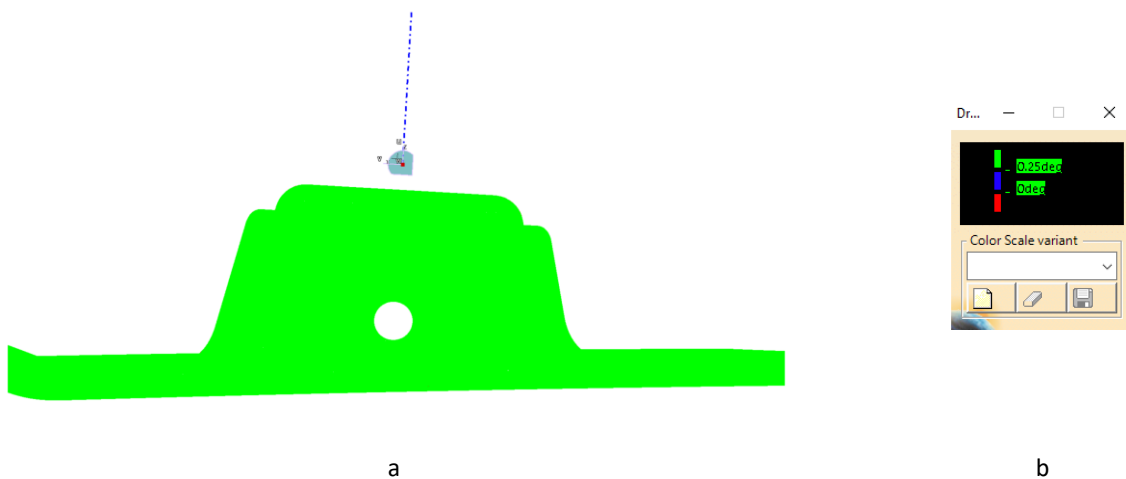


Figura 250 – Análise de desmoldagem: a) segundo o eixo y; b) parâmetros da análise.

A análise de desmoldagem segundo o eixo z (eixo identificado pela linha azul-escura a tracejado na Figura 249), também para 0,25°, é apresentada na Figura 251.

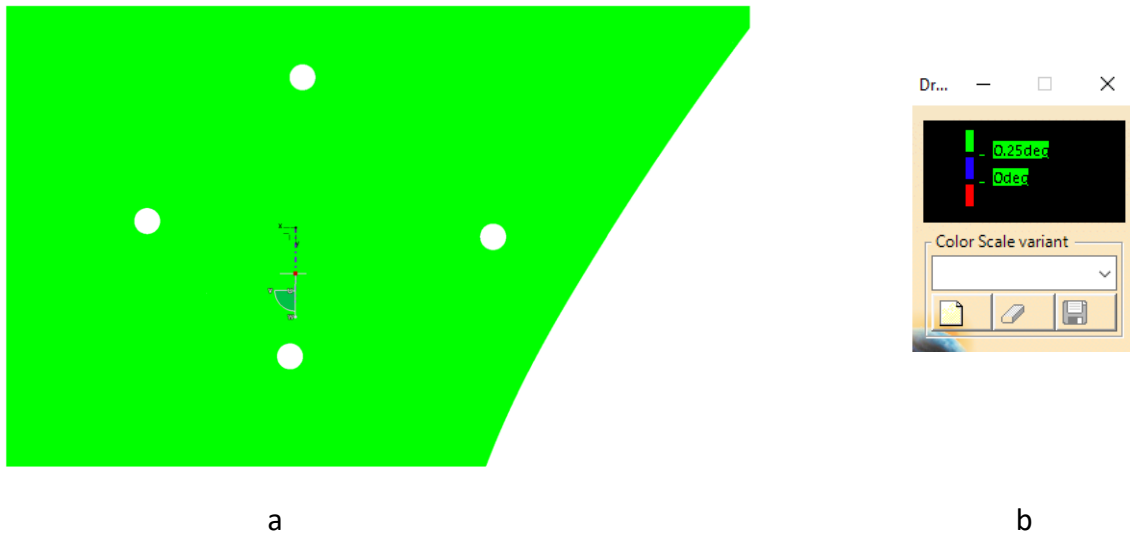


Figura 251 – Análise de desmoldagem: a) segundo o eixo z; b) parâmetros da análise.

3.8.1.1.2.1 Quantificação das melhorias obtidas – 2ª iteração

Os resultados ao arrancamento permitiram concluir que as colocações de frisos intermédios retardam a plastificação na zona frontal para valores a rondar os 400 N (em vez dos 330 N obtidos anteriormente). O aumento da inclinação dos frisos traseiros, juntamente com a incorporação dos frisos intermédios, fazem com que a plastificação na zona de trás do porta agrafa inicie aos 350 N, cerca de 130 N a mais em relação à 1ª iteração (Figura 252).

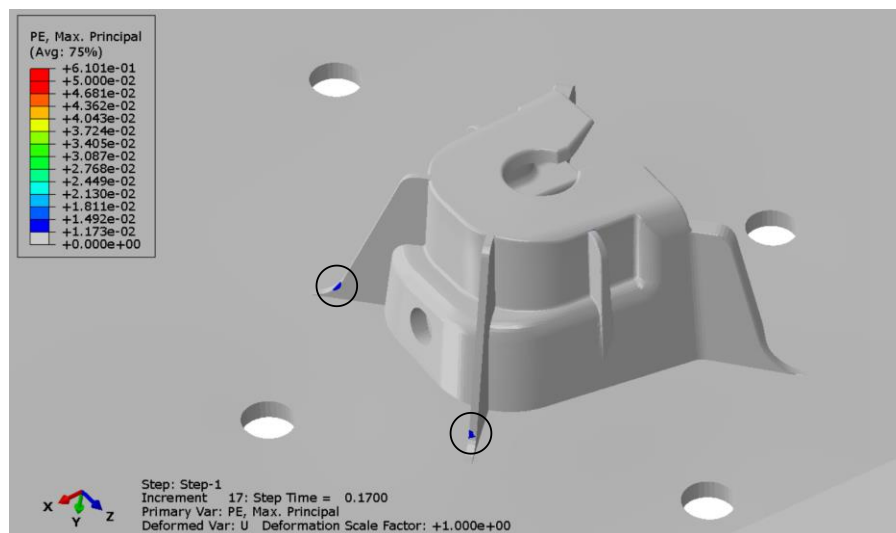


Figura 252 – Início da deformação plástica nos frisos traseiros para uma valor de força de 350 N, após simulação segundo a direção de arrancamento, referentes à 2ª iteração da 1ª fixação.

As alterações da dimensão dos raios internos retardam a plastificação, na zona anteriormente identificada na Figura 244, de 210 N para 250 N (Figura 253).

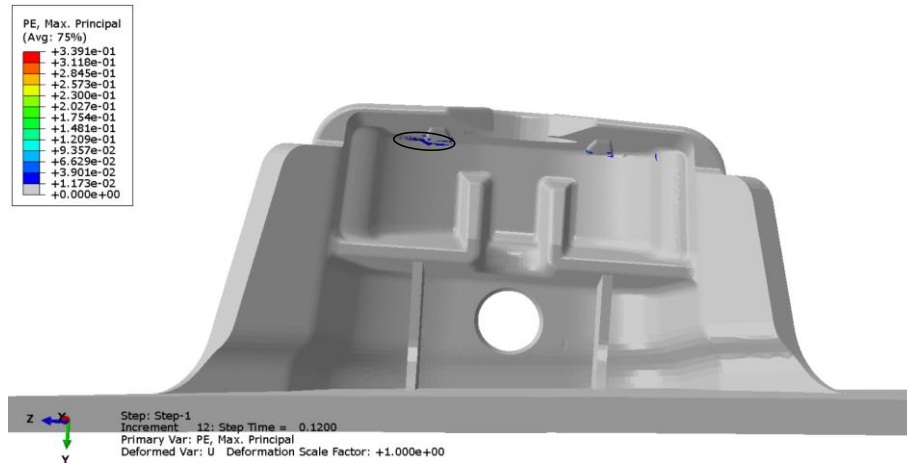


Figura 253 - Início da deformação plástica na zona interior do porta agrafos para uma valor de força de 250 N, após simulação segundo a direção de arrancamento, referentes à 2ª iteração da 1ª fixação.

Relativamente à direção de ensaio ao corte, realizou-se apenas uma simulação na direção ao corte. No entanto, esta não atingiu o valor de força mínimo para realizar a avaliação da geometria devido a problemas de convergência, uma vez que apenas suportou 60 N sem deformação plástica.

3.8.1.2 2ª fixação

3.8.1.2.1 1ª iteração

Tendo em conta as zonas críticas, identificadas na Figura 227 do capítulo 3.7.5.2, e após os resultados obtidos com as alterações relativas à 1ª fixação, nesta 2ª fixação seguiu-se a mesma metodologia e procedeu-se à colocação de frisos dispostos a 45° na zona frontal do porta agrafos a fim de colmatar as deformações plásticas visualizadas nesta zona (Figura 254).

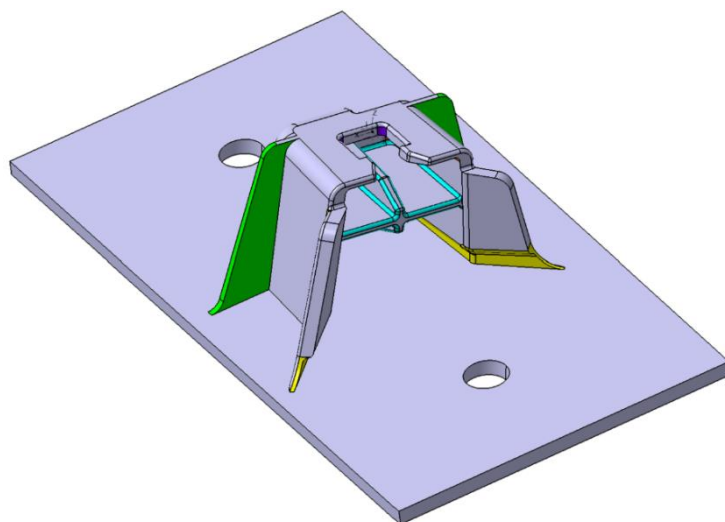


Figura 254 - Modificações geométricas realizadas na 2ª fixação relativas à 1ª iteração.

Como discutido no capítulo 3.7.5.2, devido à presença do rasgo no porta agrafo, foi necessário alterar as dimensões dos raios identificados a cor laranja na Figura 255 de 0,5 mm para 1 mm.

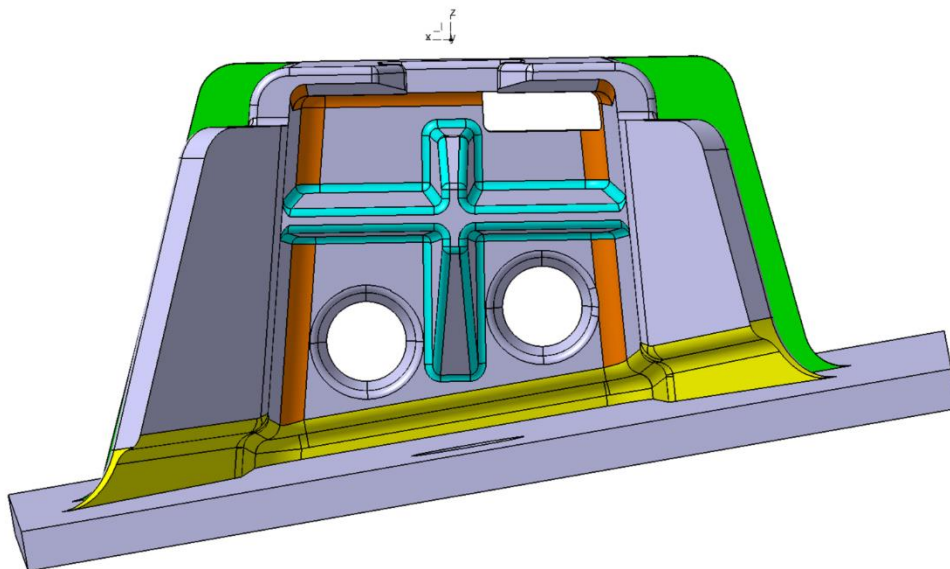


Figura 255 - Vista frontal da 2ª fixação relativa à 1ª iteração.

Visto que nas direções ao corte a fixação não plastifica para valores de força de 150 N (apenas na zona de contato com o *clip*) decidiu-se apenas adicionar dois frisos laterais de reforço (destacados a cor verde na Figura 254) na mesma posição dos frisos de reforço do modelo original, com vista a melhorar o desempenho ao corte.

3.8.1.2.2 Quantificação das melhorias obtidas – 1ª iteração

Por razões de não convergência numérica, tanto ao arrancamento como ao corte não foi possível realizar as simulações para a 1ª iteração da 2ª fixação.

3.8.1.3 3ª fixação

3.8.1.3.1 1ª iteração

A primeira modificação, a fim de aumentar a carga de início da plastificação nas zonas identificadas com círculos pretos na Figura 231, incidiu na colocação de dois frisos frontais dispostos a 90° com a direção de desmoldagem do porta agrafo (distinguidos a cor vermelha na Figura 256). O facto de a fixação se encontrar na extremidade do pilar faz com que a espessura da peça varie entre os 2,2 e os 2,5 mm, o que leva a que a espessura do friso na interface com o componente deva ter no máximo 0,9 mm (40% a espessura da peça), de forma a não apresentar chupados. Esta espessura evolui para 2 mm nas zonas superiores dos frisos, correspondente à espessura do porta agrafo. A

redução de espessura nestes frisos, além de ter como principal objetivo evitar chupados, facilita o processo de enchimento do porta agrafos.

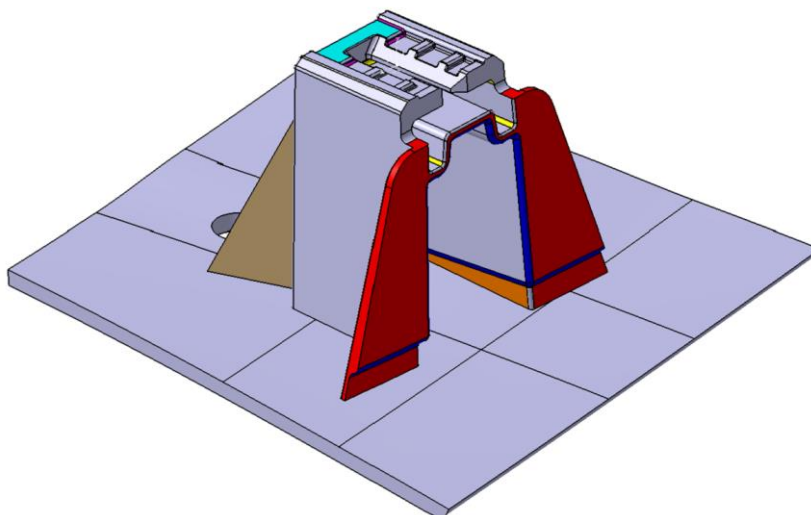


Figura 256 – Modificações geométricas realizadas na 3ª fixação relativas à 1ª iteração.

Nestes frisos foi aplicado um ângulo de desmoldagem de $1,5^\circ$. Após a implementação dos frisos, decidiu-se diminuir a extensão da zona de redução de espessura no porta agrafos original, de 5,5 mm (identificada a cor castanha na Figura 56 no capítulo 3.3.1.3) para 1,5 mm, como identificado a cor laranja na Figura 257. Desta forma, a fixação ganha mais base de sustentação, principalmente na direção de arrancamento. As dimensões dos raios utilizados na redução de espessura (distinguidos a cor azul-escura na Figura 257) foram de 0,7 mm.

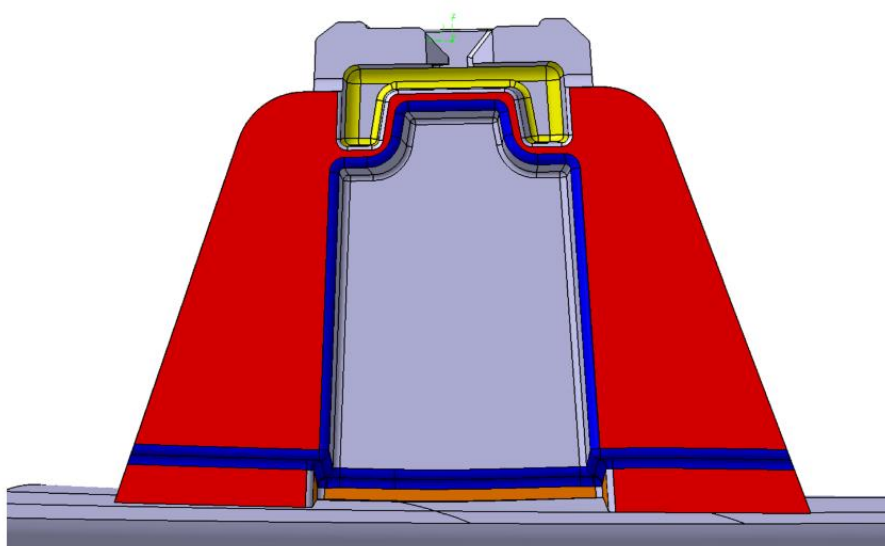


Figura 257 – Modificações realizadas na zona interior do porta agrafos da 3ª fixação relativamente à 1ª iteração.

Face às deformações registadas na Figura 234 (capítulo 3.7.5.3), aumentou-se a dimensão do raio, identificado a amarelo na Figura 257, para 1 mm, anteriormente a 0,4 mm. Esta modificação deve garantir uma folga entre o *clip* e o porta agrafos de pelo menos 1 mm. Na Figura 258 demonstra-se uma vista lateral seccionada da 3ª fixação após as modificações mencionadas.

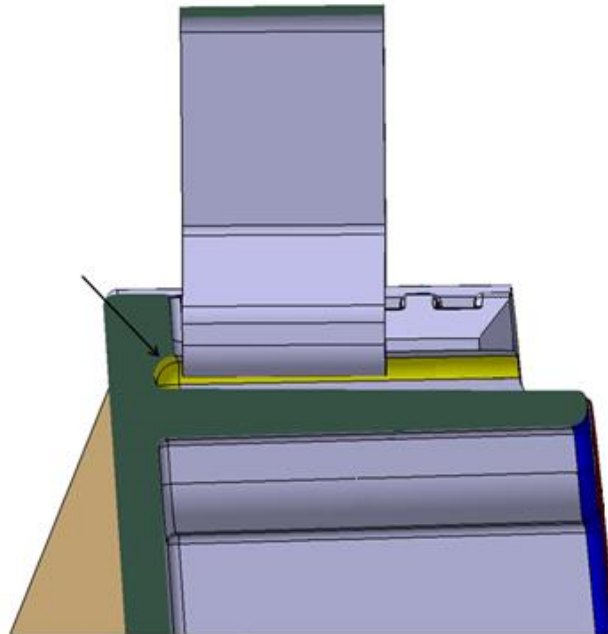


Figura 258 – Vista lateral seccionada da 3ª fixação para demonstração do fim do raio e do *clip*.

Na zona superior do porta agrafos, tendo em conta o observado na Figura 233 (capítulo 3.7.5.3), considerou-se a adição de material plástico (distinguido a azul-claro na Figura 259).

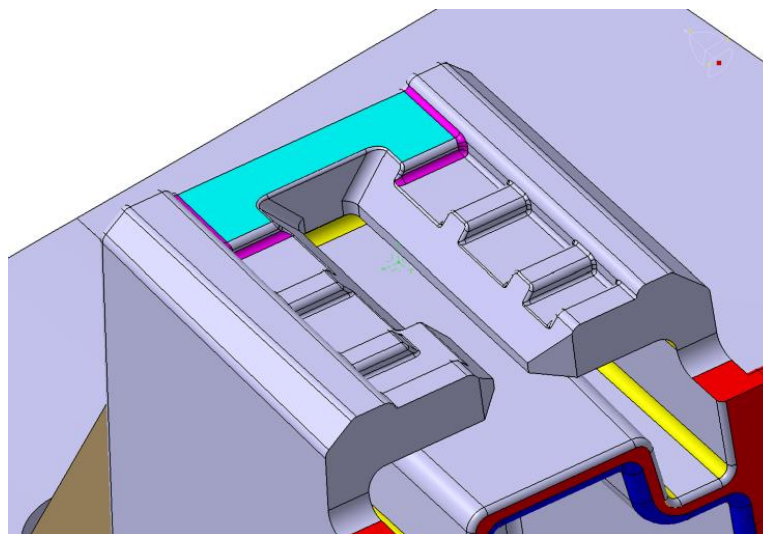


Figura 259 – Adição de material plástico na zona superior do porta agrafos da 3ª fixação relativamente à 1ª iteração.

A altura de adição de material, nesta iteração, foi realizada até à altura das nervuras de reforço superiores e de valor igual a 0,7 mm. Importa referir que esta adição de plástico não deve interferir com o patamar do plano de chapa (ver Figura 54 do capítulo 3.3.1.3). Os raios distinguidos a roxo na Figura 259 foram aumentados de 0,15 mm para 0,30 mm.

A última modificação realizada nesta iteração relacionou-se com a colocação de dois frisos dispostos a 45° entre eles, na parte de trás do porta agrafo (distinguidos a cor castanho-clara na Figura 260). Esta incorporação, além de reforçar o porta agrafo na zona identificada como crítica na Figura 235 do capítulo 3.7.5.3, auxilia na estabilização do porta agrafo durante o movimento de extração.

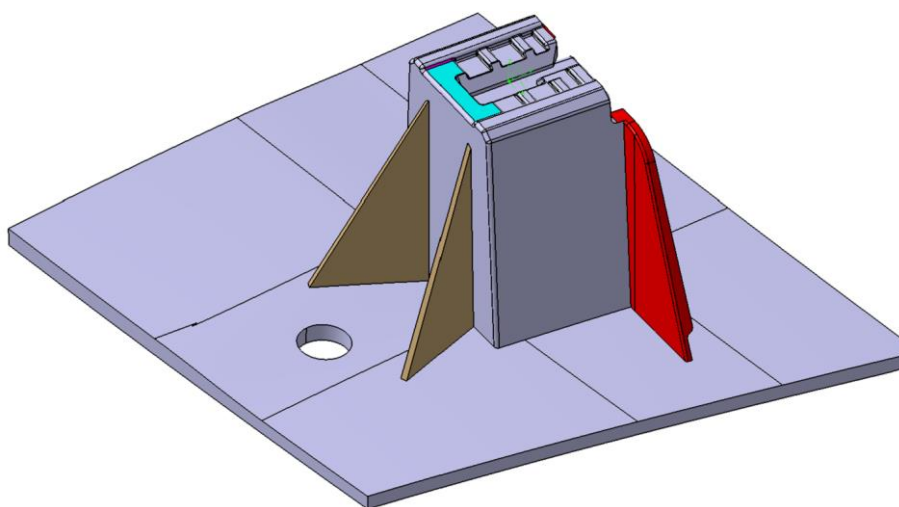


Figura 260 – Incorporação dos frisos traseiros na 1ª iteração da 3ª fixação.

