

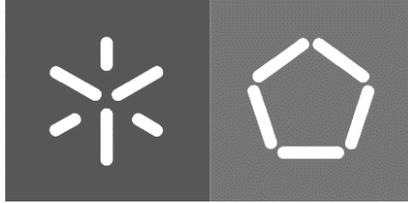


**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Francisco José Marinho Lopes

**Problemas de Uniformidade do Preto em grandes displays LCD utilizados em Cluster de instrumentos de automóveis: caracterização do problema e desenvolvimento de soluções construtivas**

Março de 2022



**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Francisco José Marinho Lopes

**Problemas de Uniformidade do Preto em  
grandes displays LCD utilizados em Cluster de  
instrumentos de automóveis: caracterização  
do problema e desenvolvimento de soluções  
construtivas**

Dissertação de Mestrado  
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do  
**Professor Doutor José Filipe Bizarro Meireles**  
**Doutora Cristina Martins**  
**Engenheiro José Pedro Delgado**

Março de 2022

## DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

### *Licença concedida aos utilizadores deste trabalho*



Atribuição

CC BY

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## **DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE**

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho acadêmico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

## AGRADECIMENTOS

Desejo expressar o meu profundo agradecimento às seguintes pessoas e instituições que contribuíram para a realização deste projeto:

Gostaria de começar por agradecer à Bosch Car Multimédia, S.A, pela oportunidade que me foi proporcionada de realizar o estágio curricular na empresa. À minha equipa na Bosch, pela forma como fui acolhido e pelo apoio que me foi prestado nas várias fases do projeto. Em particular, à minha tutora na empresa, Cristina Martins, pela orientação dada, pela ajuda a nível material, técnica e da boa disposição dentro da empresa; ao Rui Barros, *Team Leader*, pelo acolhimento e boa integração na sua equipa; de resto, a todos os meus colegas de equipa, por se mostrarem sempre dispostos a responder ou a ajudar em qualquer questão que lhes foi colocada.

Ao meu orientador na Universidade, o Professor Doutor José Filipe Bizarro Meireles, por se ter mostrado desde o princípio como uma parte bastante ativa do projeto, pelas suas opiniões esclarecedoras nas reuniões, pela ajuda na realização da ferramenta de suporte, no estudo dos conceitos e pelo apoio prestado em todas as fases de elaboração desta dissertação.

Ao meu segundo orientador na Bosch, Eng. Pedro Delgado, pela voz da experiência na área, ideias para os conceitos estudados e orientação prestada.

À minha família, pelo apoio e ajuda que sempre me deram e compreensão que sempre demonstraram nos dias em que estava de pior humor/menor disposição para interagir de forma agradável.

À minha namorada, por estar presente em todos os momentos e por ter sido um pilar e um amparo neste último ano, apesar da distância que nos separava. Neste passeio que damos juntos, por me ajudar a ser melhor.

## **DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE**

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho acadêmico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

## RESUMO

O interior dos automóveis hoje em dia está a tornar-se cada vez mais automatizado e a conectividade entre o condutor e o veículo assume um papel bastante preponderante. Os *displays* são a interface que permite essa conectividade, pelo que a clareza com que são transmitidos dados e informações ao condutor são de extrema importância para que seja assegurada uma experiência de condução agradável e segura. É para isso que surgem os estudos do efeito dos problemas do tipo “Mura”, e, no caso deste projeto, da uniformidade do negro (BU) em painéis de instrumentos digitais (*cluster*) que utilizam ecrãs LCD. A presente dissertação foi realizada em parceria com a Bosch Car Multimédia Portugal, S.A. O objetivo do projeto foi avaliar o efeito do aparafusamento de peças estruturais de um *cluster*, com defeitos dimensionais devido ao seu empeno e encontrar soluções mecânicas que permitam mitigar esse problema. Primeiramente, foi efetuada uma recolha de possíveis soluções e após essa triagem foram escolhidas as que ofereciam mais vantagens e se enquadravam mais nos objetivos do projeto. Posteriormente foi feita uma modelação das peças em *Catia V5* onde foram introduzidas possíveis soluções consideradas na forma de conceitos (*features*). De modo a avaliar o seu desempenho, criou-se um modelo do futuro protótipo para cada conceito e foram realizadas simulações numéricas no *Ansys Mechanical* de modo a avaliar a força necessária para a sua deformação e o seu efeito nas tensões e deformações causadas considerando o empeno típico das peças. Através desta análise foi possível determinar qual a conceito mais adequada para prosseguir com os testes, pelo que se procedeu à prototipagem de versões do modelo utilizado para as simulações com/sem conceito e com diferentes casos de empeno simulado. Foi efetuado o aparafusamento destas peças e os resultados, apesar de apenas ter sido usada uma amostra, foram satisfatórios pois revelaram que a força de aperto e a curva de aparafusamento variavam como era pretendido. Por fim, foram apresentadas as conclusões do trabalho e as propostas de trabalho futuro de modo que possam ser aprofundados os resultados obtidos efetuando mais testes de aparafusamento e medindo o BU das peças com esta conceito.