3.8.1.3.1.1 Quantificação das melhorias obtidas – 1ª iteração

Após as alterações geométricas demonstradas no capítulo 3.8.1.3.1 seguiu-se a implementação numérica para respetiva quantificação das melhorias obtidas. O processo de preparação da simulação foi igual ao explicado para o modelo original da 3ª fixação, apresentado no capítulo 3.7.1.3. Os resultados provenientes da simulação ao arrancamento permitiram concluir que a adição de frisos a 90° não traz melhorias significativas, com o início da plastificação a ocorrer entre os 180 N e os 190 N (o porta agrafo suporta mais 20-30 N na zona frontal em relação ao porta agrafo do modelo original, antes da plastificação). Na Figura 261 apresentam-se as deformações plásticas para uma força de 400 N.

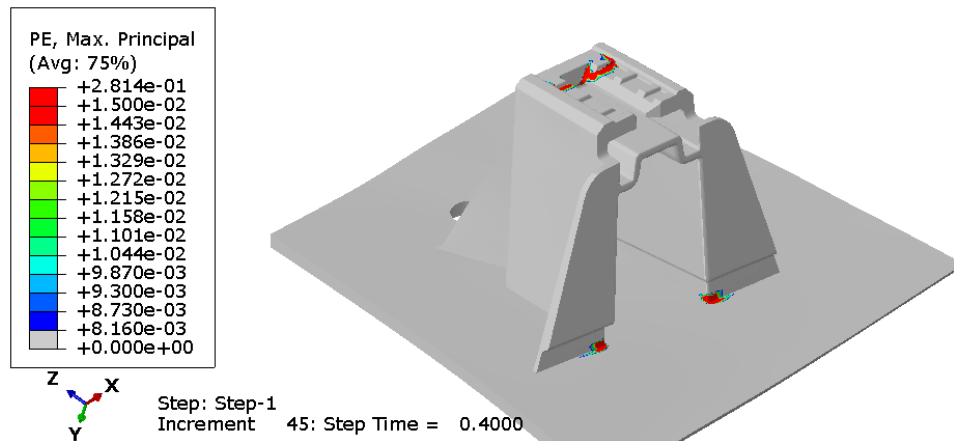


Figura 261 – Zonas de deformação plástica, referentes à 1ª iteração da 3ª fixação, para uma valor de força de 400 N após simulação segundo a direção de arrancamento.

A diminuição da altura da redução de espessura e a colocação de frisos na parte de trás do porta agrafa revelou ser uma opção viável, visto que se conseguiu eliminar as deformações plásticas observadas no modelo original na zona de trás (Figura 262).

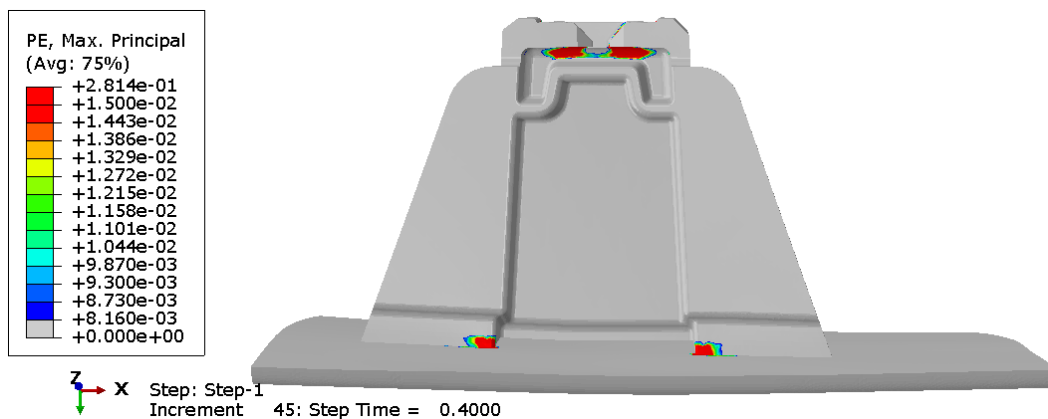


Figura 262 – Zonas de deformação plástica, referentes à 1ª iteração na direção de arrancamento, para uma valor de força de 400 N no interior do porta agrafa da 3ª fixação.

Na Figura 262 verifica-se que a alteração da dimensão do raio interior para 1 mm se revelou insuficiente. O aumento da dimensão deste raio está condicionado, já que pode entrar em interferência com o *clip*. Apesar deste facto, a deformação plástica registada no interior do porta agrafa não é facilmente visível com o *clip* incorporado, o que constitui um ponto a favor para validação da fixação. A adição de material na zona superior até ao patamar dos frisos de reforço, tal como visualizado na Figura 261, revelou-se insuficiente, com o material a ceder irreversivelmente para valores de força de 207 N, apenas 15 N a mais do que o suportado pelo modelo original nesta zona. Na Figura 263 demonstram-se os valores de PE para o início da cedência na zona superior do porta agrafa.

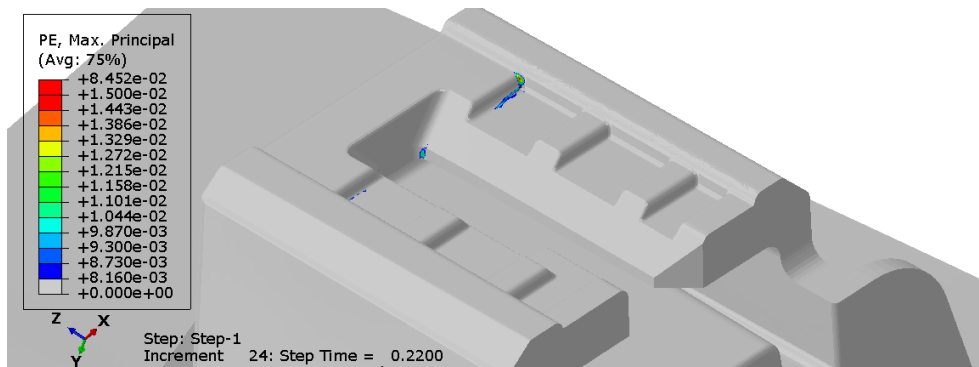


Figura 263 – Valores de PE para o início da plastificação, aproximadamente 200 N, na zona superior do porta agrafo da 3ª fixação.

3.8.1.3.2 2ª iteração

Face aos resultados das simulações numéricas ao arrancamento na 1ª iteração (capítulo 3.8.1.3.1.1), para aumentar a carga de cedência na zona frontal, nesta 2ª iteração procurou-se uma solução híbrida que consistiu em adicionar, a par com os dois frisos frontais a 90° da 1ª iteração, dois raios de 5 mm com uma saída de desmoldagem de 1,5° e uma espessura de 1 mm (identificados a amarelo na Figura 264).

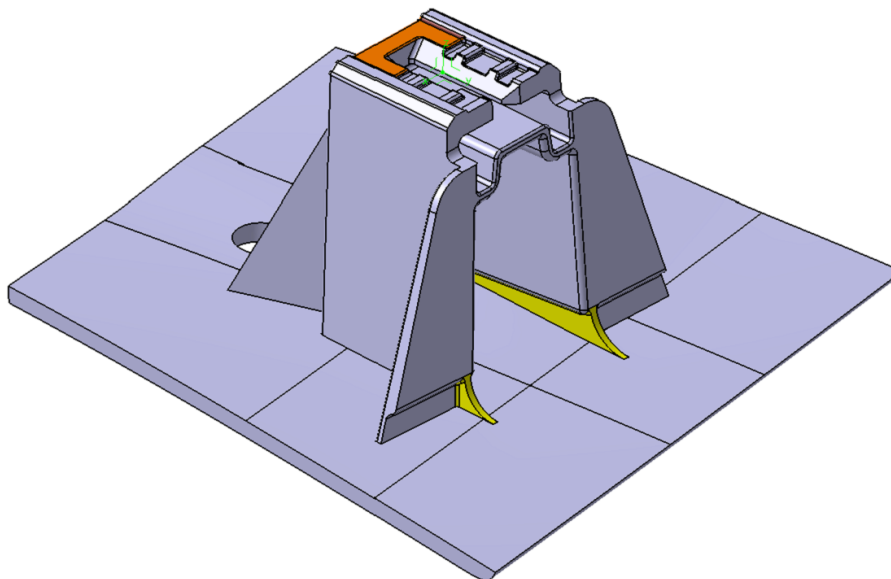


Figura 264 – Modificações referentes à 2ª iteração da 3ª fixação.

Na zona superior do porta agrafo, a partir dos resultados observáveis na Figura 263, aumentou-se a extensão do patamar das nervuras superiores em 2 mm, conforme identificado a cor laranja na Figura 265 e segundo o sentido indicado pelas setas.

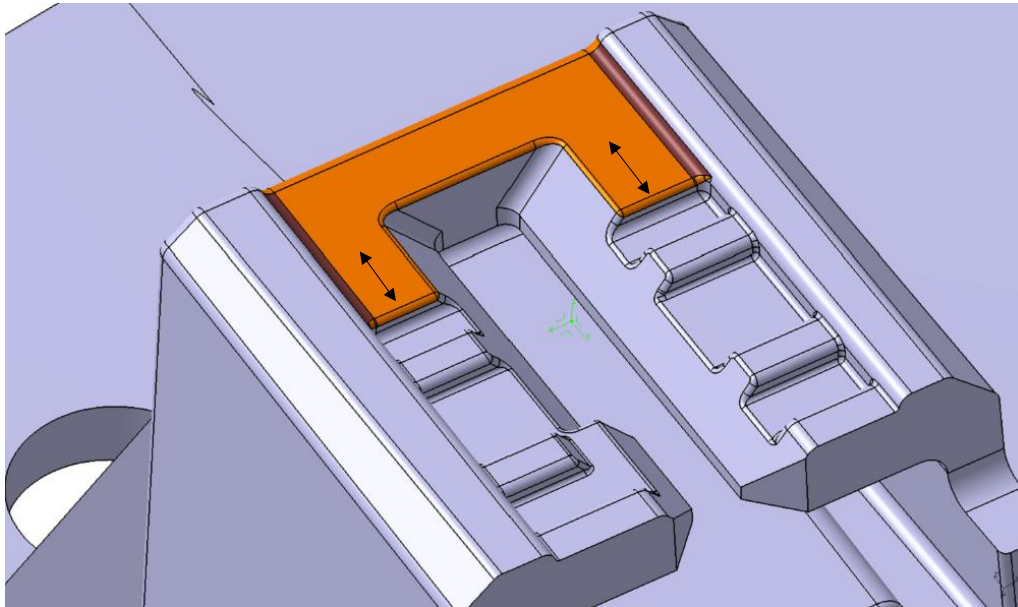


Figura 265 – Adição de material na zona superior do porta agravo da 3ª fixação relativamente à 2ª iteração.

Os raios identificados a cor castanha na Figura 265 tiveram a sua dimensão alterada de 0,25 mm para 0,5 mm.

3.8.1.3.2.1 Quantificação das melhorias obtidas – 2ª iteração

Simuladas as modificações referentes à 2ª iteração na direção ao arrancamento, observou-se uma melhoria na zona frontal inferior da fixação, entre os 20 e os 30 N, com a implementação da solução híbrida, o que permitiu aumentar a carga de início de plastificação na zona frontal para valores a rondar os 210 N (Figura 266).

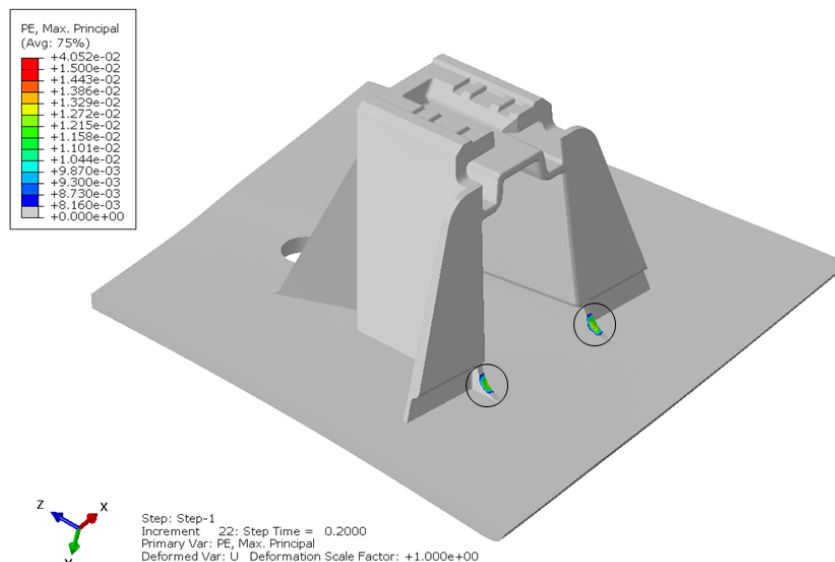


Figura 266 – Início da plastificação, referente à simulação ao arrancamento, na zona frontal inferior da 3ª fixação, a rondar os 210 N após implementação da solução híbrida na 2ª iteração.

A adição de 2 mm de material na zona superior permitiu aumentar a carga de início da deformação plástica para valores de força compreendidos entre os 235 N e os 240 N, altura em que se inicia a cedência na região do batente do *clip* (Figura 267).

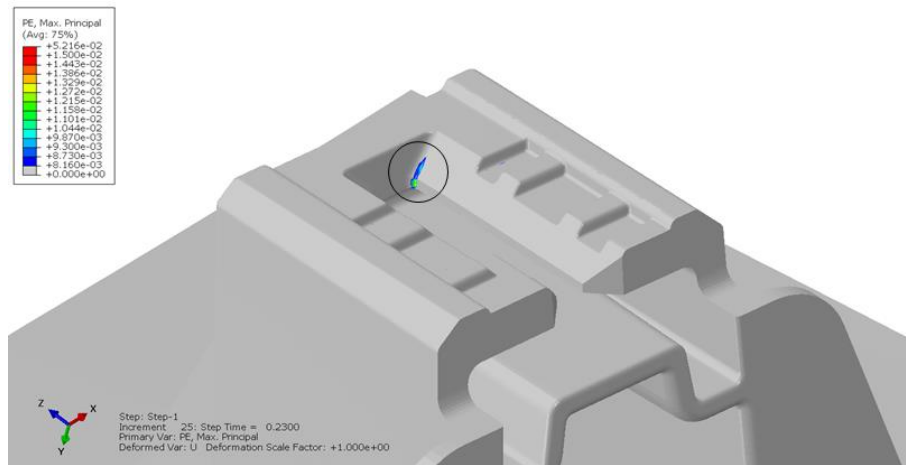


Figura 267 – Início da plastificação para valores de força de aproximadamente 240 N na zona do batente do *clip* com o porta agrafos referente à 2ª iteração da 3ª fixação.

3.8.1.3.3 3ª iteração

Apesar das duas anteriores iterações terem melhorado a resistência da fixação, ainda não se está dentro da gama de valores pretendida pela marca no que ao arrancamento diz respeito. Na 3ª iteração começou-se por acrescentar duas nervuras em cada friso disposto a 90° na zona frontal inferior da fixação (distinguidas a cor verde na Figura 268). Esta modificação tentou distribuir as tensões na zona frontal de forma a evitar a concentração de deformações registada na Figura 266.

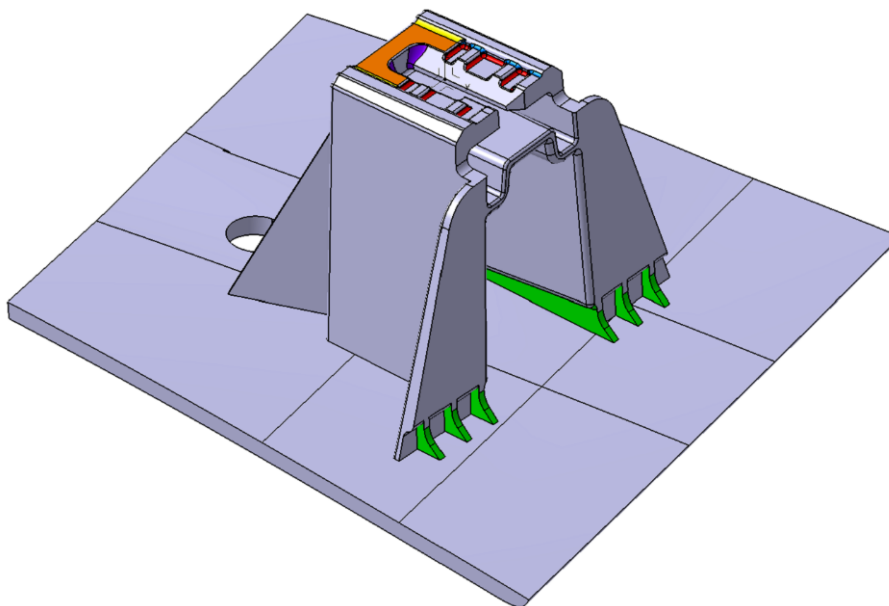


Figura 268 – Modificações referentes à 3ª iteração da 3ª fixação.

Na zona superior do porta agrafo, as principais alterações prenderam-se com a alteração das dimensões dos raios em relação à 2ª iteração para uma melhor distribuição de tensões (Figura 269).

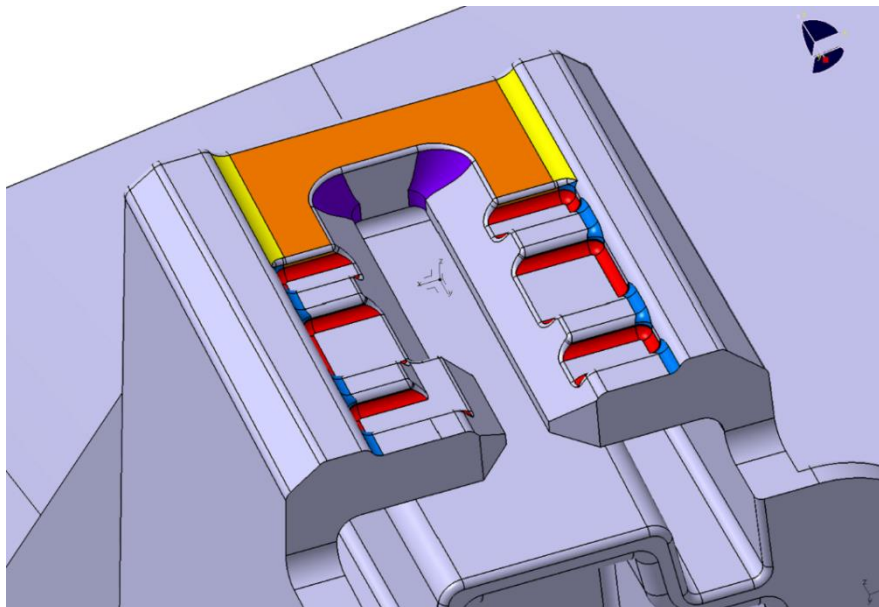


Figura 269 – Modificações implementadas na zona superior do porta agrafo da 3ª fixação referentes à 3ª iteração.

Os raios identificados a amarelo na Figura 269 viram as suas dimensões alteradas de 0,5 mm para 1 mm, enquanto os que estão identificados a vermelho e a azul passaram de 0,15 mm a 0,5 mm. Tendo em conta a localização do início da plastificação na zona superior do porta agrafo (ver Figura 267), implementaram-se raios a variar de 0,5 mm a 1,5 mm uma vez que estas regiões estão limitadas à alteração da dimensão, com risco de entrarem em interferência com o *clip*.

3.8.1.3.3.1 Quantificação das melhorias obtidas – 3ª iteração

Os resultados provenientes da simulação numérica ao arrancamento permitiram concluir que as adições das nervuras na zona frontal da fixação não trouxeram melhorias significativas em relação à 2ª iteração, visto que a zona onde se dá o início da plastificação continua a ser a mesma à identificada na 2ª iteração e para os mesmos valores de força (210 N). Os valores de deformação plástica registados nas zonas identificadas da Figura 270 rondam 1%.

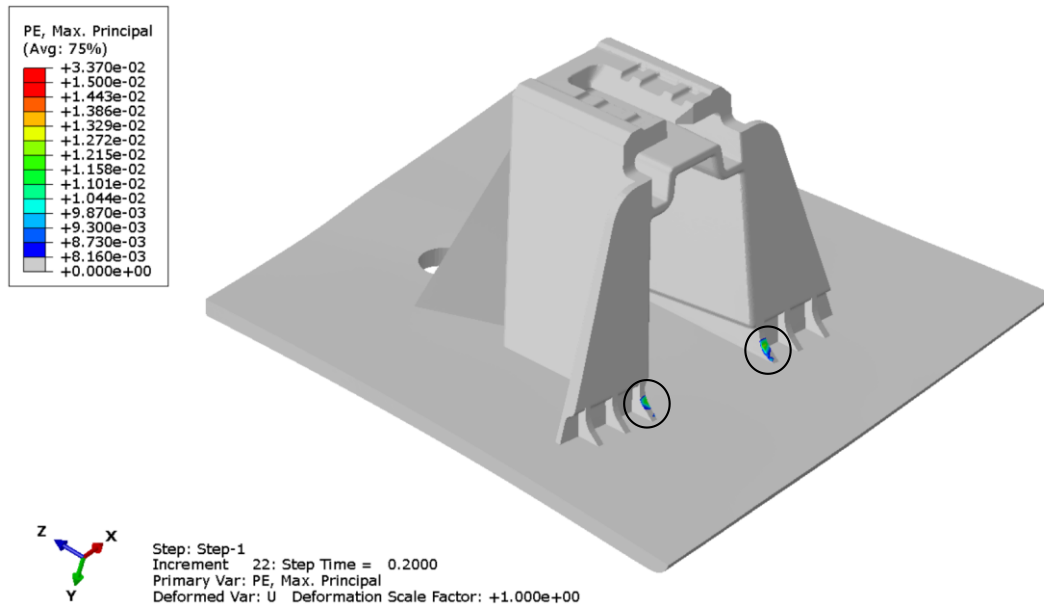


Figura 270 – Início da plastificação na zona frontal inferior da 3ª fixação a rondar os 210 N após simulação numérica ao arrancamento da 3ª iteração.

Com as modificações das dimensões dos raios na zona superior, a fixação suporta agora uma força de 255 N, aproximadamente mais 20 N em relação à 2ª iteração na região identificada na Figura 271, antes do início da plastificação.

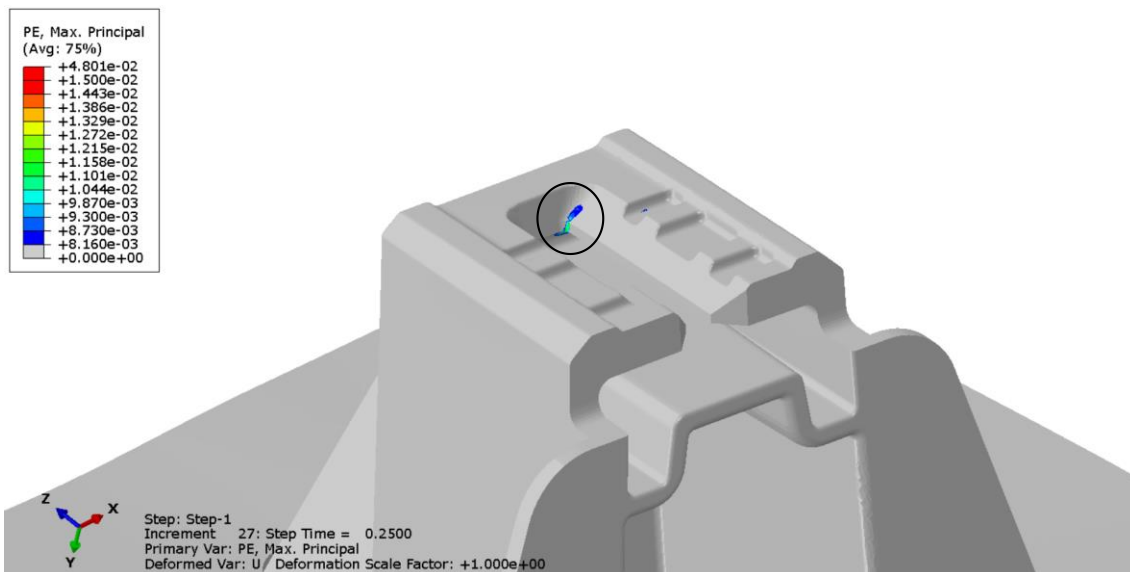


Figura 271 – Início da plastificação para valores de força de aproximadamente 250 N na zona do batente do *clip* com o porta agrafos da 3ª fixação após simulação numérica ao arrancamento da 3ª iteração.

Na Figura 272 apresentam-se as zonas que continuam a necessitar de ser melhoradas para atingir os requisitos impostos pelo cliente ao arrancamento.

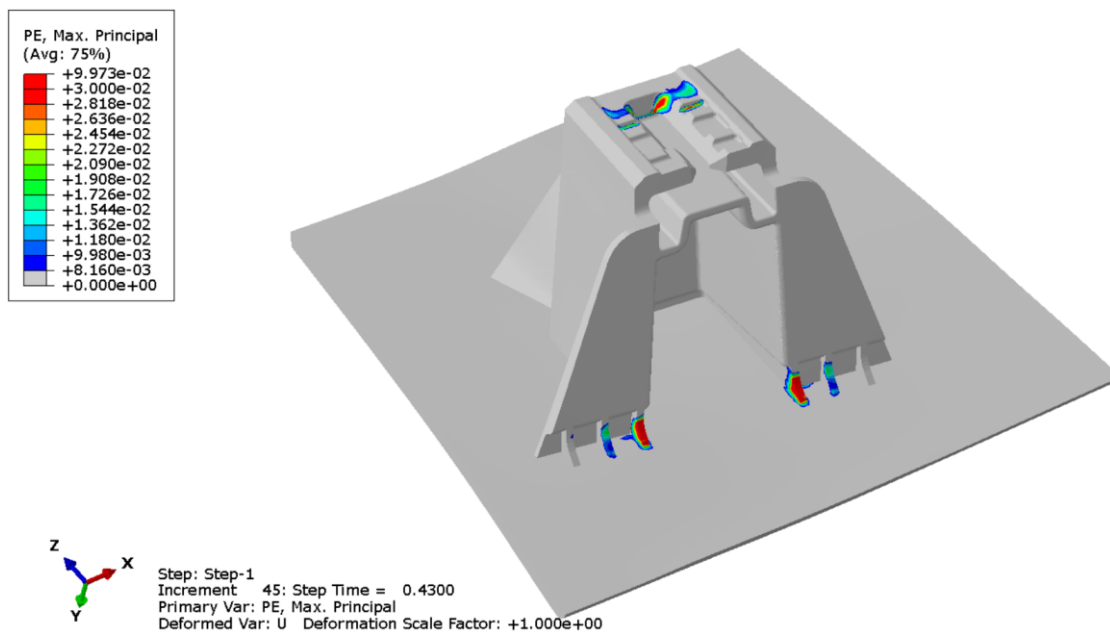


Figura 272 – Deformação inelástica ao arrancamento para uma força de 400 N no modelo da 3ª fixação após as modificações resultantes da 3ª iteração.

3.8.1.3.4 4ª iteração

Nesta fase, com base nos resultados obtidos das iterações anteriores, decidiu-se implementar na zona frontal da fixação uma abordagem diferente das que se teve até aqui e que se prendeu com a colocação de dois frisos dispostos a 45° (identificados a cor verde na Figura 273) em relação ao eixo de extração do movimento.

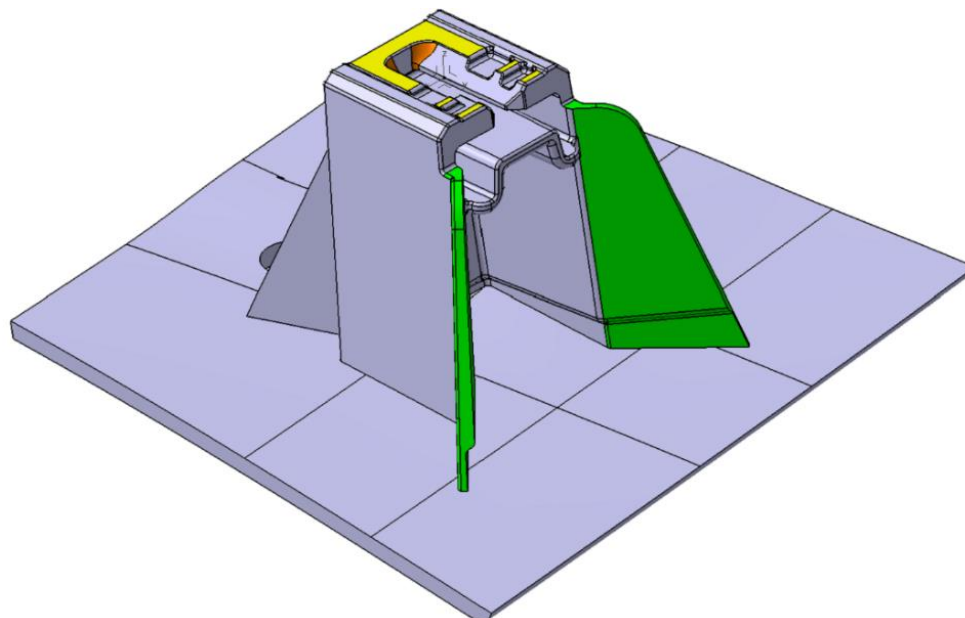


Figura 273 – Modificações referentes à 4ª iteração da 3ª fixação.

Com esta disposição de frisos pretende-se não se desfavorecer a fixação em nenhuma direção de ensaio (arrancamento e corte), o que acontece com a colocação de frisos a 90° (como os frisos a 90° estão na mesma direção da aplicação das forças ao corte, estes são mais resistentes do que na direção ao arrancamento). Os ângulos de saída e espessura destes frisos são iguais aos valores dos frisos frontais da 1ª iteração, sendo que a única diferença está na sua orientação.

Na zona superior do porta agrafo, a primeira modificação nesta iteração encontra-se relacionada com o aumento em altura de 0,25 mm de material nas zonas identificadas a amarelo na Figura 274, ficando estas ainda a 0,25 mm no plano de chapa. O “gap” de material existente na 3ª iteração entre o patamar de material distinguido a cor de laranja na Figura 269 e a nervura intermédia de reforço da zona superior foi nesta 4ª iteração preenchido.

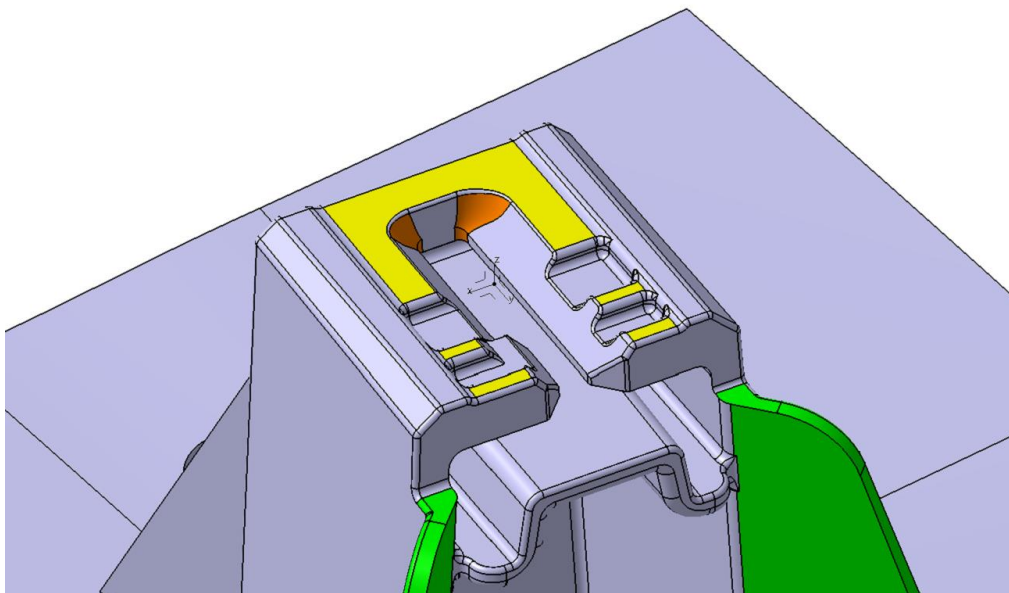


Figura 274 – Modificações na zona superior do porta agrafo da 3ª fixação relativamente à 4ª iteração.

O raio variável identificável a laranja na Figura 274 viu as suas dimensões a serem aumentadas de 0,5 mm até 2 mm.

3.8.1.3.4.1 Quantificação das melhorias obtidas – 4ª iteração

As modificações implementadas na 4ª iteração revelaram melhorias significativas na zona frontal do porta agrafo, com o início da plastificação a ocorrer nesta zona para aproximadamente 300 N de sollicitação (entre os 300 N e os 310 N) (Figura 275).

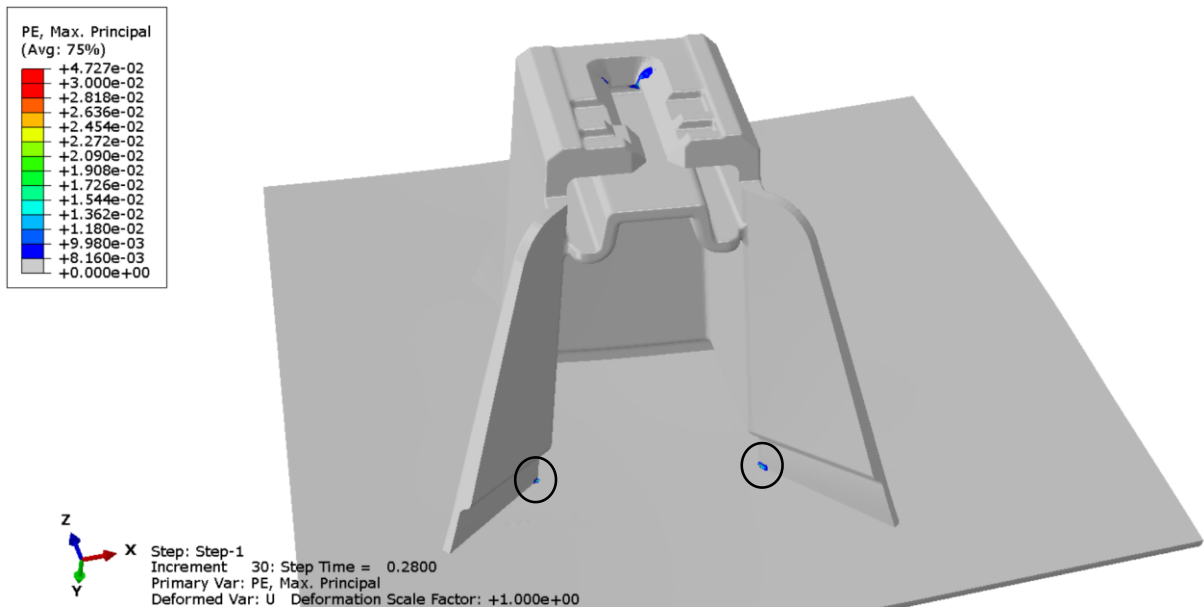


Figura 275 – Início da plastificação na zona frontal inferior da 3ª fixação a rondar os 300 N após simulação numérica ao arrancamento da 4ª iteração.

Na zona superior do porta agrafos, com o aumento de 0,25 mm de material no patamar superior das nervuras de reforço (Figura 274), consegue-se fazer com que este aguarde mais 50 N, em relação à iteração anterior, o que incrementa o início da plastificação para valores a rondar os 300 N (Figura 276).

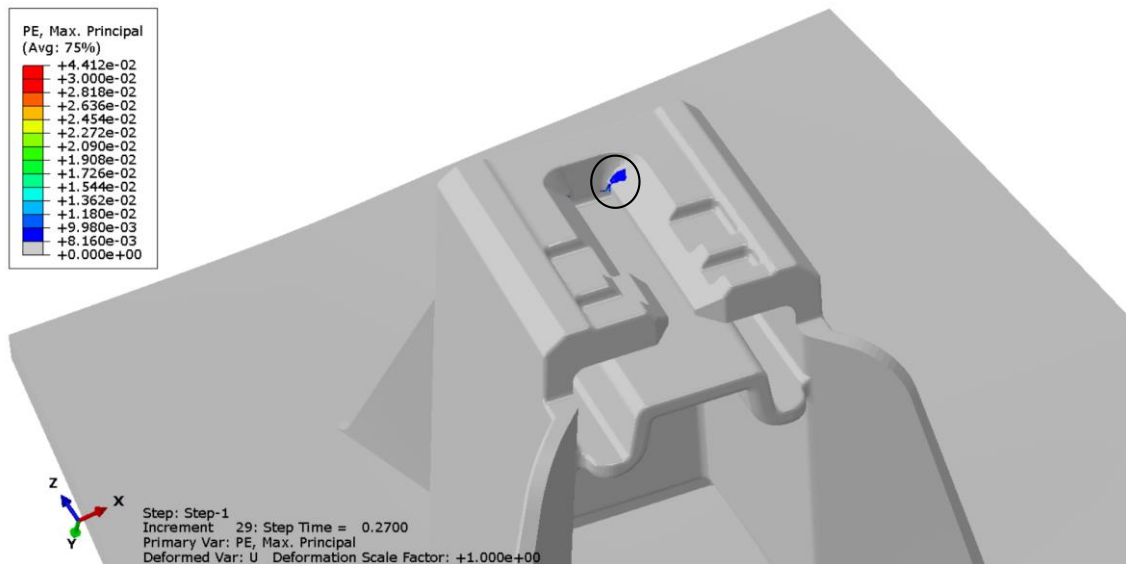


Figura 276 – Início da plastificação para valores de força de aproximadamente 300 N na zona do batente do *clip* com o porta agrafos da 3ª fixação após simulação numérica ao arrancamento da 4ª iteração.

Na Figura 277 apresentam-se as regiões que devem ser melhoradas para um valor de força de 400 N na direção ao arrancamento.

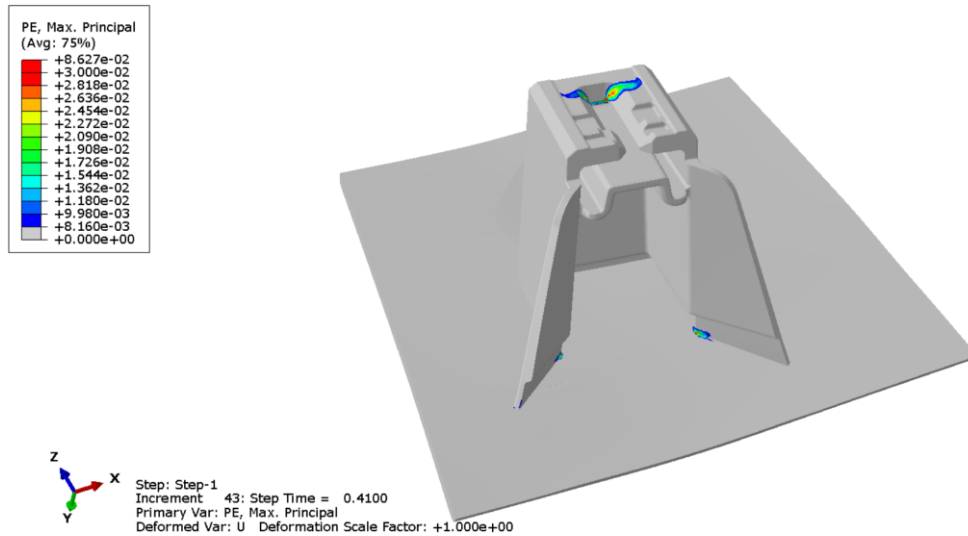


Figura 277 – Zonas plastificadas para um valor de força de 400 N na direção ao arrancamento no porta agrafo da 3ª fixação relativamente à 4ª iteração.

3.8.1.3.5 5ª iteração

As principais alterações a nível de geometria em relação à iteração anterior relacionaram-se com a redução da largura dos frisos dispostos a 45° para valores a rondar os 10 mm, de forma a reduzir o excesso de material destes na 4ª iteração. A inclinação destes foi alterada para 10°, anteriormente a 20° (Figura 278).

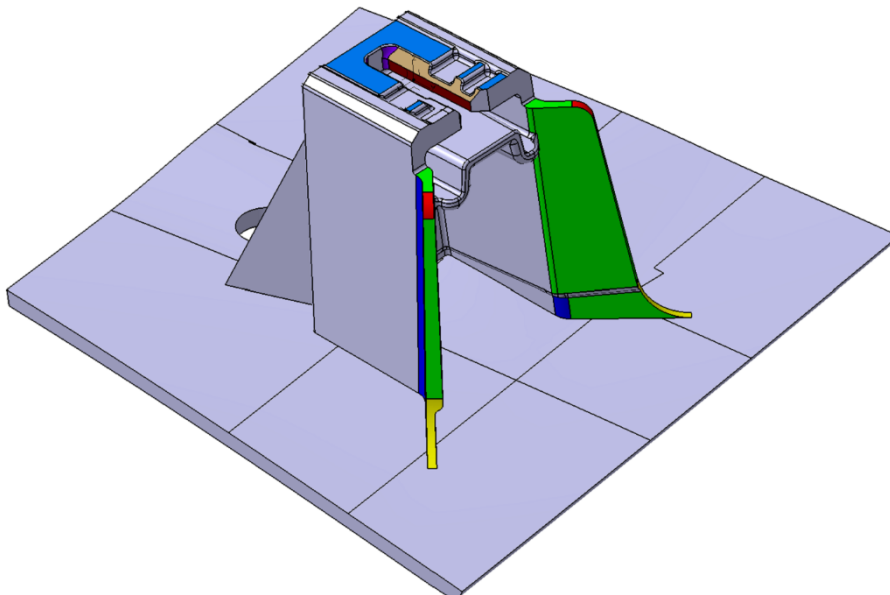


Figura 278 – Modificações referentes à 5ª iteração da 3ª fixação.

Nas zonas frágeis identificadas na Figura 275, aumentaram-se os raios para 2 mm, (identificados a cor azul-escuro na Figura 279), anteriormente a 0,5 mm, de forma a reduzir a concentração de tensões nesta região e consequentemente as deformações

inelásticas. Nas faces frontais dos dois frisos dispostos a 45° colocaram-se dois raios de 6,5 mm, identificados a cor amarela na Figura 279, para auxiliar na redução de concentração de tensões, e alterou-se a dimensão do raio identificado a cor vermelha na Figura 279 de 5 mm para 2,5 mm.

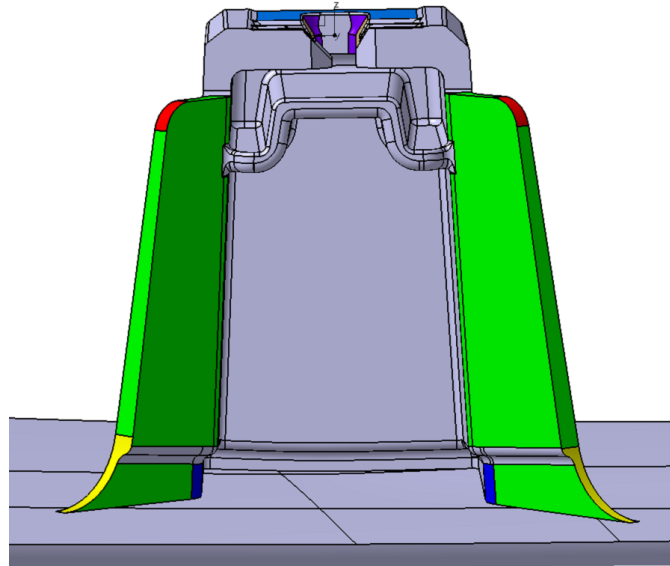


Figura 279 – Vista frontal do porta agravo da 3ª fixação referente à 5ª iteração.

Em relação à zona superior do porta agravo, face aos valores de deformação plástica observados na Figura 277, para a 5ª iteração aumentou-se em 0,15 mm a espessura do patamar, como identificado a cor azul na Figura 280, ficando este a 0,15 mm do plano de chapa.

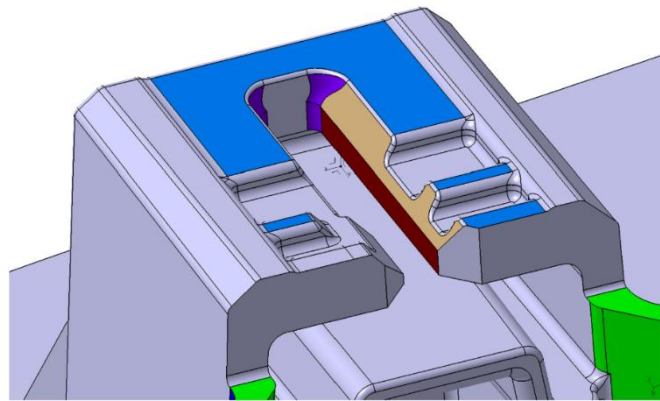


Figura 280 – Modificações na zona superior do porta agravo da 3ª fixação relativamente à 5ª iteração.

Ainda com o intuito de reforçar a região superior do porta agravo estudou-se a possibilidade de aumentar a inclinação da face identificada a cor castanho-claro na Figura 280. Para este efeito, foi necessário verificar a folga existente entre esta face e o *clip* de forma a não haver risco de interferência (Figura 281).

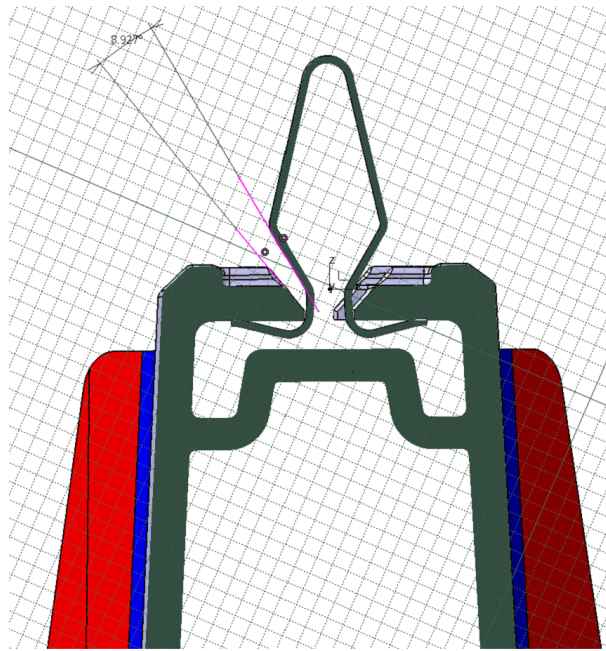


Figura 281 – Vista em corte do *clip* inserido no porta agrafo para verificação da folga entre o *clip* e a face inclinada do porta agrafo.