## PALAVRAS-CHAVE

*Aparafusamento; Compósitos; Displays; Explicit Dynamics; Uniformidade do Negro*

## **ABSTRACT**

Nowadays, vehicle interiors are becoming more and more automated and because of that the connectivity between driver and vehicle play a very important role. Displays are the interface that allows this connectivity, so the clarity with which data and information are transmitted to the driver is of utmost importance to ensure a pleasant and safe driving experience.

Therefore, studies of the effect of “Mura” type problems arise, and, in the case of this project, of black uniformity in digital clusters that use displays. This Master’s Thesis was carried out during an internship at Bosch Car Multimédia, S.A. The objective of this project was to evaluate the effect of screwing structural parts of a cluster, the System Carrier, and Carrier Frame, which are prone to warpage, and find mechanical solutions to mitigate this problem. Firstly, a collection of possible solutions was carried out, after which, those that offered the most advantages and were more in line with the project's objectives were chosen to be studied further. Later, a modeling of the parts in Catia V5 was made, where possible solutions considered in the form of features were introduced. So that an assessment of its performance could be made, a model of the future prototype was created for each feature and numerical simulations were performed in Ansys Mechanical to evaluate the force required for its deformation and its effect on the stresses and strains caused by the tightening of the components considering the typical warpage of the parts. Through this analysis, it was possible to determine which feature was most suitable to proceed with the tests, so the model versions used for simulations with/without features and with different cases of simulated warpage were prototyped. These parts were screwed on and the results, although with only one sample being used, were satisfactory as they revealed that the tightening force and screwing curve varied as intended. Finally, the conclusions of the work and proposals for future work were presented so that the results obtained by carrying out more screwing tests and measuring the Black Uniformity of the parts with this feature can be deepened and a well-thought-out assessment of the feature’s performance can be made.

## **KEYWORDS**

Black Uniformity; Composites; Displays; Explicit Dynamics; Screwing

## ÍNDICE

Agradecimentos .....	iv
Resumo.....	vi
Abstract .....	vii
Índice .....	viii
Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tabelas.....	xvi
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	xvii
Lista de Símbolos.....	xviii
Glossário .....	xix
1 Introdução.....	1
1.1 Robert Bosch GmbH .....	1
1.2 Bosch em Portugal.....	3
1.3 Bosch Car Multimédia Portugal, S.A.....	4
1.4 Enquadramento do projeto.....	4
1.5 Objetivos e Metodologia .....	4
1.6 Estrutura da dissertação.....	5
2 Estado de Arte.....	7
2.1 Problemas do Tipo “Mura” e Black Uniformity.....	7
2.1.1 Medição do BU .....	8
2.1.2 Fatores que afetam o Black Uniformity .....	12
2.2 Conceitos Mecânicos dos Clusters .....	14
2.2.1 Ligação por adesivos .....	14
2.2.2 Ligação mecânica .....	18
2.2.3 Propriedades gerais dos compósitos e dos GFRP .....	25
2.2.4 Fibras de Vidro .....	27
2.3 Método dos Elementos Finitos.....	32
2.3.1 Introdução e Fundamentos.....	32
2.3.2 Análise linear estática .....	34

2.3.3	Não linearidade .....	37
2.3.4	Requisitos .....	40
2.3.5	Programa computacional escolhido.....	42
2.3.6	Static Structural .....	47
2.3.7	Explicit Dynamics.....	53
2.3.8	Simulação Quasi-Static.....	59
3	Caso em Estudo.....	61
3.1	Descrição do Cluster .....	61
3.2	Caracterização do aparafusamento .....	62
3.2.1	Processo de Montagem do Cluster .....	67
3.3	Soluções propostas para reduzir a degradação do BU.....	68
3.3.1	Validação dos conceitos .....	73
3.3.2	Criação do modelo e Design das possíveis soluções.....	75
3.4	Simulações Efetuadas .....	76
3.4.1	Considerações .....	76
3.4.2	Deformações locais .....	81
3.4.2.1	Condições de fronteira.....	83
3.4.2.2	Feature castelo cónico .....	84
3.4.2.3	Feature castelo com <i>ribs</i> .....	88
3.4.2.4	Feature protuberâncias .....	92
3.4.2.5	Análise dos resultados .....	94
3.4.3	Simulação do aparafusamento .....	95
3.4.3.1	Modelo e recolha de resultados .....	96
3.4.3.2	Simulação desvios mecânicos.....	100
3.4.3.3	Feature castelo com <i>ribs</i> .....	102
3.4.3.4	Feature protuberâncias .....	104
3.4.3.5	Análise de resultados .....	105
3.5	Sumário.....	111
4	Validação Experimental .....	113