Pela observação da Figura 281 verifica-se a existência de margem de manobra para aumentar a inclinação da face distinguida a castanho-claro na Figura 280. Entre a face do *clip* e a face do porta agrafo existe uma diferença de aproximadamente 9° ($8,92^\circ$). A adição de material nesta zona foi efetuada de forma que a inclinação da face identificada a castanho-claro fique paralela à face do *clip*. Na Figura 282 demonstra-se a montagem sem interferências com as modificações referidas.

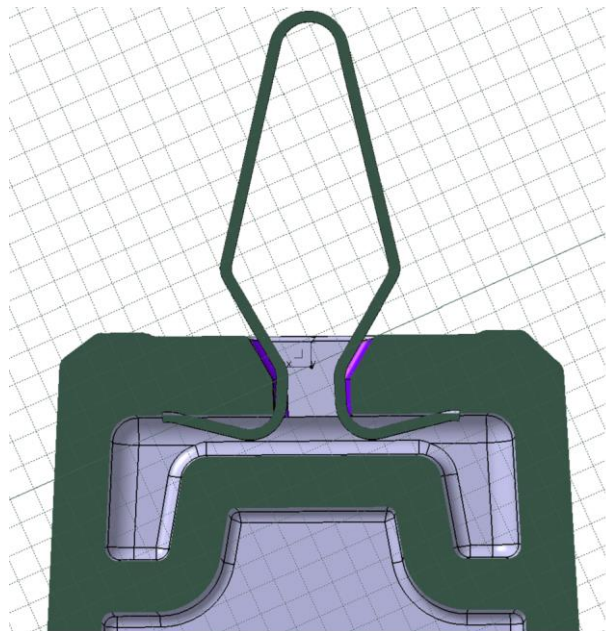


Figura 282 – Vista em corte da 3ª fixação após a alteração da inclinação da face do porta agrafo.

3.8.1.3.5.1 Quantificação das melhorias obtidas – 5ª iteração

As modificações geométricas realizadas na 5ª iteração não revelaram melhorias no que toca à resistência ao arrancamento do porta agrafó. Na zona frontal inferior do porta agrafó a deformação plástica começa a sentir-se para o mesmo valor de força registado na 4ª iteração (300 N), embora a sua localização seja diferente daquela identificada na Figura 275, como pode ser observado na Figura 283. Na zona superior do porta agrafó, apesar do aumento da dimensão do raio variável e da inclinação de ambas as faces do porta agrafó junto ao *clip*, não houve melhorias em termos de resistência do porta agrafó, com a deformação plástica a dar-se na mesma região identificada na 4ª iteração (Figura 276) por volta dos 300 N.

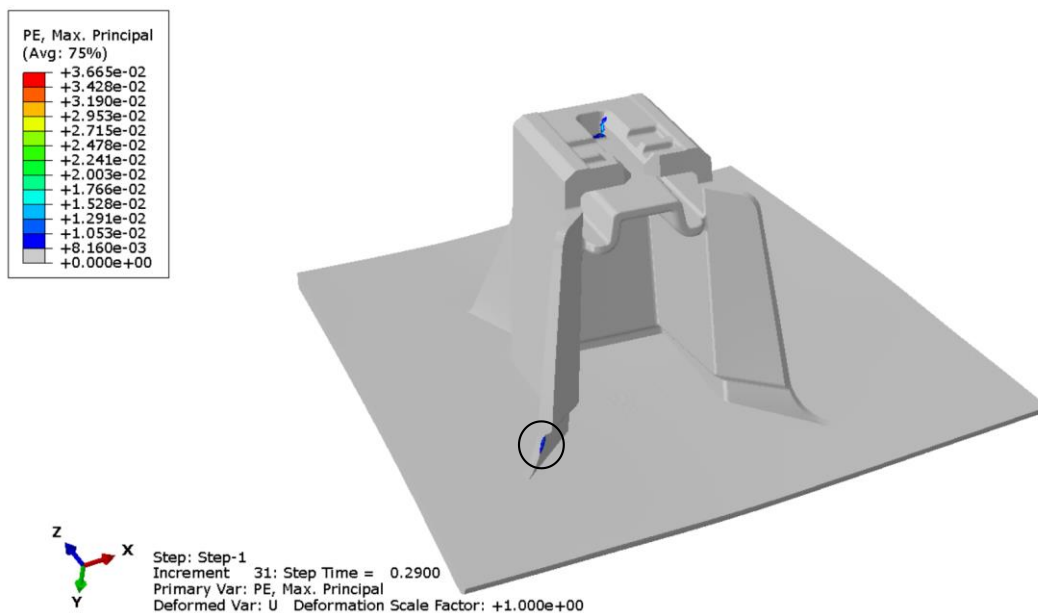


Figura 283 – Valores de deformação plástica registados para uma força de 300 N ao arrancamento no porta agrafó da 3ª fixação relativamente à 5ª iteração.

Nesta fase, sem haver muita mais margem de manobra para fazer melhorias na zona superior do porta agrafó, decidiu-se realizar as simulações em ambas as direções do corte para perceber como a fixação se comporta com as modificações realizadas até à 5ª iteração, apesar de ainda não ter sido possível atingir as especificações definidas pelo cliente na direção ao arrancamento (400 N).

Segundo a direção B, para um valor de força mínimo que a fixação deve suportar (120 N), apresentam-se na Figura 284 as zonas a serem melhoradas.

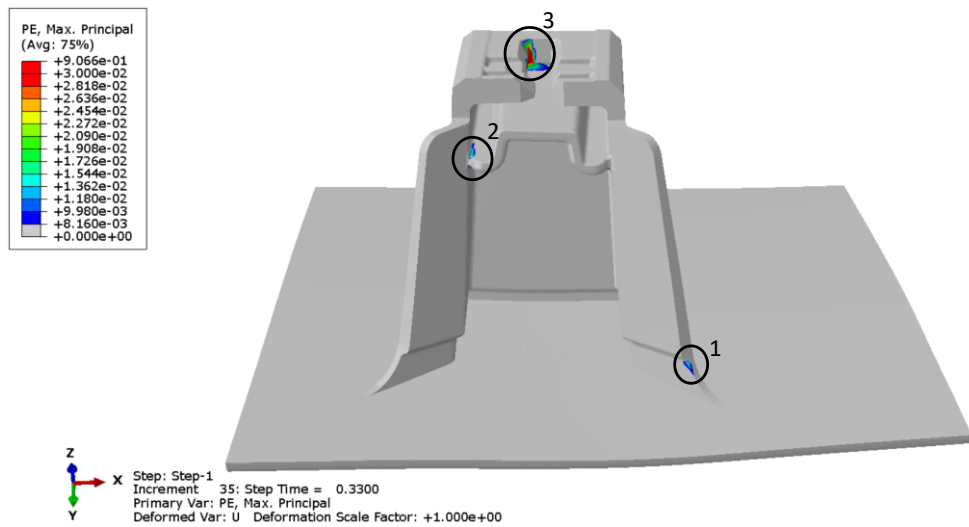


Figura 284 – Zonas deformadas irreversivelmente para um valor de força mínimo de 120 N, após simulação numérica na direção B da 3ª fixação, relativamente à 5ª iteração.

A região 1, assinalada na Figura 284, suporta uma força de 100 N, antes de começar a ceder, enquanto a cedência na zona 2 tem início nos 80 N. Os altos valores de deformação na zona 3 devem-se ao impacto do *clip* durante a aplicação da força lateral. Na Figura 285 destacam-se as zonas traseiras do porta agrafos a serem alvo de estudo.

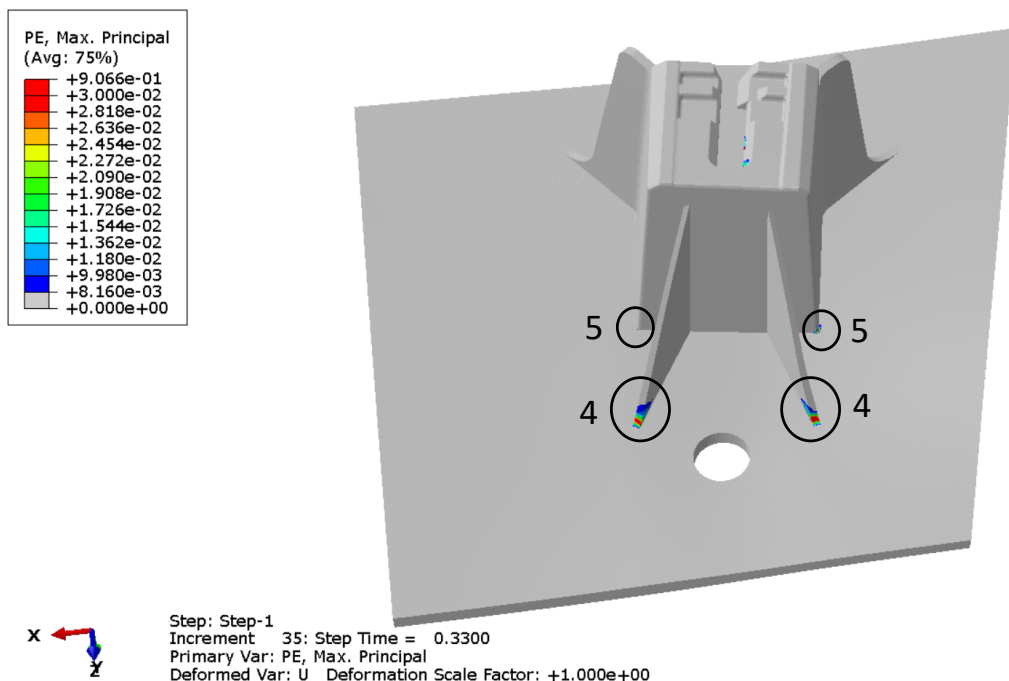


Figura 285 – Zonas traseiras deformadas irreversivelmente para um valor de força mínimo de 120 N, após simulação numérica na direção B da 3ª fixação, relativamente à 5ª iteração.

As zonas 4 assinaladas na Figura 285 suportam um valor de 60 N antes do início da cedência, enquanto os raios identificados com o número 5 aguentam valores de força a rondar os 80 N.

Na direção C, as zonas plastificadas para um valor de força de 120 N são comuns às identificadas na direção B, apenas em lados opostos (Figura 286).

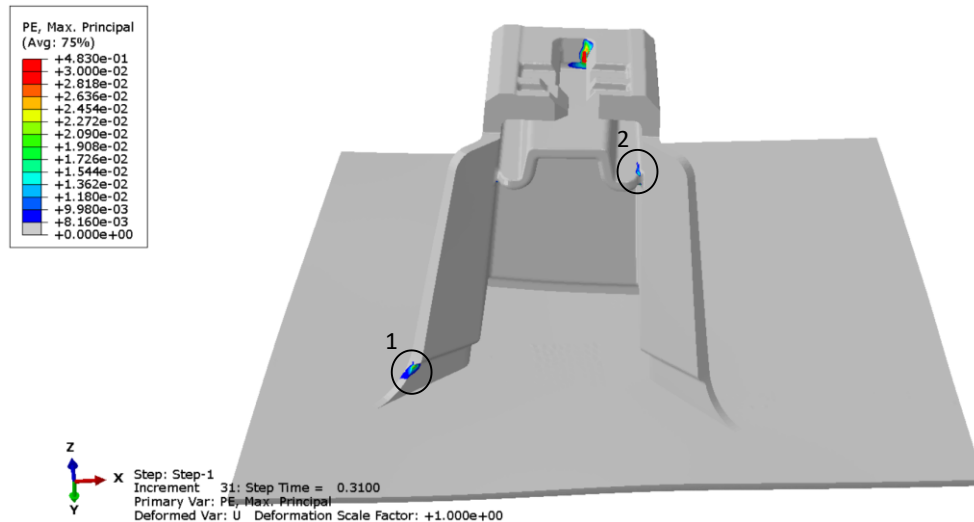


Figura 286 – Zonas deformadas irreversivelmente para um valor de força mínimo de 120 N, após simulação numérica na direção C da 3ª fixação, relativamente à 5ª iteração.

A zona 1 inicia a plastificação para valores de força a rondar os 100 N, enquanto na zona 2 este evento inicia perto dos 90 N. Os raios dos frisos traseiros do porta agrafos (zonas 3 na Figura 287) iniciam a plastificação aos 50 N e o raios identificado na zona 4 aos 80 N.

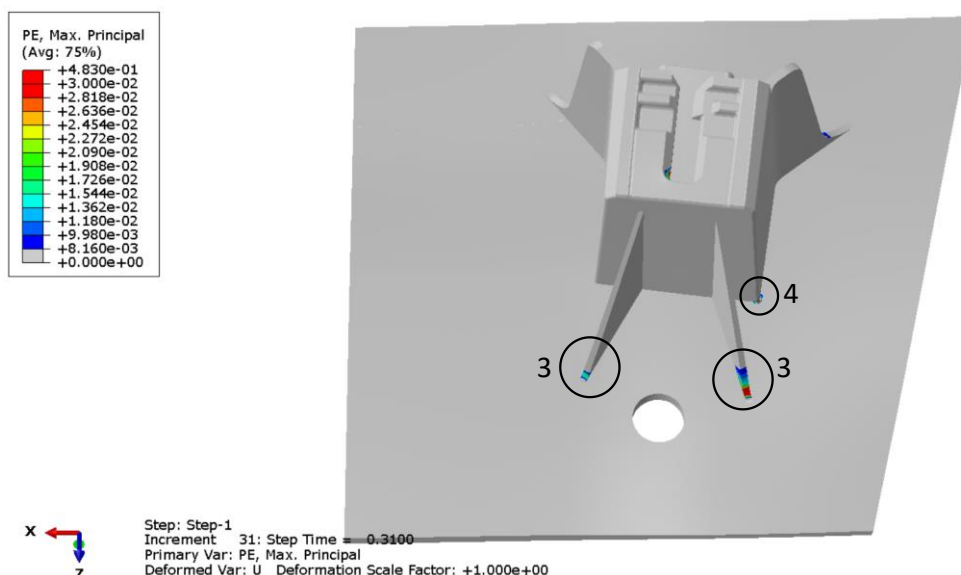


Figura 287 – Zonas traseiras deformadas irreversivelmente para um valor de força mínimo de 120 N, após simulação numérica na direção C da 3ª fixação, relativamente à 5ª iteração.

3.8.1.3.6 6ª iteração

A 6ª e última iteração visou obter uma solução a nível de geometria que permitisse cumprir as especificações do cliente em todas as direções de ensaio com base nos dados numéricos que se têm vindo a obter. Na Figura 288 apresentam-se as modificações referentes à 6ª iteração.

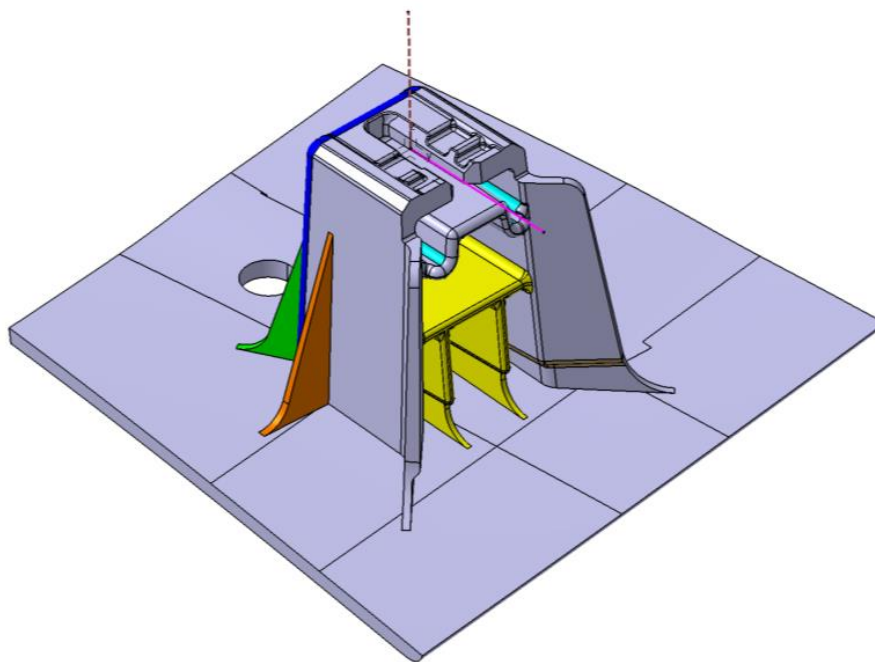


Figura 288 – Modificações referentes à 6ª iteração da 3ª fixação.

A primeira modificação implementada para mitigar as deformações plásticas na zona inferior dos frisos frontais dispostos a 45° (identificadas na Figura 283 da 5ª iteração para arrancamento e na Figura 284 e Figura 286 para corte) relacionou-se com a colocação de uma estrutura no interior do porta agrafos (identificada a cor amarela na Figura 288). Com esta modificação é expectável dar mais estabilidade e resistência ao porta agrafos em todas as direções de ensaio. Alguns aspetos importantes a ter em consideração com esta implementação prendem-se, primeiramente, com a necessidade de manter uma espessura que não permita a origem de chupados (neste caso a espessura pode estar compreendida entre 0,9 mm/1,0 mm) na zona de contato entre a estrutura e o componente. Em segundo lugar, pretende-se também garantir um espaçamento de pelo menos 3 mm entre paredes (identificadas com as setas na Figura 289) de forma a não fragilizar o aço responsável pela extração do formato interior do porta agrafos.

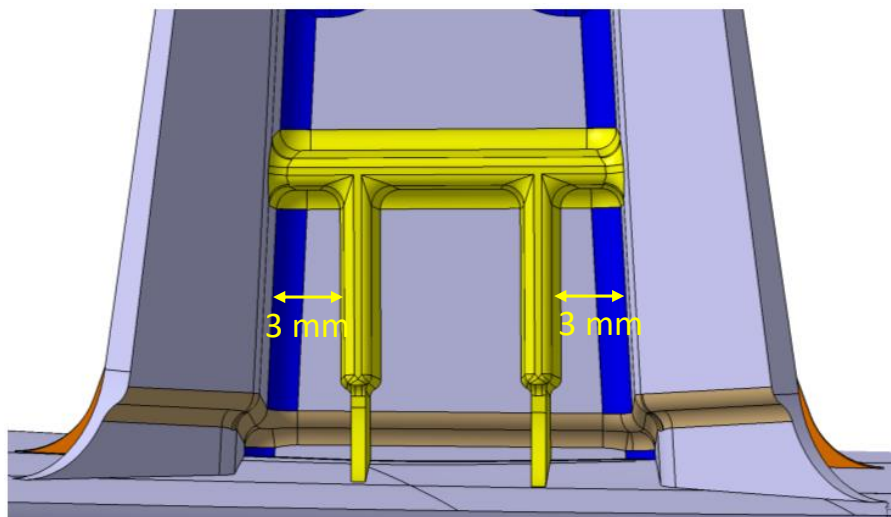


Figura 289 – Espaçamento mínimo a ser garantido entre paredes para evitar fragilidades no aço.

Os raios da redução de espessura, identificados a castanho-claro na Figura 290, passaram de uma dimensão de 0,5 mm para 1 mm, e os raios internos identificados a cor azul-escura na Figura 290 foram aumentados de uma dimensão de 0,5 mm para 1,5 mm devido às deformações plásticas registadas na zonas 2 da Figura 284 e Figura 286, segundo as direções B e C, respetivamente.

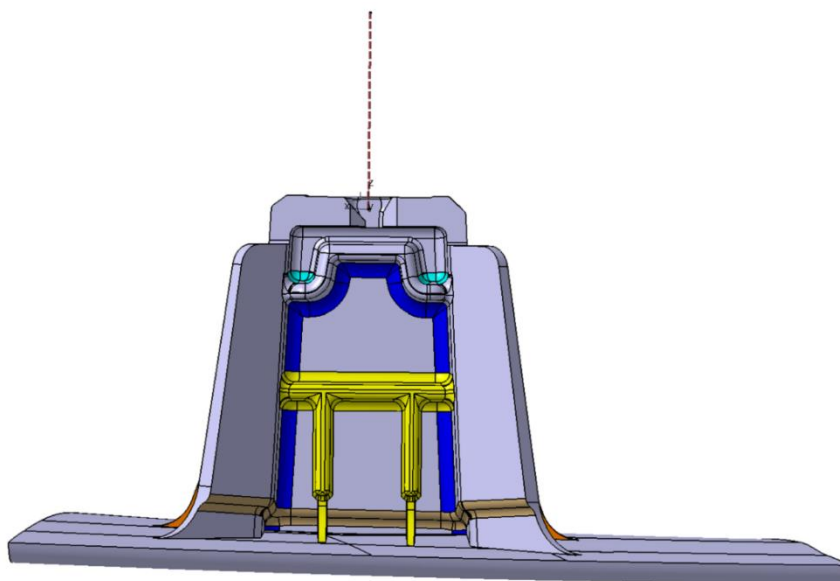


Figura 290 – Vista frontal da zona interior do porta agrafo da 3ª fixação referente à 6ª iteração.

Para a zona exterior do porta agrafo, pensou-se em adicionar dois frisos laterais (distinguidos a cor laranja na Figura 291). Esta adição auxiliará a fixação nas direções ao corte.

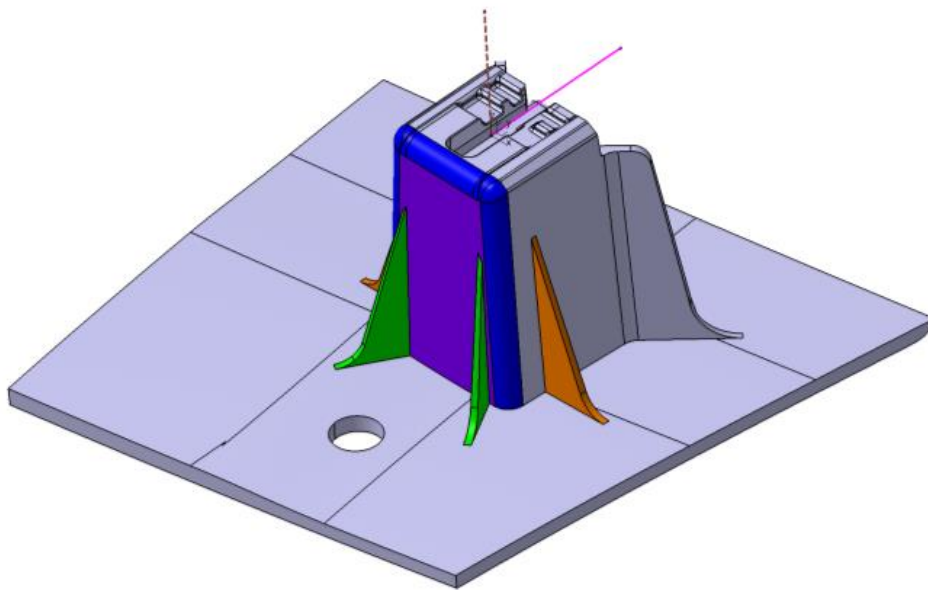


Figura 291 – Vista de trás do porta agrafos da 3ª fixação referente à 6ª iteração.