4.1	Materiais Escolhidos para o Protótipo .....	113
4.2	Modelo Protótipo .....	114
4.3	Ferramenta de Ensaio Experimental .....	114
4.4	Ensaio Experimental .....	117
4.4.1	Protocolo de Ensaios .....	117
4.4.2	Parâmetros de aparafusamento .....	117
4.4.3	Medição.....	118
4.5	Análise de Resultados.....	119
5	Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros.....	127
	Referências Bibliográficas .....	129
	ANEXO I – Desenho Técnico Peças.....	135
	ANEXO II – Desenho técnico Parafuso .....	140
	ANEXO III – Propriedades Materiais.....	141
	ANEXO IV – Desenhos Técnicos Ferramenta Ensaio Experimental.....	144
	ANEXO V – Recomendações Aparafusamento.....	153
	ANEXO VI – Parâmetros de Aparafusamento .....	154
	ANEXO VII – Fotografias Parte Experimental .....	155

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Um dos edifícios do Grupo Bosch em Braga [1].....	2
Figura 1.2 Metodologia escolhida para levar a cabo o projeto .....	5
Figura 2.1 – Ilustração dos tipos de defeitos Mura no ecrã do display [7].....	7
Figura 2.2 (da esquerda) Lente, filtro de cor, filtro de densidade neutra, obturador, dispositivo de carga acoplada [12] .....	9
Figura 2.3 Standard Vesa FPDM para a medição da uniformidade da cor, o LMD para as medições deve ser posicionado no centro e em quatro (ou 8) outros pontos que se encontram a 10% da altura e largura dos lados do display [13] .....	11
Figura 2.4 Imagem Luminância display parafusos sem aperto .....	13
Figura 2.5 Imagem Luminância display cavidade apertada [97].....	13
Figura 2.6 Tipos de juntas adesivas mais comuns [26] .....	16
Figura 2.7 Esforços de tensão (a), compressão (b), corte (c), clivagem(d) e arrancamento (e) [22] .....	17
Figura 2.8 Processo de Self-Riveting [29].....	19
Figura 2.9 Exemplo de perfis de features para o attachment mecânico [30] .....	20
Figura 2.10 Delaminação do tipo à entrada “ peel-up” (a) e do tipo à saída “ push down” (b) [29] .....	21
Figura 2.11 Maquinagem por laser (LBM) [34] .....	21
Figura 2.12 Comparação a curto prazo dos efeitos da relaxação na perda de pré-carga para juntas compostas por diferentes materiais [36] .....	22
Figura 2.13 Modos de falha de uma junta de compósitos aparafusada [30] .....	24
Figura 2.14 Componentes da moldação por injeção: (a partir da esquerda) fuso, grânulos, bandas de aquecimento, composto plastificado, molde [44] .....	27
Figura 2.15 Diferentes orientações das fibras num compósito, unidirecional (a), aleatória (b), bidirecional (0/90°) e multidirecional em diferentes planos (0°/±45) [49].....	28
Figura 2.16 Diferentes camadas num sfrp formado por moldação por injeção – (partindo do centro) núcleo (core), casca (shell) e pele (skin), adaptado de [52].....	29
Figura 2.17 Influência da orientação da fibra curva stress-strain à tração nas várias direções [57] .....	30