O raio identificado a cor azul-escura (Figura 291) foi aumentado de 1,5 mm para 2,5 mm com o intuito de colmatar as deformações registadas nas zonas 4 e 5 das Figura 287 e Figura 285. Além do aumento do raio, também se aumentou a inclinação da face identificada a cor roxa na Figura 291 em 1,5°, em relação ao porta agrafos original. A mesma inclinação foi dada na parede interior, de forma a manter a espessura constante do porta agrafos (Figura 292).

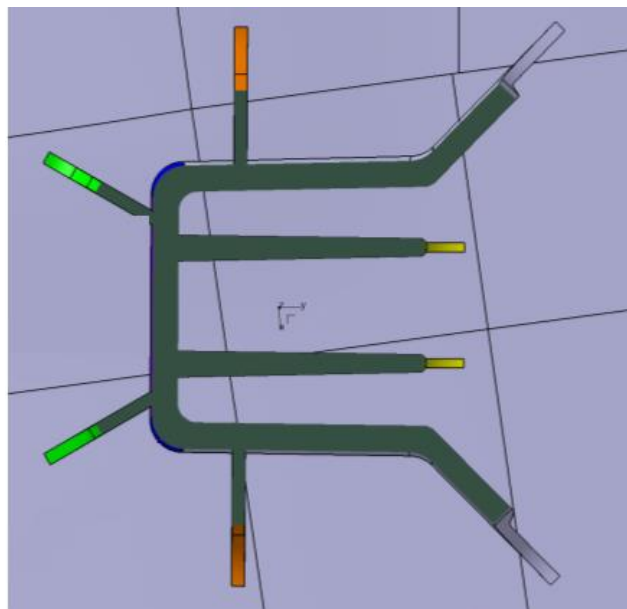


Figura 292 – Vista superior seccionada para demonstrar o detalhe da espessura do porta agrafos.

A última modificação prendeu-se com o aumento do ângulo, de 45° para 60°, entre os frisos traseiros (distinguidos a cor verde na Figura 291), e a diminuição da sua altura em relação às iterações anteriores, isto porque estes estavam a sofrer fenómenos de

encurvadura devido às forças laterais, em ambas as direções ao corte. As três últimas modificações visaram diminuir as deformações plásticas registadas nos frisos traseiros (ver Figura 285 e Figura 287).

Na Figura 293 demonstra-se, para esta última iteração, a análise de desmoldagem segundo o eixo y para $0,25^\circ$.

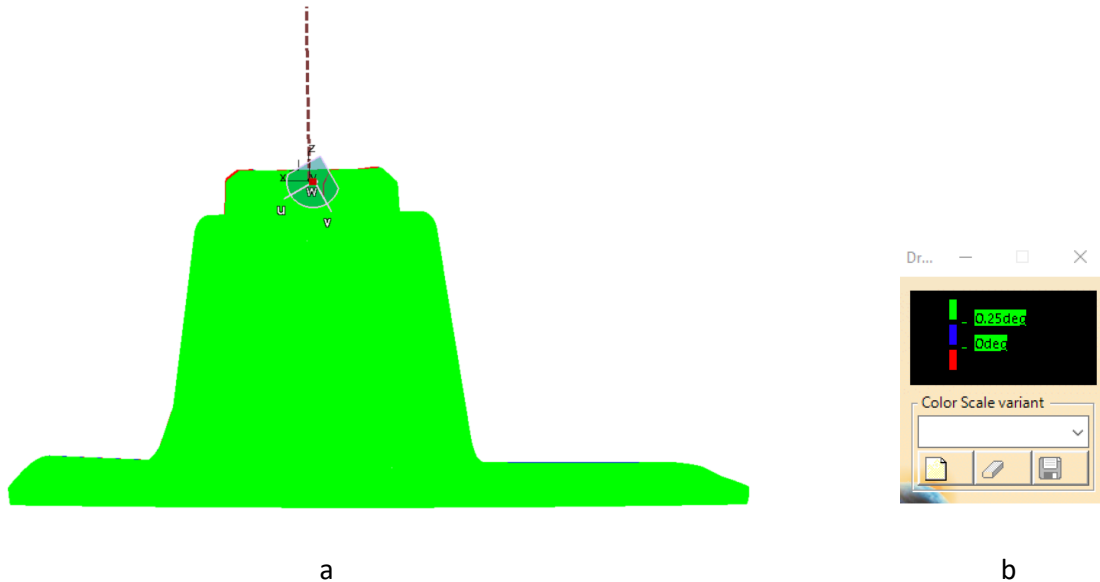


Figura 293 – Análise de desmoldagem: a) segundo o eixo y; b) parâmetros da análise.

A análise de desmoldagem segundo o eixo z, e também para $0,25^\circ$, é apresentada na Figura 294.

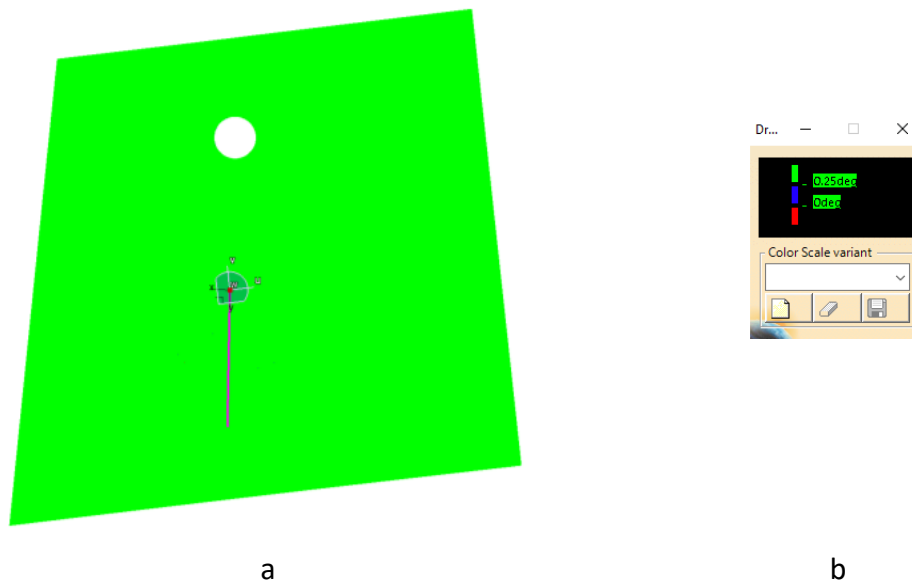


Figura 294 – Análise de desmoldagem: a) segundo o eixo z; b) parâmetros da análise.

3.8.1.3.6.1 Quantificação das melhorias obtidas – 6ª iteração

No que diz respeito ao arrancamento, a colocação do reforço interno não trouxe melhorias significativas quanto à carga de início de plastificação. Além da zona identificada na Figura 283 (relativamente à 5ª iteração), os raios colocados no reforço interno iniciam a plastificação a rondar os 310 N, tal como pode ser observado pela Figura 295.

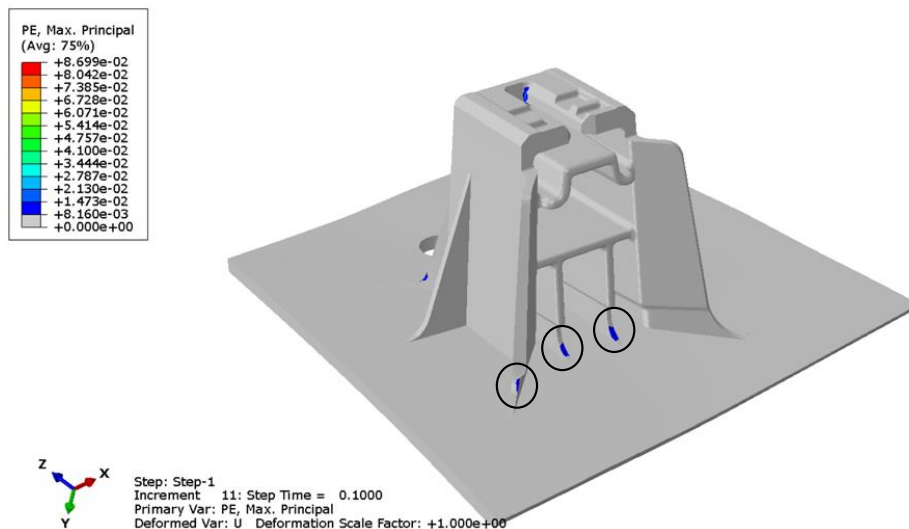


Figura 295 – Valores de deformação plástica registados para uma força de 310 N ao arrancamento no porta agrafos da 3ª fixação relativamente à 6ª iteração.

Para uma das direções ao corte (direção C), a plastificação inicia nos frisos de trás do porta agrafos para valores de força entre os 100 e 110 N (Figura 296).

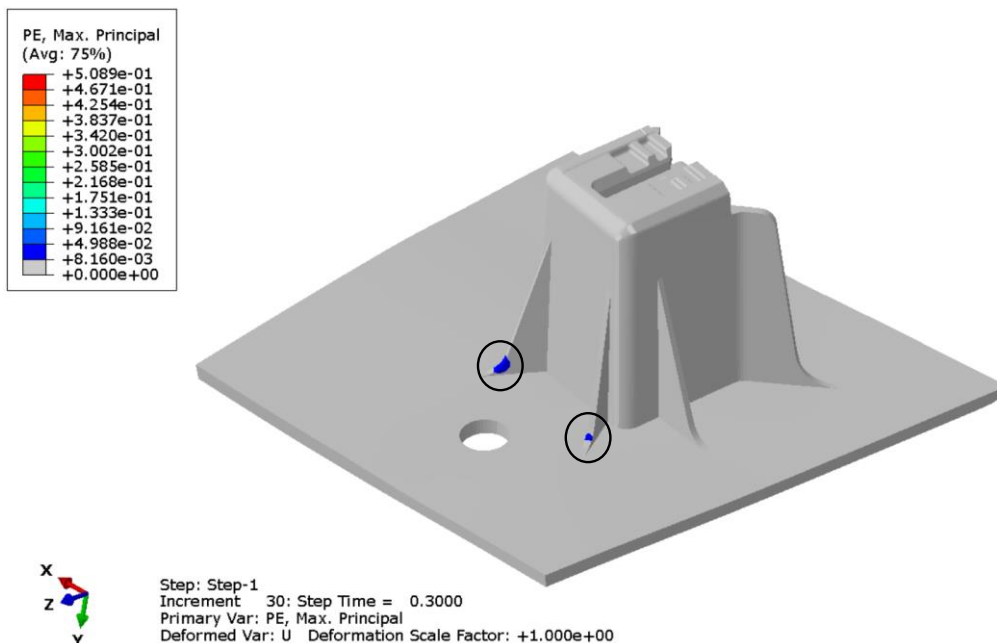


Figura 296 – Zonas traseiras deformadas irreversivelmente para um valor de força entre os 100-110 N, após simulação numérica na direção C da 3ª fixação, relativamente à 6ª iteração.

Na zona frontal do porta agravo, o valor de força pela qual as zonas identificadas na Figura 297 iniciam a plastificação é de 130 N.

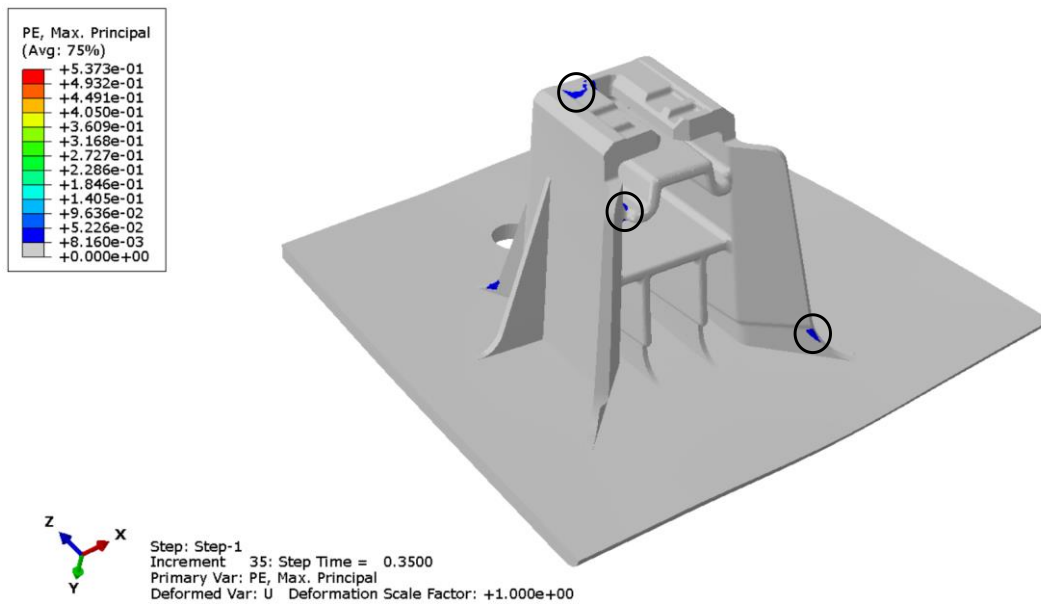


Figura 297 – Zonas deformadas irreversivelmente para um valor de força de 130 N, após simulação numérica na direção C da 3ª fixação, relativamente à 6ª iteração.

3.8.2 Proposta de geometrias finais

Neste capítulo são resumidas as evoluções que as fixações foram alvo até à última proposta de geometria final, e apresentados os valores de força suportados por cada iteração em cada direção de ensaio.

3.8.2.1 1ª fixação

Para a 1ª fixação, apresentam-se na Figura 298 as duas evoluções em relação ao modelo original.

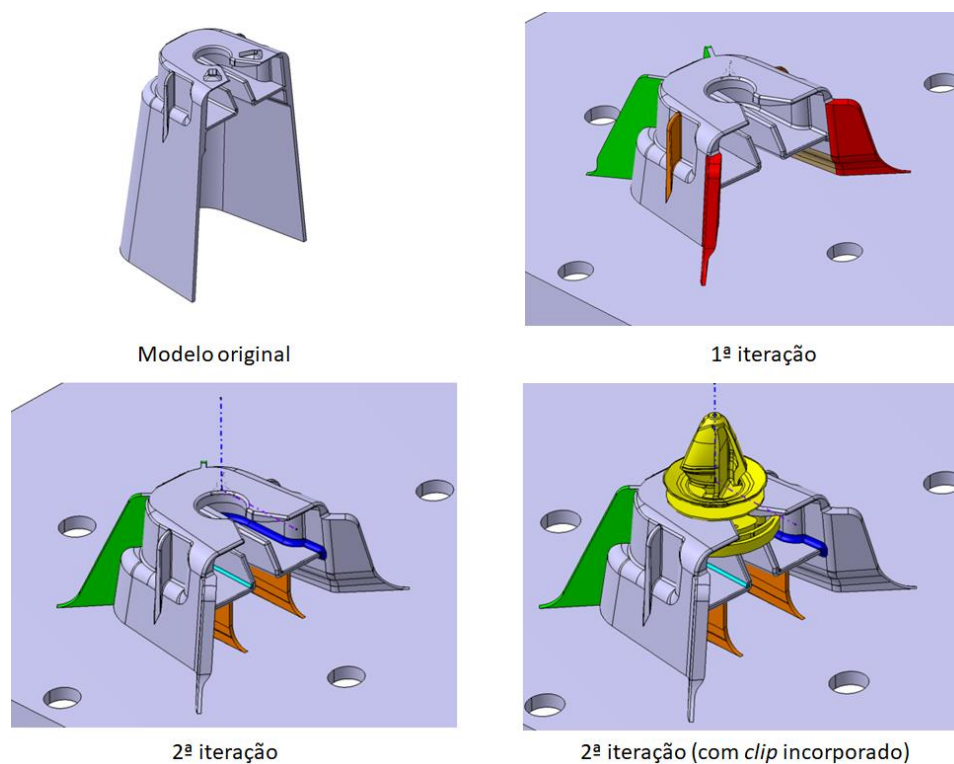


Figura 298 - Evolução da geometria da 1ª fixação.

Na Tabela 47 resumem-se os valores de força máxima suportada por cada iteração, nas direções de ensaio ao arrancamento e em ambas as direções ao corte, antes do início da plastificação.

Tabela 47 - Resumo dos valores de força mínima com margem de segurança suportados pelas diferentes iterações, antes do início da plastificação, relativamente à 1ª fixação.

Direção de ensaio	Caderno de encargos	Modelo de ensaio	Força mínima	Observações
Direção A	200 N	Modelo original	180-200 N	Figura 221 e Figura 222
Direção B	120 N		80-90 N	Figura 223
Direção C	120 N		80-90 N	---
Iteração 1	200 N	Direção A	210 N	Figura 244
Iteração 2	200 N	Direção A	250 N	Figura 253
	120 N	Direção B	---	---
	120 N	Direção C	---	---

Pela análise dos valores contidos na Tabela 47, conclui-se que a nível de arrancamento a fixação do modelo original está praticamente em conformidade com os valores pretendidos pela Renault, em relação aos valores de resistência que a fixação deve suportar segundo a direção A. Com a implementação da 2ª iteração consegue-se aumentar a força mínima suportada pela fixação para os 250 N com uma margem de segurança de 2.

3.8.2.2 2ª fixação

No que se refere à 2ª fixação, apresenta-se na Figura 299 a única evolução em relação ao modelo original.

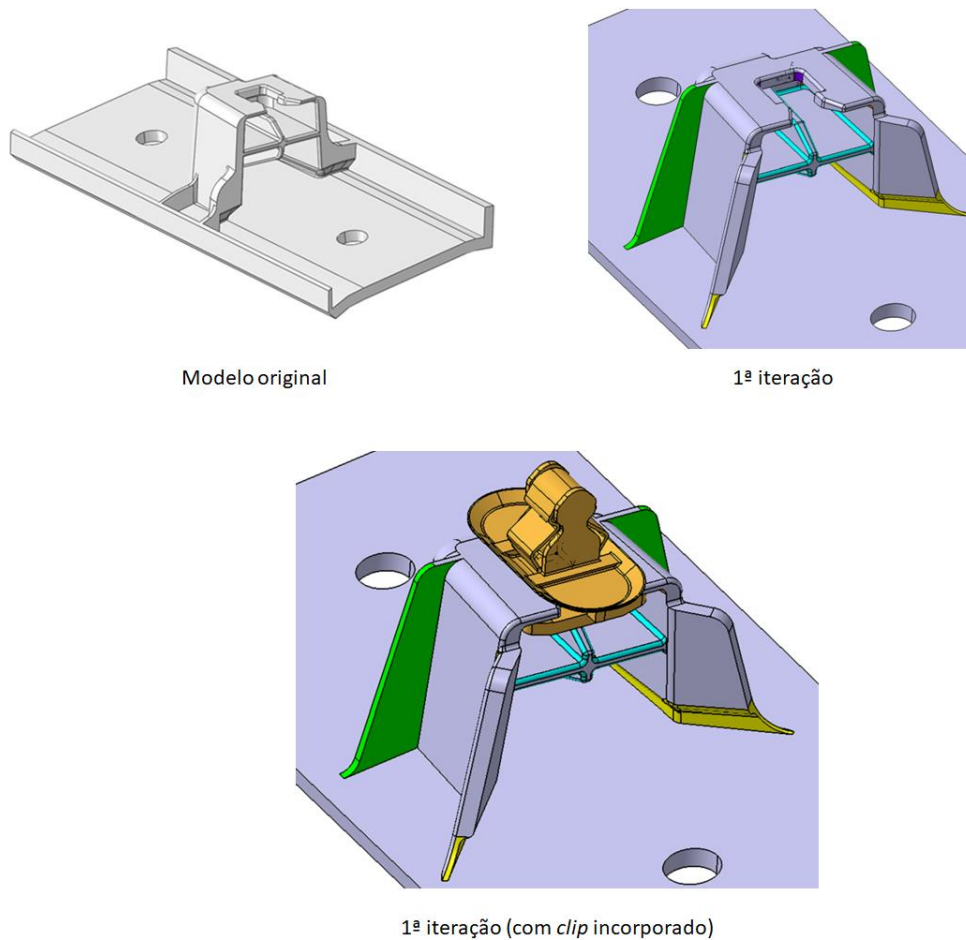


Figura 299 - Evolução da geometria da 1ª fixação.

Na Tabela 49 resumem-se apenas os valores de força mínimos suportados do modelo original, nas direções de ensaio ao arrancamento e em ambas as direções ao corte, antes do início da plastificação.

Tabela 48 - Resumo dos valores de força mínima com margem de segurança suportados pelas diferentes iterações, antes do início da plastificação, relativamente à 2ª fixação.

Direção de ensaio	Caderno de encargos	Modelo de ensaio	Força mínima	Observações
Direção A	200 N	Modelo original	180-190 N	Figura 221 e Figura 222
Direção B	120 N		170-185 N	---
Direção C	120 N		160-180 N	---

3.8.2.3 3ª fixação

Relativamente à 3ª fixação, apresentam-se na Figura 300 as diferentes evoluções até à proposta de geometria final (6ª iteração).

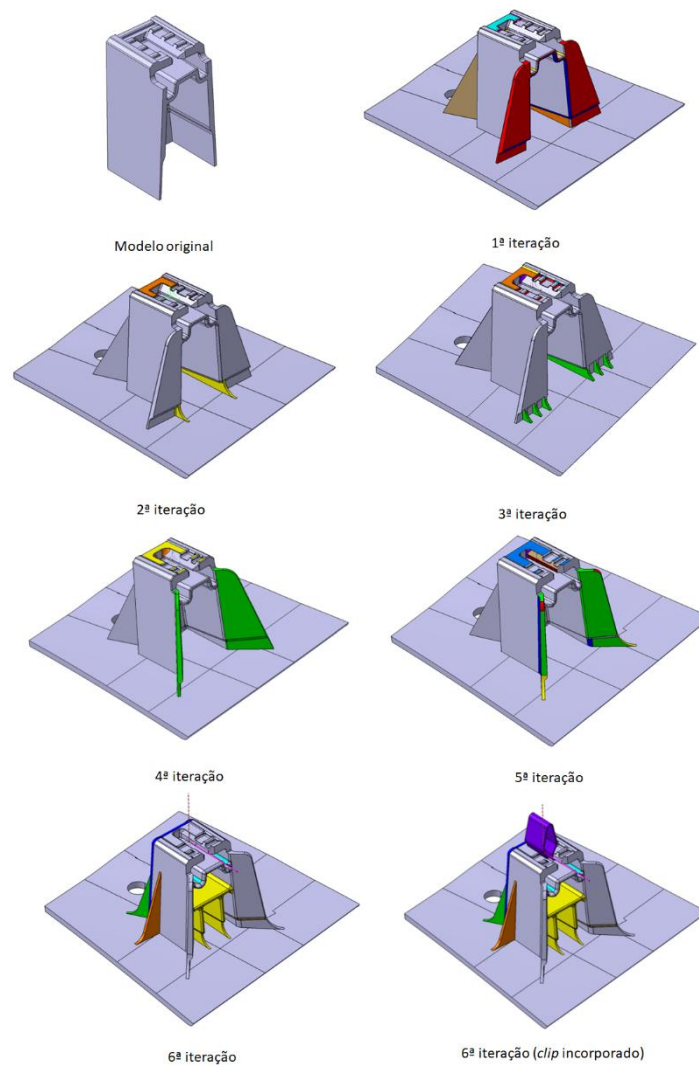


Figura 300 – Evolução da geometria da 3ª fixação.

Na Tabela 49 resumem-se os valores de força mínimos suportados por cada iteração, nas direções de ensaio ao arrancamento e em ambas as direções ao corte, antes do início da plastificação.

Tabela 49 - Resumo dos valores de força mínima com margem de segurança suportados pelas diferentes iterações, antes do início da plastificação, relativamente à 3ª fixação.

Direção de ensaio	Caderno de encargos	Modelo de ensaio	Força máxima	Observações
Direção F1	400 N	Modelo original	150-160 N	Figura 231
Direção B	120 N		70-80 N	Zona 1 da Figura 236
Direção C	120 N		50 N	Zona 1 da Figura 238
Direção F1	400 N	Iteração 1	180-190 N	Zona frontal da Figura 261.
Direção F1	400 N	Iteração 2	210 N	Figura 266
Direção F1	400 N	Iteração 3	210 N	Figura 270
Direção F1	400 N	Iteração 4	300-310 N	Figura 275 e Figura 276
Direção F1	400 N	Iteração 5	300 N	Figura 283
Direção B	120 N		60-80 N	Figura 285
Direção C	120 N		50-80 N	Figura 286
Direção F1	400 N	Iteração 6	310 N	Figura 295
Direção B	120 N		100-110 N	---
Direção C	120 N		100-110 N	Figura 296

Analisando os dados da Tabela 49 é notória uma melhoria significativa dos valores de força máximos suportados pela 6ª iteração em relação ao modelo original. Na direção ao arrancamento, conseguiu-se o dobro da força máxima inicialmente suportada pela fixação, principalmente na passagem da 3ª iteração para a 4ª iteração. No que toca às direções do corte, conseguiu-se melhorias na casa dos 50 N com a 6ª iteração em relação ao modelo original. Ainda assim, os valores registados para a última iteração encontram-se abaixo do que está estabelecido pelo caderno de encargos, em função da margem de segurança de 1,6 que se estabeleceu. Sem a margem de segurança, e utilizando o valor de deformação na cedência estabelecido pelo fornecedor do

material no capítulo 3.7.2.3 de 3,40 % (aproximadamente 4 vezes mais em comparação com a deformação na cedência real do material calculada), consegue-se obter valores de força máximos para a 6ª iteração ao arrancamento entre 410 N e 435 N e entre os 180 N e os 190 N nas direções ao corte.

3.9 Simulações numéricas dinâmicas

Este capítulo serve para expor o efeito que o *mass scaling* possui nas simulações dinâmicas. O *mass scaling* é um parâmetro incorporado no módulo “Step” do Abaqus (Figura 301) que permite definir o tempo de incremento mínimo da simulação. Quando bem utilizado, este efeito é benéfico a nível de poupança de tempo de simulação.

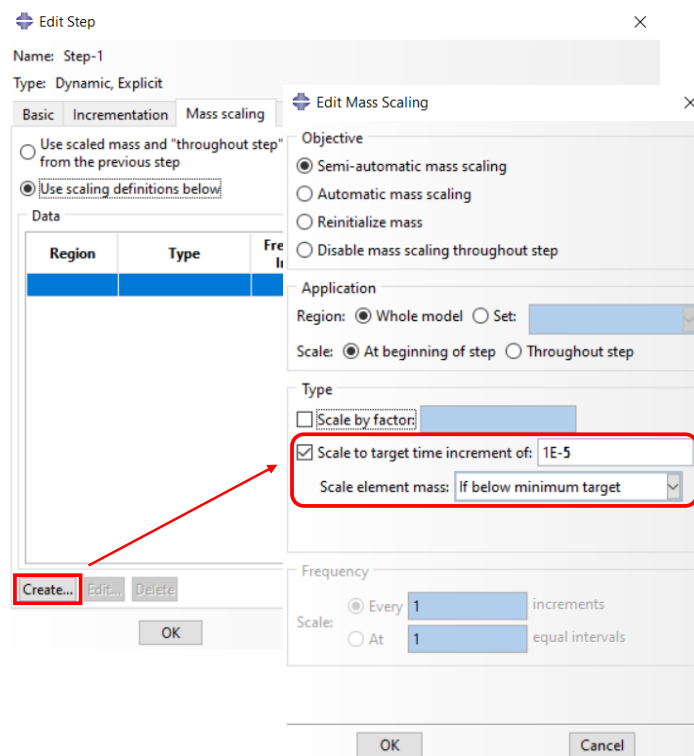


Figura 301 - Mass scaling no Abaqus.

Este parâmetro deve ser utilizado com precaução, visto que implica a alteração da densidade em algumas zonas do modelo, o que contradiz a natureza física do material. O uso indevido deste parâmetro leva muitas vezes a soluções instáveis que se fazem sentir nos resultados (ruído na solução final). Este estudo apenas foi realizado para a 1ª fixação.

3.9.1 Modelos materiais de dano

Neste tipo de simulação, além da introdução da resposta elástico plástica do material, exposta no capítulo 3.7.2, foi necessário introduzir modelos de dano para materiais dúcteis. Segundo o manual do Abaqus, no que toca à modelação de modelos de dano é necessário fornecer ao *software* dois parâmetros [113]:

- O critério de inicialização de dano;
- A resposta evolutiva do dano.

O critério de inicialização do dano é o que permite definir o início da rotura no modelo e é dado através das três variáveis demonstradas na Figura 302.

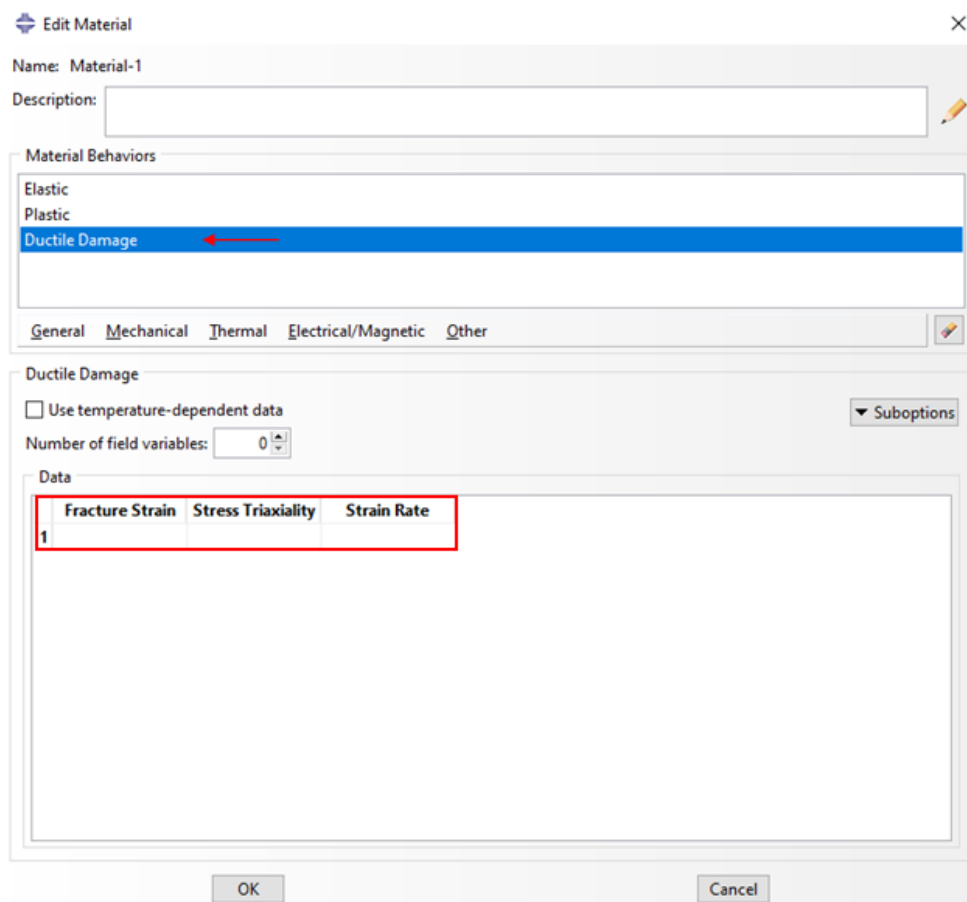


Figura 302 - Parâmetros a ser definidos para a inicialização do dano no Abaqus.

Para a resposta evolutiva do dano, deve ser determinado um dos dois parâmetros apresentados na Figura 303.

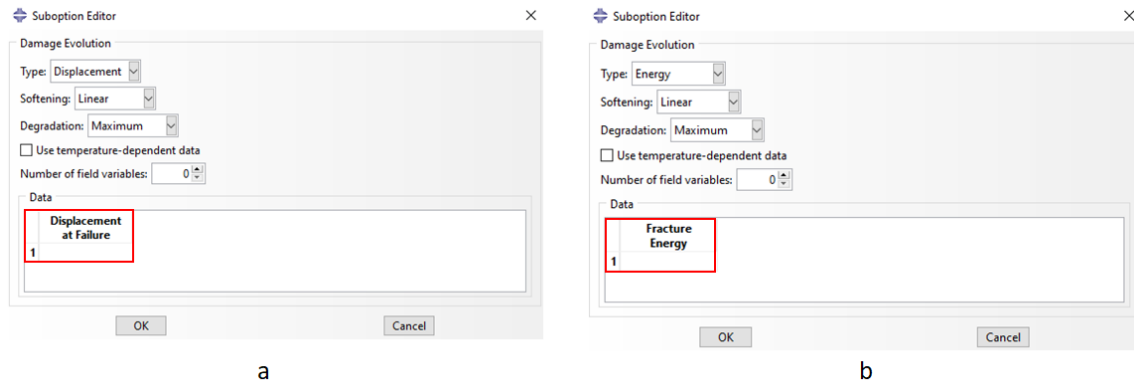


Figura 303 - Parâmetros relacionados com a resposta evolutiva do dano: a) deslocamento na rotura; b) energia na fratura.

A deformação equivalente no início da rotura (*Fracture strain*), $\bar{\epsilon}_0^{pl}$, é calculada através da equação (24).

$$\bar{\epsilon}_0^{pl} = \frac{\sigma_{y0}}{E}, \quad (24)$$

onde σ_{y0} corresponde ao ponto máximo de tensão a partir do qual as propriedades do material começam a degradar e E corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal (até o ponto de inicialização do dano, o módulo elasticidade mantém-se praticamente inalterável, enquanto após este ponto o módulo de elasticidade sofre alterações). Relativamente ao estado triaxial de tensão, η , este é um parâmetro relacionado com o estado de tensão a que o material foi sujeito no momento de ensaio e é determinado a partir da equação (25)

$$\eta = -\frac{p}{q} = \frac{1}{3} \times \frac{(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})}{\sigma_{mises}}, \quad (25)$$

onde p diz respeito à pressão hidroestática, q faz referência às tensão equivalente de von Mises e σ_{xx} , σ_{yy} e σ_{zz} alude às tensões principais. Na tabela da Figura 304 apresentam-se as equações para determinação das tensões de von Mises dependendo do estado de tensão ([118]).

State of stress	Boundary conditions	von Mises equations
General	No restrictions	$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2] + 3(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)}$
Principal stresses	$\sigma_{12} = \sigma_{31} = \sigma_{23} = 0$	$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$
General plane stress	$\sigma_3 = 0$ $\sigma_{31} = \sigma_{23} = 0$	$\sigma_v = \sqrt{\sigma_{11}^2 - \sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{22}^2 + 3\sigma_{12}^2}$
Principal plane stress	$\sigma_3 = 0$ $\sigma_{12} = \sigma_{31} = \sigma_{23} = 0$	$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}$
Pure shear	$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ $\sigma_{31} = \sigma_{23} = 0$	$\sigma_v = \sqrt{3} \sigma_{12} $
Uniaxial	$\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ $\sigma_{12} = \sigma_{31} = \sigma_{23} = 0$	$\sigma_v = \sigma_1$

Figura 304 – Equações para determinação da tensão de von Mises.

O último parâmetro referente à inicialização do dano é referente à taxa de deformação plástica equivalente, $\dot{\epsilon}(t)$, e é dado pela equação (26)

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{d\epsilon}{dt} \quad (26)$$

onde $d\epsilon$ é a derivada da deformação do material e dt é a derivada em ordem ao tempo. Para caracterizar a resposta evolutiva do dano é necessário determinar a energia de evolução do dano (G_f) ou, por outras palavras, a energia necessária até à rotura, após a inicialização da perda de rigidez do material (equação (27))

$$G_f = \int_{\bar{\epsilon}_0^{pl}}^{\bar{\epsilon}_f^{pl}} L\sigma_y d\bar{\epsilon}^{pl} = \int_0^{\bar{u}_f^{pl}} \sigma_y d\bar{u}^{pl}, \quad (27)$$

onde L diz respeito ao comprimento característico dos elementos utilizados, $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ à deformação equivalente no final da rotura, σ_y à tensão axial, $d\bar{\epsilon}^{pl}$ à derivada da deformação equivalente na rotura, \bar{u}_f^{pl} ao deslocamento equivalente no final da rotura e $d\bar{u}^{pl}$ a derivada do deslocamento equivalente na rotura. Para o cálculo da área abrangente utilizou-se o método de integração numérica do trapezóide que aproxima a área abrangente pela curva através da divisão em retângulos de igual dimensão (equação (28))

$$A = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{y_i + y_{i+1}}{2} \times (x_{i+1} - x_i). \quad (28)$$

O deslocamento equivalente no final da rotura, \bar{u}_f^{pl} , é caracterizado pela equação (29)

$$\bar{u}_f^{pl} = \frac{2G_f}{\sigma_{y0}}, \quad (29)$$

onde σ_{y0} diz respeito à tensão de inicialização de dano e G_f à energia de evolução de dano.

3.9.2 Condições da análise numérica dinâmica

Como referido anteriormente, este estudo foi apenas focado na 1ª fixação para a direção de arrancamento. Utilizaram-se elementos de casca para realizar a simulação dinâmica e todo o modo de preparação do modelo é igual ao apresentado no capítulo 3.7.1.1.1, à exceção da inclusão da introdução do modelo de dano para o material da 1ª fixação (Exxtral CNU011). A aplicação da carga foi igualmente diferente já que, desta vez, em vez da aplicação de um deslocamento aplicou-se uma velocidade de 100 mm/min durante 5 s (duração média do ensaio de tração ao arrancamento para a 1ª fixação).

Para o critério de inicialização do dano do Exxtral CNU011, a deformação equivalente à rotura foi calculada com base na equação (24). Apresentam-se de seguida os respetivos valores substituídos nas respetivas variáveis (equação (30))

$$\bar{\varepsilon}_0^{pl} = \frac{22,69}{1289,9} = 0,0176. \quad (30)$$

Importa referir que os valores introduzidos dizem respeito à curva nominal do material, isto porque a curva real não representa a degradação do material (a partir do *necking point* o declive da reta é estritamente crescente). Para o cálculo da segunda variável, η , pela consulta da tabela da Figura 304 apresentada no capítulo 3.9.1, e tendo em conta que se está perante um estado uniaxial de tensão, $\sigma_{yy} = 0$ e $\sigma_{zz} = 0$, obtêm-se na equação (31) os respetivos valores

$$\eta = -\frac{p}{q} = \frac{\frac{1}{3} \times (\sigma_{xx} + 0 + 0)}{\frac{\sigma_{mises}}{\sigma_{xx}}} = \frac{\frac{1}{3} \times (\sigma_{xx})}{\frac{1}{3}} \quad (31)$$

Para o último parâmetro (*strain rate*) ficou definido que a deformação é independente do tempo equação (32)

$$\dot{\varepsilon}(t) = 0 \quad (32)$$

No que diz respeito à evolução do dano, primeiramente calculou-se a energia necessária desde a inicialização do dano até à rotura do material. Para isso, dividiu-se

numa primeira fase a área abrangida pela curva nominal em vinte retângulos iguais mais um triângulo (este triângulo aproxima a área para a inicialização do dano, de outra forma não se conseguiria aproximar esta zona) (Figura 305).

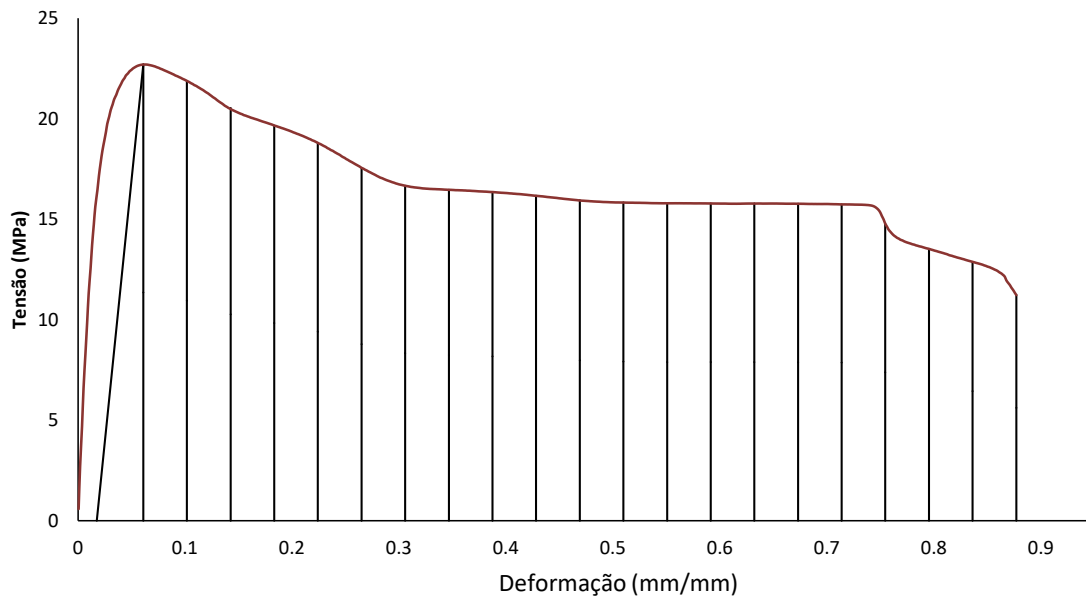


Figura 305 – Divisão da área relativa ao dano do material Exxtral CNU011.

Aplicando a equação (28) calculou-se a energia abrangida pelos vinte retângulos, para um intervalo de deslocamento em cada um de 0,0408 mm, de aproximadamente 13,58 N/mm². A energia referente à área abrangida pelo triângulo foi de aproximadamente 0,49 N/mm² o que perfaz uma energia desde o ponto de inicialização do dano até ao ponto de rotura de aproximadamente 14,07 N/mm². Visto que se utilizou elementos de casca de segunda ordem na modelação da 1ª fixação, o comprimento característico é metade do tamanho de aresta utilizado (1 mm), ou seja, $L=0,5$ mm. Substituindo todas as variáveis na equação (27), obtém-se uma energia de evolução do dano (G_f) de 7,04 N/mm (equação (33))

$$G_f = 14,07 \times 0,5 = 7,04 \text{ N/mm} \quad (33)$$

Seguiu-se o cálculo do deslocamento na rotura (\bar{u}_f^{pl}), que depende diretamente da evolução da energia até à rotura (G_f). Por aplicação da equação (29) obtém-se um deslocamento de 0,63 mm (equação (34))

$$\bar{u}_f^{pl} = \frac{2 \times 7,04}{22,69} = 0,63 \text{ mm} \quad (34)$$

Após introdução de todos os valores calculados anteriormente no *software* abaqus, apresentam-se na Figura 306 os dois gráficos de força vs. deslocamento resultantes da utilização de valores de *mass scaling* diferentes.

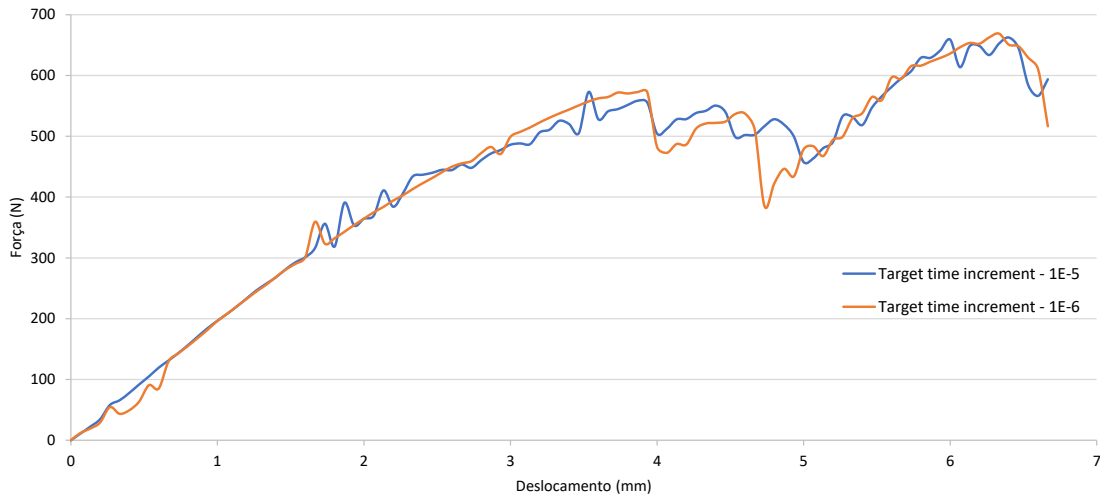


Figura 306 – Curvas forças *versus* deslocamento para diferentes valores de *mass scaling* relativamente à direção de ensaio ao arrancamento na 1ª fixação.

Verifica-se que o aumento do tempo de incremento através do *mass scaling*, apesar de tornar a simulação mais rápida, provoca ruídos nos *outputs*, como se pode observar pela simulação com valor de *mass scaling* de 1E-5 (curva azul do gráfico da Figura 306). Este facto pode ser visualizado através da energia dissipada do sistema para um valor de *mass scaling* de 1E-6, já que esta energia é praticamente nula (Figura 307).

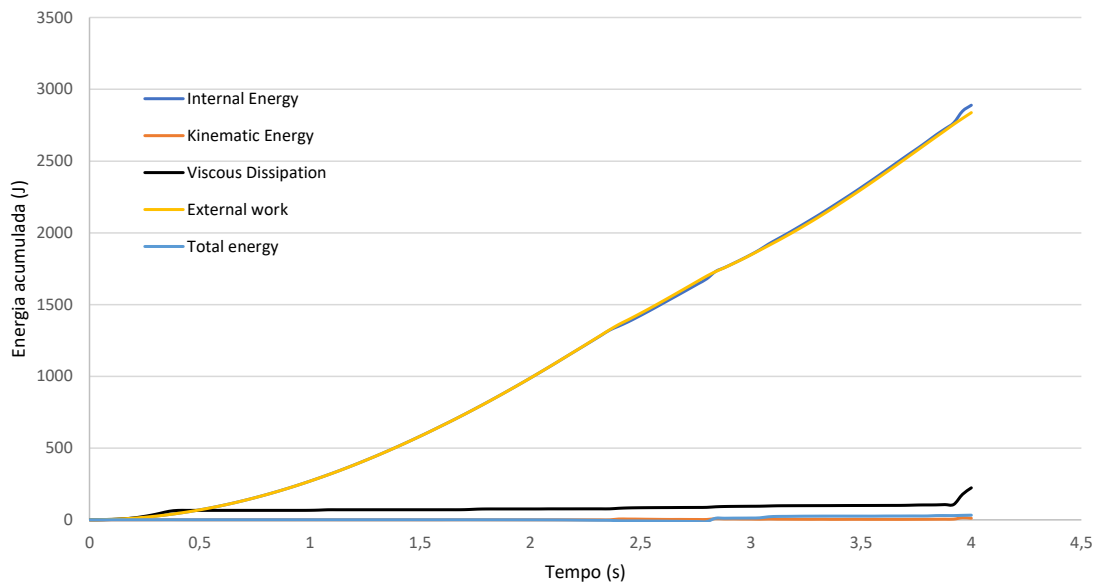


Figura 307 – Diferentes energias acumuladas do sistema para um valor de *mass scaling* de 1E-6.

Para um valor de *mass scaling* de $1E-5$ a energia dissipada é bastante superior, com períodos em que ultrapassa a energia interna do sistema, entre os 2 s e os 2,5 s de tempo de simulação (Figura 308).

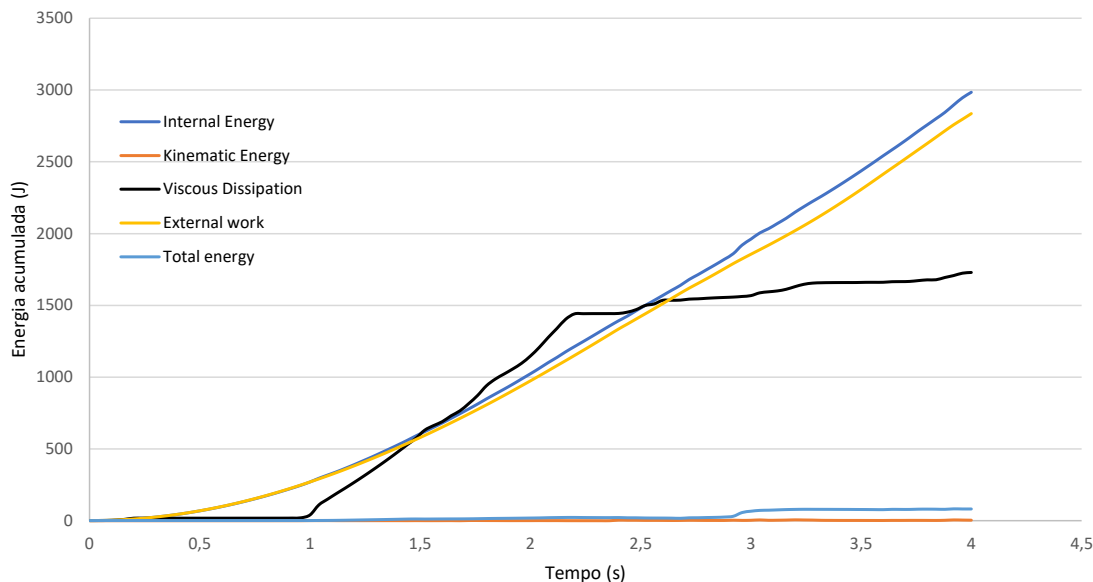


Figura 308 – Diferentes energias acumuladas do sistema para um valor de *mass scaling* de $1E-5$.

Verifica-se em ambos os gráficos que a energia cinética é suficientemente pequena comparativamente com a energia interna e externa do sistema, o que deve ser respeitado uma vez que se está perante análises quase-estáticas (normalmente o valor de energia cinética não deve ultrapassar 5% da energia interna do sistema para não haver efeitos inerciais). Na Tabela 50 apresenta-se o tempo que a *central processing unit* (CPU) despendeu para a simulação com os dois valores de *mass scaling*.

Tabela 50 – Comparação dos tempos da CPU com os dois valores de *mass scaling* utilizados na simulação.

Valores de <i>mass scaling</i>	Tempo da CPU (s)	Tempo da CPU (h)
1E-6	232629	64,6
1E-5	28050,6	7,79

Através da Tabela 50, verifica-se a enorme discrepância existente a nível de tempo computacional, com uma diferença de aproximadamente 57 h (87,4% de redução). Na Figura 309 verifica-se que a rotura se dá na zona frontal do porta agrafos após 5 s de simulação, tal como foi verificado no ensaio físico da Figura 81.

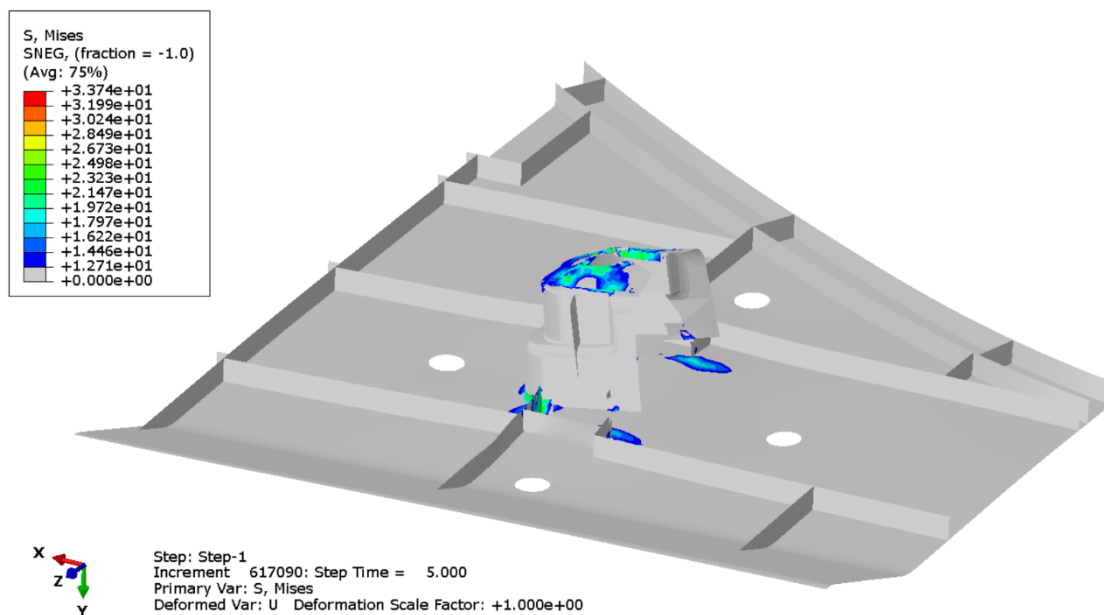


Figura 309 – Simulação numérica dinâmica de arrancamento para a 1ª fixação ao final dos 5 s de ensaio.

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

- 4.1 Conclusões
- 4.2 Propostas de trabalhos futuros

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 Conclusões

Face aos objetivos inicialmente delineados para a dissertação, de uma forma geral, estes foram maioritariamente cumpridos com sucesso.

De quatro fixações inicialmente fornecidas para estudo, apenas três foram alvo de estudo. Os ensaios físicos realizados nas três fixações, segundo as direções de arrancamento e corte e para cada posição arbitrada em cada componente, revelaram comportamentos semelhantes. Excetuam-se os ensaios na 2ª fixação, para os quais se verificaram algumas discrepâncias no comportamento da posição 3, em relação às outras duas posições, devido à forma como o modelo foi fixo à base da máquina de tração. Variáveis como o efeito da pré tensão dos elementos fixadores dos modelos (parafusos, calços, entre outros) afetaram os resultados no início do ensaio, maioritariamente nas direções ao corte da 1 e 2ª fixação.

No que toca às simulações numéricas, numa primeira fase tentou-se perceber, através da utilização de elementos de casca e elementos sólidos na modelação do modelo da 1ª fixação, a abordagem mais vantajosa para as fixações seguintes. Concluiu-se que ambas apresentam valores de erro relativo, em comparação com os ensaios experimentais, muito semelhantes, além de as zonas críticas identificadas serem praticamente comuns em ambos. Apesar de o modelo em superfícies ser mais rápido a nível computacional em comparação com o modelo sólido, na fase onde se procedeu às diferentes modificações geométricas concluiu-se que o modelo sólido é uma melhor opção quando se necessita de realizar um processo iterativo com precisão em geometrias mais complexas. De facto, há simplificações que se realizam no modelo em superfícies que afetam a avaliação das zonas a serem melhoradas. No entanto, não se descarta a viabilidade do modelo em superfícies para geometrias menos complexas. Todas as simulações numéricas realizadas com modelos sólidos nas três fixações permitiram identificar as zonas críticas na direção de arrancamento e nas duas direções de corte e os valores de força aos quais se dá início a plastificação do material.

Relativamente às correlações com os ensaios físicos, a fixação que apresentou menores erros relativos, e para a qual a variação de erro foi praticamente constante desde o início até ao final da simulação numérica, foi a 3ª fixação. Nesta fixação atinge-se um valor máximo de erro de aproximadamente 7% por defeito, na direção de ensaio

ao corte (direção C), valor esse abaixo dos 10%. Os piores resultados residiram nas direções de ensaio ao corte da 2ª fixação, para as quais se atingiram picos máximos de erro de 88% (início do ensaio da direção C). Estes elevados erros nos inícios dos ensaios ao corte deveram-se ao efeito da pré tensão provocada pelos elementos fixadores.

Com base nos resultados das simulações numéricas, seguiu-se um processo iterativo para melhorar as fixações do ponto de vista geométrico. Para a 1ª fixação, conseguiu-se uma solução parcial que cumpre os requisitos ao arrancamento (250 N antes da plastificação), no entanto por não se ter conseguido finalizar a simulação para as direções ao corte (devido a problemas de convergência) não foi possível determinar como a geometria se comporta segundo essas forças laterais. A 2ª fixação, apesar de não se ter realizado as simulações numéricas nas três direções de ensaio (também devido a problemas de convergência), sabe-se que pela análise das zonas críticas do modelo original que a zona frágil reside na zona frontal. Desta forma, implementando as melhorias geométricas que se adotaram para as duas anteriores fixações, à partida consegue-se colmatar os valores de deformação inelástica observada. Na direção ao corte a fixação na sua configuração inicial praticamente cumpre com o caderno de encargos da Renault (mínimo de força de 120 N). A incorporação dos frisos laterais só vem acrescentar no que diz respeito à resistência. Com as diversas iterações obteve-se uma solução *standard* para a 3ª fixação, e foi possível fazer com que esta suporte valores de 300 N ao arrancamento, aproximadamente, e cerca de 120 N ao corte, com uma margem de segurança de 1,5. Sem margem de segurança, obtêm-se valores de força para o arrancamento entre os 410 N e os 435 N, e ao corte entre os 180 N e os 190 N. As principais conclusões obtidas nesta fase da dissertação foram: a incorporação de frisos a 45° na zona frontal do porta agrafos permite duplicar a resistência ao arrancamento; a diminuição da extensão da redução de espessura para uma dimensão mínima de 1,5 mm permite dar mais sustentação à fixação; quanto maior for a inclinação dos frisos traseiros do porta agrafos melhor; quanto maior for a inclinação das paredes laterais mais resistência apresenta a fixação em todas as direções de ensaio.

Além das simulações estáticas foram efetuadas simulações dinâmicas no modelo em superfícies da 1ª fixação, na direção de ensaio ao arrancamento, para estudar o efeito que diferentes valores de *mass scaling* possuem na simulação. Concluiu-se que valores mais elevados de *mass scaling* influenciam o comportamento físico dos corpos em estudo. Este facto leva muitas vezes a soluções instáveis que se manifestam em forma de ruídos nos *outputs*. Verificou-se também uma redução do tempo de CPU de quase 90% de uma ordem de grandeza de 1E-6 para os 1E-5, o que acabou por não ser vantajoso uma vez que os resultados foram influenciados. Desta forma este parâmetro deve ser utilizado com a máxima precaução para não influenciar a leitura dos resultados.

Por fim, no que diz respeito ao arquivo dos resultados, este está dependente da realização de protótipos com as geometrias idealizadas das fixações para posterior realização de ensaios. Só depois de adquiridos os resultados desses ensaios é que se está em condições de incorporar as fixações *standard* na biblioteca Simoldes.

4.2 Propostas de trabalhos futuros

As soluções de melhoria encontradas e descritas ao longo da dissertação para as fixações seguiram condições específicas que cumprem com a maioria dos casos que se encontram na indústria automível. No entanto, no que se refere a trabalhos futuros, existe ainda uma ampla gama de possibilidades que podem ser estudadas para melhorar este tipo de geometrias.

A primeira refere-se ao estudo do comportamento das fixações sem ser à temperatura ambiente. Tudo o que foi descrito nesta dissertação apenas contempla o comportamento à temperatura ambiente (ensaios físicos foram realizados à temperatura ambiente). Porém, é sabido que os polímeros são severamente afetados pela temperatura o que implicará, possivelmente, para cada fixação, a concepção de novas geometrias.

Existem situações especiais relativamente à colocação destas geometrias dos porta grafos nos componentes. As geometrias aqui desenvolvidas podem ser aplicadas em componentes com espessuras de parede entre os 2 mm e os 2,5 mm, o que implica que a espessura na fixação na zona de contacto com o componente seja no mínimo 0,8 mm, valor este que representa o limite inferior possível para realizar a injeção. No que toca a espessuras de componentes maiores, possivelmente as geometrias idealizadas cumprem as especificações devido à possibilidade de aumentar a espessura de material na interface, o que melhorará a resistência. Ainda assim, esse estudo seria necessário para arquivar as fixações *standard*.

Outra situação especial diz respeito à inserção de diferentes alturas de fixações nos componentes. Devido à restrição de espaço ou a especificações do cliente, a altura das fixações pode variar. Casos em que a altura é menor do que aquelas estudadas podem não constituir um problema, e possivelmente até cumprem com o caderno de encargos. Todavia, nas ocorrências em que as fixações necessitam de alturas maiores do que aquelas estudadas, a estrutura mecânica vai enfraquecendo, o que constitui mais possibilidades de estudo.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. OICA. *Production statistics 2021* [Acedido em: Outubro, 2021], International Organization of Motor Vehicle Manufacturers, Paris, França, Disponível em: <https://www.oica.net/>.
2. Saberi, B., *The role of the automobile industry in the economy of developed countries*. International Robotics & Automation Journal, 2018. **4** (3): p. 179-180.
3. Nayak, J., M. Mishra, B. Naik, H. Swapnarekha, K. Cengiz, e V. Shanmuganathan, *An impact study of COVID-19 on six different industries: Automobile, energy and power, agriculture, education, travel and tourism and consumer electronics*. Expert systems, 2021: p. 1-32.
4. Karagöz Özenç, F., *An Assessment of The Impact of The Pandemic on Global Supply Chains and Its Potential Outcomes*. Istanbul University Press, 2020: p. 39-57.
5. Xu, Z., A. Elomri, L. Kerbache, e A.E. Omri, *Impacts of COVID-19 on Global Supply Chains: Facts and Perspectives*. IEEE Engineering Management Review, 2020. **48**(3): p. 153-166.
6. Belhadi, A., S. Kamble, C.J.C. Jabbour, A. Gunasekaran, N.O. Ndubisi, e M. Venkatesh, *Manufacturing and service supply chain resilience to the COVID-19 outbreak: Lessons learned from the automobile and airline industries*. Technological Forecasting and Social Change, 2021. **163**: p. 1-19.
7. Ascensão, P. *Indústria Automóvel | forte dinâmica empresarial alavancada pelo COMPETE 2020*. 2017 [Acedido em: Outubro, 2021], Disponível em: https://www.compete2020.gov.pt/detalhe/detalhe/NL_Inovacao_automovel.
8. Fernandes, J.L.F., *Competitividade da indústria automóvel portuguesa*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2017, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal. p. 107.
9. Automóvel, A.d.F.p.a.l. *Industry Overview - 2020*. 2021 [Acedido em: Dezembro, 2021], AFIA, Leça da Palmeira, Portugal, Disponível em: <https://afia.pt/en/statistics/>.
10. Nagy, J. e Z. Jámbor, *Competitiveness in global trade: The case of the automobile industry*. Economic Annals, 2018. **63**: p. 61-84.
11. Styliadis, K., C. Wickman, e R. Söderberg, *Defining Perceived Quality in the Automotive Industry: An Engineering Approach*. Procedia CIRP, 2015. **36**: p. 165-170.
12. Tay, S.I., J. Alipal, e T.C. Lee, *Industry 4.0: Current practice and challenges in Malaysian manufacturing firms*. Technology in Society, 2021. **67**: p. 1-12.
13. Crawford, R.J., Martin, Peter J., *Chapter 1 - General properties of plastics*, in *Plastics Engineering* E.P. John Leonard, Editor. 2020, Matthew Deans: Oxônia, Reino Unido. p. 1-57.

14. Patil, A., A. Patel, e R. Purohit, *An overview of Polymeric Materials for Automotive Applications*. *Materials Today: Proceedings*, 2017. **4**(2, Part A): p. 3807-3815.
15. Oerlikon. *Revolutionary new process for metallizing plastic components*. 2015 [Acedido em: Novembro, 2021], Oerlikon Corporation, Pfäffikon, Suíça, Disponível em: <https://www.oerlikon.com/stories/2015/10/30/revolutionary-new-process-for-metallizing-plastic-components/>.
16. Mekonnen Asmare Fentahun¹, P.D.M.A.S., *Materials Used in Automotive Manufacture and Material Selection Using Ashby Charts*. *International Journal of Materials Engineering*, 2018. **8**: p. 40-54.
17. Sai Aditya Pradeep, R.K.I., Hakan Kazan, Srikanth, Pilla, *30 - Automotive Applications of Plastics: Past, Present, and Future*, in *Applied Plastics Engineering Handbook* M. Kutz, Editor. 2017, William Andrew Publishing: Norwich, EUA. p. 651-673.
18. Basith, M.A., N.C. Reddy, S. Uppalapati, e S.P. Jani, *Crash analysis of a passenger car bumper assembly to improve design for impact test*. *Materials Today: Proceedings*, 2021. **45**: p. 1684-1690.
19. Shinde, N. e D. Patel, *A Short Review on Automobile Dashboard Materials*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. **810**: p. 1-10.
20. Tiago Sartor, B.D.C., Sergio Ricardo Espada, *Structural Integrity Evaluation of Plastic Welding (Heat Stake) Tower in Door Trim Panels of Vehicles Using Finite Element Method*. *SAE Technical Paper*, 2015: p. 1-8.
21. Hyunkwon Jo, Y.K., Hyunchul Lee, Hyunmin Park, Suckin Song, *A Study on New Approach of Optimization for the Automotive Plastic Interior Parts*. *SAE Technical Paper*, 2015: p. 1-6.
22. Zhou, Q., Xia, Yong, Wei, Xinqi, Meng, Yan, *Temperature influence on impact protection performance of steel-plastic structures—Manifested by head impact against pillars of passenger car*. *International Journal of Impact Engineering*, 2022. **159**: p. 1-13.
23. Dorp, E.R.-v., C. Blume, T. Haedecke, V. Pata, D. Reith, O. Bruch, B. Möglinger, e B. Hausnerova, *Process-dependent structural and deformation properties of extrusion blow molding parts*. *Polymer Testing*, 2019. **77**: p. 1-5.
24. Crawford, R.J., Martin, Peter J., *Chapter 4 - Processing of plastics*, in *Plastics Engineering*, E.P. John Leonard, Editor. 2020, Matthew Deans: Oxônia, Reino Unido. p. 279-409.
25. Tatara, R.A., *14 - Compression Molding*, in *Applied Plastics Engineering Handbook*, M. Kutz, Editor. 2017, William Andrew Publishing: Norwich, Nova Iorque, Estados Unidos da América. p. 291-320.
26. Farooque, R., M. Asjad, e S.J.A. Rizvi, *A current state of art applied to injection moulding manufacturing process – A review*. *Materials Today: Proceedings*, 2021. **43**: p. 441-446.
27. Singh, G. e A. Verma, *A Brief Review on injection moulding manufacturing process*. *Materials Today: Proceedings*, 2017. **4**(2, Part A): p. 1423-1433.
28. Post, J. *The Basic Plastic Injection Molding Process*. 2016 [Acedido em: Novembro, 2021], Aire Plastics EUA, Disponível em: <https://www.aireplastics.com/basic-injection-molding-process/>.

29. Vieira, A.L.N., R.D.S.G. Campilho, F.J.G. Silva, N.M.S. Faria, e L.P. Ferreira, *Design of a thermoplastic micro over injection machine for the automotive component industry*. Procedia Manufacturing, 2021. **55**: p. 56-63.
30. Agassant, J.-F., Avenas, Pierre, Carreau, Pierre J., Vergnes, Bruno, Vincent, Michel, *7 - Injection Molding*, in *Polymer Processing*, J.-F. Agassant, et al., Editors. 2017, Hanser: Munique, Alemanha. p. 521-585.
31. Shen, S., B.B. Kanbur, Y. Zhou, e F. Duan, *Thermal and mechanical analysis for conformal cooling channel in plastic injection molding*. Materials Today: Proceedings, 2020. **28**: p. 396-401.
32. Ogorodnyk, O. e K. Martinsen, *Monitoring and Control for Thermoplastics Injection Molding A Review*. Procedia CIRP, 2018. **67**: p. 380-385.
33. Farotti, E. e M. Natalini, *Injection molding. Influence of process parameters on mechanical properties of polypropylene polymer. A first study*. Procedia Structural Integrity, 2018. **8**: p. 256-264.
34. Fu, H., H. Xu, Y. Liu, Z. Yang, S. Kormakov, D. Wu, e J. Sun, *Overview of Injection Molding Technology for Processing Polymers and Their Composites*. ES Materials & Manufacturing, 2020. **8**: p. 3-23.
35. Sreedharan, J. e A.K. Jeevanantham, *Optimization of Injection Molding Process to Minimize Weld-line and Sink-mark Defects Using Taguchi based Grey Relational Analysis*. Materials Today: Proceedings, 2018. **5**(5, Part 2): p. 12615-12622.
36. Randy Kerkstra, S.B., *47 - Weld Lines*, in *Injection Molding Advanced Troubleshooting Guide* D.M. Smith, Editor. 2021, Hanser: Munique, Alemanha. p. 483-492.
37. Tomasz CHACIŃSKI, P.S., *Common defects in injection molding of plastic products and their influence on product quality*. Journal of Mechanical and Energy Engineering, 2021. **5(45)**(1): p. 7-14.
38. Inui, M., S. Onishi, e N. Umezu, *Visualization of potential sink marks using thickness analysis of finely tessellated solid model*. Journal of Computational Design and Engineering, 2018. **5**(4): p. 409-418.
39. Ahmed, T., P. Sharma, C.L. Karmaker, e S. Nasir, *Warping prediction of Injection-molded PVC part using ensemble machine learning algorithm*. Materials Today: Proceedings, 2020: p. 1-5.
40. Harry Pruner, N.W., *Understanding Injection Molds*. Second edition ed. Understanding Injection Molds 2020, Munique, Alemanha: Hanser. 154.
41. Kazmer, D.O., *Injection Mold Design Engineering*. Second edition ed. 2016, Munique, Alemanha: Hanser. 529.
42. Mercado-Colmenero, J.M., M.A. Rubio-Paramio, A. Vizan-Idoipe, e C. Martín-Doñate, *A new procedure for the automated design of ejection systems in injection molds*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017. **46**: p. 68-85.
43. Lakkanna, M., G.C. Mohan Kumar, e R. Kadoli, *Computational design of mould sprue for injection moulding thermoplastics*. Journal of Computational Design and Engineering, 2016. **3**(1): p. 37-52.
44. Solanki, B.S., H. Singh, e T. Sheorey, *Design optimization of feed system for injection molded polymer gear*. Materials Today: Proceedings, 2021. **47**: p. 3418-3424.

45. Dangel, R., *Injection Molds for Beginners*. Second edition ed. 2020, Munique, Alemanha: Hanser. 312.
46. Li, Z., X. Zhou, W. Liu, Q. Niu, e C. Kong, *A similarity-based reuse system for injection mold design in automotive interior industry*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016. **87**(5): p. 1783-1795.
47. Barbosa, R.C.N., R.D.S.G. Campilho, e F.J.G. Silva, *Injection mold design for a plastic component with blowing agent*. Procedia Manufacturing, 2018. **17**: p. 774-782.
48. Arora, A., A. Pathak, A. Juneja, P. Shakkarwal, e R. Kumar, *Design and analysis of multi cavity injection mould using solidworks*. Materials Today: Proceedings, 2021: p. 1-3.
49. Georg Menges, W.M., Paul Mohren, *How to make injection molds*. Third Edition ed. 2001, Munique, Alemanha: Hanser Publishers. 631.
50. Annicchiarico, D. e J.R. Alcock, *Review of Factors that Affect Shrinkage of Molded Part in Injection Molding*. Materials and Manufacturing Processes, 2014. **29**(6): p. 662-682.
51. DIN, *DIN16742-2013A. Plastics moulded parts - Tolerances and acceptance conditions*, in *Moulding shrinkage and shrinkage anisotropies*. 2013, Deutsches Institut für Normung: Berlim, Alemanha. p. 1-36.
52. Moayyedian, M., *Literature Review and Research Objectives*, in *Intelligent Optimization of Mold Design and Process Parameters in Injection Molding*. 2019, Springer International Publishing: Cham, Suíça. p. 13-44.
53. Sun, L. e X. Liu, *Control Analysis of Production and Apparent Quality of Automobile Large Plastic Parts*. Procedia Engineering, 2011. **16**: p. 438-443.
54. Bakalova, M. e M. Konsulova-Bakalova, *Application of SolidWorks Plastic in the Training in Mechanical Engineering*. ANNUAL JOURNAL OF TECHNICAL UNIVERSITY OF VARNA, BULGARIA, 2017. **1**: p. 85-96.
55. Lerma Valero, J.R., *Plastic Parts Design: Recommendations*, in *Plastics Injection Molding*, D.J. Diaz-Luque, Editor. 2020, Hanser: Munique, Alemanha. p. 239-249.
56. *Designing reinforced plastic products*. Reinforced Plastics, 2005. **49**(4): p. 30-34.
57. DSM. *Corrugations, ribs and gussets*. 2011 [Acedido em: 27/03], DSM, Sul de Limburgo, Holanda, Disponível em: https://www.dsm.com/engineering-materials/en_US/design-guide/design-guidelines/corrugations-ribs-and-gussets.html.
58. Maw-Ling Wang, R.-Y.C., Chia-Hsiang (David) Hsu, *Part and Mold Design*, in *Molding Simulation: Theory and Practice*, D.M. Smith, Editor. 2018, Hanser: Munique, Alemanha. p. 55-85.
59. Malloy, R.A., *The Design Process and Material Selection*, in *Plastic Part Design for Injection Molding*, S. Jörg, Editor. 2010, Hanser: Munique, Alemanha. p. 131-185.
60. Silva, L.R.R., E.A.S. Marques, e L.F.M. da Silva, *Polymer joining techniques state of the art review*. Welding in the World, 2021. **65**(10): p. 2023-2045.
61. Benatar, A., *Plastics Joining*, in *Applied Plastics Engineering Handbook* M. Kutz, Editor. 2017, William Andrew Publishing: Norwich, Nova Iorque, Estados Unidos da América. p. 575-591.

62. Soo, V.K., P. Compston, e M. Doolan, *The influence of joint technologies on ELV recyclability*. Waste Management, 2017. **68**: p. 421-433.
63. Küçükoğlu, A. e F. Karpat. *The Joining Techniques for Thermoplastics Materials in Automotive Industries: A Comprehensive Literature Review*. in ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. 2016.
64. Fernando Afonso Siqueira, T.S., Adelchi Tiboni, *Structural and Cost Evaluation of Snap Fits used in Connections of Vehicle Door Trim Panel Components with FEA Assist* SAE Technical Paper, 2017: p. 1-8.
65. VehicleClips.co.uk. *Interior Trim Panel & Door Card Mounting Clip- Mini 07146962771*. 2022 [Acedido em: Dezembro, 2021], VehicleClips.co.uk, Inglaterra, Disponível em: <https://www.vehicleclips.co.uk/interior-trim-panel-door-card-mounting-clip-bmw-07146962771/>.
66. Bonenberger, P.R., *Physical Elements: Locks*, in *The First Snap-Fit Handbook* C. Hamilton, Editor. 2016, Hanser: Munique, Alemanha. p. 77-115.
67. Alejandro Rosas Vazquez, F.P., and Diego Santillan Gutierrez, *Use of Plastic Trim Fasteners for Automotive Trimming Applications*. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2017: p. 1-7.
68. Martinsen, K., S.J. Hu, e B.E. Carlson, *Joining of dissimilar materials*. CIRP Annals, 2015. **64**(2): p. 679-699.
69. Lambiase, F., S.I. Scipioni, C.-J. Lee, D.-C. Ko, e F. Liu, *A State-of-the-Art Review on Advanced Joining Processes for Metal-Composite and Metal-Polymer Hybrid Structures*. 2021. **14**(8): p. 1-24.
70. Mohammed K Billal, B.V.M., Dan Aquilina, Steven Schenten, *CAE Applications and Techniques used in Calculating the Snaps Insertions and Retentions Efforts in Automotive Trims*. SAE International Journal of Passenger Cars, 2014: p. 1-9.
71. Ootsuka02. *cantilever snap-fit*. 2012 [Acedido em: Dezembro, 2021], Wikipédia, São Francisco, Califórnia, Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Snap-fit#/media/File:Cantilever_Snap-fit.PNG.
72. Sukumar T, M.S., *Design and Evaluation of Quadruple System Protection Valve Piston Assembly using Finite Element Method* SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2014: p. 1-8.
73. Klahn, C., D. Singer, e M. Meboldt, *Design Guidelines for Additive Manufactured Snap-Fit Joints*. Procedia CIRP, 2016. **50**: p. 264-269.
74. Pouzada, A.S., *Mechanical design with plastics*, in *Design and Manufacturing of Plastics Products*, D.J. Peter Gane, Editor. 2021, William Andrew Publishing: Nova Iorque, Estados Unidos da América. p. 201-248.
75. Gaudez, C., P. Wild, e A. Aublet-Cuvelier, *A better way of fitting clips? A comparative study with respect to physical workload*. Appl Ergon, 2015. **51**: p. 236-43.
76. ARaymond. *Pillar trim clips*. 2021 [Acedido em: Dezembro, 2021], ARaymond, Grenoble, França, Disponível em: <https://www.araymond-automotive.cn/en-cn/fastening-and-assembly-solutions/car-body-trim>.
77. Abolfathi, A., D.J. O'Boy, S.J. Walsh, A.M. Dowsett, e S.A. Fisher, *The uncertainty in stiffness and damping of an automotive vehicle's trim-structure mounts and its effect on the variability of the vibration transfer function*. 2018. **232**(15): p. 1-12.

78. Machado, J.J.M., E.A.S. Marques, M.R.G. Silva, e L.F.M. da Silva, *Numerical study of impact behaviour of mixed adhesive single lap joints for the automotive industry*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018. **84**: p. 92-100.
79. Christou, P., *Raising performance in automotive assembly*. Reinforced Plastics, 2016. **60**(2): p. 104-106.
80. Antelo, J., A. Akhavan-Safar, R.J.C. Carbas, E.A.S. Marques, R. Goyal, e L.F.M. da Silva, *Replacing welding with adhesive bonding: An industrial case study*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2022. **113**: p. 1-11.
81. Sandeep, R. e N. Arivazhagan, *Innovation of thermoplastic polymers and metals hybrid structure using friction stir welding technique: challenges and future perspectives*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2021. **43**(1): p. 1-27.
82. Bhudolia, S.K., G. Gohel, K.F. Leong, e A. Islam, *Advances in Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites: A Review*. 2020. **13**(6): p. 1-28.
83. Manoranjan Sahoo, R.J.L., Hari Nadh Gudula, Raghuraman Taruvai, Sathish Kumar S, *A Study on Various Structural Concepts of Automotive Door Trim*. SAE Technical Paper, 2017: p. 1-5.
84. Qiu, J., G. Zhang, E. Sakai, W. Liu, e L. Zang, *Thermal Welding by the Third Phase Between Polymers: A Review for Ultrasonic Weld Technology Developments*. 2020. **12**(4): p. 1-26.
85. Gonçalves, L.F.F.F., F.M. Duarte, C.I. Martins, e M.C. Paiva, *Laser welding of thermoplastics: An overview on lasers, materials, processes and quality*. Infrared Physics & Technology, 2021. **119**: p. 1-17.
86. JOZEF MASCENIK, S.P., *Determination of stress and deformation during laser welding of aluminium alloys with the PC support*. MM Science Journal, 2020: p. 1-4.
87. Pinho, G.P., *Laser Welding of Thermoplastics*. SAE Technical Paper, 1999: p. 1-8.
88. Natti Rao, G.S., *Design Formulas for Plastics Engineers*. 2 ed. Vol. 2. 2004, Munique, Alemanha: Hanser Publications.
89. António Completo, F.Q.d.M., *Introdução ao projeto mecânico*. 2 ed. Vol. 2. 2019, Porto, Portugal: engebook.
90. Mascarenhas, W.N., C.H. Ahrens, e A. Ogliari, *Design criteria and safety factors for plastic components design*. Materials & Design, 2004. **25**(3): p. 257-261.
91. Erhard, G., *Calculations for Structures under Mechanical Load – Examples of Geometrically Simple Structural Parts under Static Loads*, in *Designing with Plastics*, G. Erhard, Editor. 2006, Hanser: Munique, Alemanha. p. 175-212.
92. Bonten, C., Schmachtenberg, Ernst, Yazici, Nazif M., *Designing injection moulded parts with FEM: practical help and experience*. Vol. 90. 2000, Munique, Alemanha: Carl Hanser Verlag.
93. Dominick V. Rosato, D.V.R., Marlene G. Rosato, *Plastics Design Handbook*. 1 ed. Vol. 1. 2001, Boston, MA: Springer.
94. Wahab, M.A., N.-A. Noda, S.P.A. Bordas, W. Zhu, H.N. Xuan, e L.V. Vanegas-Useche, *Advances in finite element analysis for computational mechanics 2015*. Advances in Mechanical Engineering, 2015. **7**(7): p. 1-2.

95. Bi, Z., *Overview of Finite Element Analysis*, in *Finite Element Analysis Applications*, S.M. Peter Jardim, Editor. 2018, Academic Press: Cambridge, Massachusetts, EUA. p. 1-29.
96. Campilho, R.D.S.G., *Método dos Elementos Finitos | Ferramentas para Análise Estrutural*. 2012, Porto: Publindústria. 205.
97. Zeng, W. e G.R. Liu, *Smoothed Finite Element Methods (S-FEM): An Overview and Recent Developments*. Archives of Computational Methods in Engineering, 2018. **25**(2): p. 397-435.
98. Truster, T.J., *DEIP, discontinuous element insertion Program — Mesh generation for interfacial finite element modeling*. SoftwareX, 2018. **7**: p. 162-170.
99. Pore, T., S.G. Thorat, e A.A. Nema, *Review of contact modelling in nonlinear finite element analysis*. Materials Today: Proceedings, 2021. **47**: p. 2436-2440.
100. Tsiolakis, V. e H.P. Bensler, *Current CAE Trends in the Automotive Industry*, in *Computation and Big Data for Transport: Digital Innovations in Surface and Air Transport Systems*, P. Diez, et al., Editors. 2020, Springer International Publishing: Cham. p. 169-179.
101. Group, L. *Car Crash Test Finite Element Analysis with ABAQUS tutorial*. 2020 [Acedido em: Janeiro, 2022], Youtube, São Bruno, Califórnia, EUA, Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=lol15USYnDw>.
102. Chevrot, T. *Engenharia F1 - Desenvolvimentos e Simulações Numéricas*. 2011 [Acedido em: Janeiro, 2022], Confidential Renault, França, Disponível em: <https://www.confidential-renault.fr/Actualites/Formule-1/2660/Ingenierie-F1-Developpements-et-Simulations-numeriques>.
103. Magneville, B. *Accelerate your CAE vehicle structural analysis process*. 2022 [Acedido em: Janeiro, 2022], Siemens, Munique, Alemanha, Disponível em: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/webinar/cae-vehicle-structural-analysis-process/69036>.
104. Yusof, N.S.B., S.M. Sapuan, M.T.H. Sultan, M. Jawaid, e M.A. Maleque, *Design and materials development of automotive crash box: a review*. Ciência & Tecnologia dos Materiais, 2017. **29**(3): p. 129-144.
105. Vangi, D., F. Begani, M.-S. Gulino, e F. Spitzhüttl, *A vehicle model for crash stage simulation*. IFAC-PapersOnLine, 2018. **51**(2): p. 837-842.
106. Ye, S., L. Hou, P. Zhang, X. Bu, J. Xiang, H. Tang, e J. Lin, *Transfer path analysis and its application in low-frequency vibration reduction of steering wheel of a passenger vehicle*. Applied Acoustics, 2020. **157**: p. 1-11.
107. G. Accardo, M.E.-k., B. Peeters, F. Bianciardi, D. Brandolisio, K. Janssens, M. Martarelli. *Experimental Acoustic Modal Analysis of an Automotive Cabin*. in *Experimental Techniques, Rotating Machinery, and Acoustics*. 2015. Cham: Springer International Publishing.
108. Gates, B., *Cinco perguntas essenciais em qualquer discussão sobre o clima, in Como evitar um desastre climático | As soluções que temos e as inovações necessárias*. 2021, Ideias de Ler: Porto, Portugal. p. 61-74.
109. Igal, D., O. Mukhmetov, Y. Zhao, S.C. Fok, e S.L. Teh, *Comparative Analysis of Turbulence Models for Automotive Aerodynamic Simulation and Design*. International Journal of Automotive Technology, 2019. **20**(6): p. 1145-1152.

110. Oliver-Ortega, H., F. Julian, F.X. Espinach, Q. Tarrés, M. Ardanuy, e P. Mutjé, *Research on the use of lignocellulosic fibers reinforced bio-polyamide 11 with composites for automotive parts: Car door handle case study*. Journal of Cleaner Production, 2019. **226**: p. 64-73.
111. Simoldes Plastics. 2022 [Acedido em: Março 2022], Simoldes Plastics, Oliveira de Azeméis, Disponível em: <https://www.simoldes.com/en/plastics/home/>.
112. Tomé, J.D. e F. Gomes. *O cockpit dos veículos comerciais do futuro está a ser desenvolvido em Portugal*. 2022 [Acedido em: Setembro de 2022], Razão automóvel, Portugal, Disponível em: <https://www.razaoautomovel.com/2021/11/cockpit-veiculos-comerciais-futuro-portugal>.
113. SYSTÈMES, D., *Getting Started with Abaqus 2008*, DASSAULT SYSTÈMES: Vélizy-Villacoublay, França. p. 645.
114. Baeker, M., *How to get meaningful and correct results from your finite element model*. 2018, Institut für Werkstoffe, Technische Universität Braunschweig: Braunschweig, Alemanha.
115. Onishi, Y., R. Iida, e K. Amaya, *Accurate Viscoelastic Large Deformation Analysis Using F-Bar Aided Edge-Based Smoothed Finite Element Method for 4-Node Tetrahedral Meshes (F-BarES-FEM-T4)*. International Journal of Computational Methods, 2020. **17**(02): p. 1845003.
116. Azwan, S.M.S., Y.M. Yazid, A. Amran, e B. Abdi, *Quasi-Static Flexural and Indentation Behaviour of Polymer-Metal Laminate*. Advanced Materials Research, 2014. **970**: p. 88-90.
117. *Typical Poisson's ratios of polymers at room temperature*. 2015-2022, Polymerdatabase.
118. Wagner, R., *ABAQUS Tutorial: Damage for Ductile Metals - Material Model Explained - Ductile Damage*. 2021.

ANEXOS

6.1 Anexo1

6.2 Anexo2

6.3 Anexo3

6 ANEXOS

6.1 Anexo1

Product Datasheet

ExxonMobil

Extral™ Performance Polyolefin CNU011

Polypropylene Impact Copolymer

Product Description

A specialty thermoplastic polyolefin resin designed for injection molded automotive interior applications in which good surface finish and UV resistance is required.

General

Availability ¹	• Africa & Middle East	• Europe	
Features	• Balanced Stiffness/Toughness	• Good Impact Resistance	• Good Surface Finish
Uses	• Automotive Applications	• Automotive Interior Parts	• Automotive Interior Trim
Appearance	• Colors Available		
Form(s)	• Pellets		
Processing Method	• Injection Molding		
Revision Date	• 08/09/2018		

Physical	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Based On
Melt Mass-Flow Rate (MFR) (230°C/2.16 kg)	16 g/10 min	16 g/10 min	ISO 1133
Melt Volume-Flow Rate (MVR) (230°C/2.16 kg)	21 cm ³ /10min	21 cm ³ /10min	ISO 1133
Density	0.900 g/cm ³	0.900 g/cm ³	ISO 1183

Mechanical	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Based On
Tensile Stress at Yield	3480 psi	24.0 MPa	ISO 527-2/50
Tensile Strain at Yield	5.2 %	5.2 %	ISO 527-2/50
Tensile Modulus - Secant	174000 psi	1200 MPa	ISO 527-1

Impact	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Based On
Charpy Notched Impact Strength			ISO 179
32°F (0°C), Complete Break	2.7 ft-lb/in ²	5.6 kJ/m ²	
73°F (23°C), Complete Break	4.3 ft-lb/in ²	9.0 kJ/m ²	

Thermal	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Based On
Heat Deflection Temperature (1.80 MPa)	122 °F	50.0 °C	ISO 75-2/A
Heat Deflection Temperature (0.45 MPa)	172 °F	78.0 °C	ISO 75-2/B

Legal Statement

This product is not intended for use in food contact application.

This product is not intended for use in medical applications and should not be used in any such applications.

Notes

Typical properties: these are not to be construed as specifications.

¹ Product may not be available in one or more countries in the identified Availability regions. Please contact your Sales Representative for complete Country Availability.

6.2 Anexo2

Product Datasheet



Exxtral™ Performance Polyolefin CMV101A

Polypropylene, Compounded (TPO)

Product Description

A specialty thermoplastic polyolefin resin characterized by a good stiffness/toughness balance and designed for automotive interior trim applications. UV stabilized.

General

Availability ¹	• Africa & Middle East	• Europe
Features	• Good Flow	• Good Processability
Uses	• Automotive Interior Trim	
Appearance	• Colors Available	
Form(s)	• Pellets	
Processing Method	• Injection Molding	
Revision Date	• 09/13/2019	

Physical	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Based On
Melt Mass-Flow Rate (MFR) (230°C/2.16 kg)	28 g/10 min	28 g/10 min	ISO 1133
Melt Volume-Flow Rate (MVR) (230°C/2.16 kg)	35 cm ³ /10min	35 cm ³ /10min	ISO 1133
Density	0.970 g/cm ³	0.970 g/cm ³	ISO 1183

Mechanical	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Based On
Tensile Stress at Yield	3710 psi	25.6 MPa	ISO 527-2/50
Tensile Strain at Yield	3.6 %	3.6 %	ISO 527-2
Tensile Modulus - Secant	274000 psi	1890 MPa	ISO 527-1
Flexural Modulus	278000 psi	1920 MPa	ISO 178

Impact	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Based On
Notched Izod Impact Strength 73°F (23°C), Complete Break	2.6 ft-lb/in ²	5.4 kJ/m ²	ISO 180/A
Charpy Notched Impact Strength 73°F (23°C), Complete Break	2.9 ft-lb/in ²	6.1 kJ/m ²	ISO 179

Thermal	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Based On
Heat Deflection Temperature (1.80 MPa)	131 °F	55.0 °C	ISO 75-2/A
Heat Deflection Temperature (0.45 MPa)	219 °F	104 °C	ISO 75-2/B

Legal Statement

This product is not intended for use in medical applications and should not be used in any such applications.

This product is not intended for use in food contact application.

Notes

Typical properties: these are not to be construed as specifications.

¹ Product may not be available in one or more countries in the identified Availability regions. Please contact your Sales Representative for complete Country Availability.

6.3 Anexo3

Hostacom EKC 330N E1 C12507
 PP COPO-T16

LyondellBasell Industries

Rheological properties	Value	Unit	Test Standard
ISO Data			
Melt Flow Index, MFI	17	g/10min	ISO 1133
MFI temperature	230	°C	-
MFI load	2.16	kg	-

Mechanical Properties	Value	Unit	Test Standard
ISO Data			
Yield stress	21	MPa	ISO 527
Impact Strength (Charpy), +23°C	no break	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Notched Impact Strength (Charpy), +23°C	45	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Notched Impact Strength (Charpy), -30°C	5	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Flexural Modulus (23°C)	1800	MPa	ISO 178

Thermal Properties	Value	Unit	Test Standard
ISO Data			
Temp. of deflection under load (1.80 MPa)	56	°C	ISO 75-1/-2
Vicat softening temperature A	132	°C	ISO 306

Other Properties	Value	Unit	Test Standard
ISO Data			
Density	1020	kg/m ³	ISO 1183

Characteristics
Processing

Injection Molding

Features

Non Blooming, Copolymer

Delivery form

Pellets

Disclaimer
Liability Exclusion

These guide values are measured and provided by the product manufacturer and have been determined on standardised test specimens and can be affected by pigmentation, mould design and processing conditions. M-Base has taken the guide values from the producer's original Technical Data Sheet. **ALBIS AND M-BASE ARE THEREFORE NOT RESPONSIBLE FOR THE ACCURACY OF THE GUIDE VALUES AND CANNOT GIVE ANY WARRANTY WITH REGARD TO THEIR CORRECTNESS.**

Any information given on the chemical and physical characteristics of our products, including, without limitation, technical advice on applications, whether verbally, in writing or by testing the product, is given to the best of our knowledge and in good faith and does not exempt the buyer from carrying out their own investigations and tests in order to ascertain the product's specific suitability for the purpose intended.

The buyer is solely responsible for confirming the suitability of the product for a particular application, its utilization and processing and must observe any applicable laws and government regulations. **NO EXPRESS OR IMPLIED RECOMMENDATION OR WARRANTY IS GIVEN WITH REGARD TO THE SUITABILITY OF THE PRODUCT FOR A PARTICULAR APPLICATION, SUCH AS, BUT NOT LIMITED TO, SAFETY-CRITICAL COMPONENTS OR SYSTEMS.**

Healthcare uses: the supply of any product by ALBIS for any medical, pharmaceutical or diagnostic application is conditional to an assessment by ALBIS in terms of compliance with ALBIS' internal risk management policy – even for products which are in general designated for use in Healthcare applications.

Important: irrespective of product type or designation, ALBIS does not recommend or support the use of any products it supplies which fall into the following medical, pharmaceutical or diagnostic application categories:

- risk class III applications according to EU directive 93/42/EEC
- any bodily implant application for greater than 30 days
- any critical component in any medical device that supports or sustains human life.

At all times, our standard terms and conditions of sale apply.