Figura 2.18 Discretização com elementos triangulares com 6 nós [67] .....	33
Figura 2.19 Resposta linear da flecha de uma viga encastrada (à esquerda) vs resposta não linear (à direita) [66] .....	38
Figura 2.20 Geometria do CONTA174. (à direita) constituído por 8 nós de forma quadrangular e (à esquerda) por 6 nós de forma triangular [75].....	40
Figura 2.21 Contacto surface-to-surface com deteção por pontos gaussianos [70] .....	40
Figura 2.22 Aspecto de um esquema de projeto no Ansys Workbench.....	42
Figura 2.23 Página do engineering data.....	43
Figura 2.24 Relação não linear entre força e deslocamento [79].....	48
Figura 2.25 Iterações pelo método Newton-Raphson [77].....	50
Figura 2.26 Iterações pelo método Newton-Raphson modificado [77] .....	50
Figura 2.27 Nonlinear Controls em Static Structural .....	51
Figura 2.28 Comando Ekill para Static Structural.....	52
Figura 2.29 Outline de uma análise em Explicit Dynamics .....	53
Figura 2.30 Variação dos tipos de análise por magnitude do tempo [82].....	54
Figura 2.31 Esquema de integração pelas diferenças centrais [88].....	56
Figura 2.32 Comparação (a) $CFL \leq 1$ , algoritmo estável e (b) $CFL > 1$ , algoritmo instável [89] .....	58
Figura 2.33 Exemplo de um gráfico comparando a energia interna (a azul) com a energia cinética (a vermelho) de uma análise quasi-static [91] .....	59
Figura 3.1 Desenho peças reais (da esquerda) Carrier Frame e System Carrier [97] .....	61
Figura 3.2 Simplificação das peças efetuada para simulações de conjunto .....	62
Figura 3.3 Vista em corte da junta composta pelos dois componentes.....	62
Figura 3.4 Torque vs ângulo para aparafusamento convencional (a) [18] .....	63
Figura 3.5 Torque vs ângulo para thread-forming com furo cego (b) [19] .....	63
Figura 3.6 Curva típica Torque vs Ângulo para thread-forming com furo passante (c) [17] ...	64
Figura 3.7 Representação da junta SC-CF com a representação das forças envolvidas durante o aparafusamento .....	65
Figura 3.8 Representação das forças presentes na junta após o aparafusamento.....	66
Figura 3.9 Design do castelo recomendado [20] .....	66
Figura 3.10 Vista explodida do Cluster.....	67
Figura 3.11 Tensões geradas na base do Carrier Frame .....	68

Figura 3.12 Conceito dispositivo deformável elasticamente.....	69
Figura 3.13 Conceito dispositivo deformável plasticamente.....	69
Figura 3.14 Conceito dispositivo com serrilha e patilha de retenção.....	70
Figura 3.15 Conceito Segundo Castelo Cónico.....	71
Figura 3.16 Conceito Segundo Castelo com Ribs.....	71
Figura 3.17 Conceito dois prismas perpendiculares nos castelos.....	72
Figura 3.18 Representação do modelo do Carrier Frame.....	75
Figura 3.19 Representação do modelo do System Carrier.....	76
Figura 3.20 Curva Engenharia Stress-Strain Ryton BR111 [97].....	78
Figura 3.21 Curva Engenharia Stress-Strain Celanex 2302 [100].....	78
Figura 3.22 Curva tensão-deformação verdadeira vs curva tensão-deformação engenharia	80
Figura 3.23 Uso na indústria dos critérios de rotura [94].....	81
Figura 3.24 Modelo simulação Boss.....	82
Figura 3.25 Modelo Simulação Ribs.....	82
Figura 3.26 Modelo simulação features protuberâncias.....	83
Figura 3.27 Condições de fronteira para simulações locais em Explicit Dynamics.....	83
Figura 3.28 Condições de fronteira simulação local em Static Structural.....	84
Figura 3.29 Vista em detalhe do segundo castelo do Carrier Frame e suas dimensões.....	85
Figura 3.30 Discretização Carrier Frame (esquerda) e System Carrier (direita).....	86
Figura 3.31 Faces do SC onde foi medida a força de reação.....	86
Figura 3.32 Gráfico Força-Deslocamento feature cónica.....	87
Figura 3.33 Vista em secção da tensão nas duas partes.....	87
Figura 3.34 Dimensões feature ribs.....	88
Figura 3.35 Modelo Feature Ribs.....	89
Figura 3.36 Gráfico Força-tempo feature ribs.....	90
Figura 3.37 Comparação Energia Interna vs Energia Cinética feature Ribs.....	90
Figura 3.38 Dimensões feature protuberância.....	92
Figura 3.39 Modelo protuberâncias.....	92
Figura 3.40 Força vs tempo feature protuberâncias.....	93
Figura 3.41 Deformação ocorrida no Carrier Frame.....	94
Figura 3.42 Energia interna vs energia cinética protuberâncias.....	94

Figura 3.43 Comparação entre força de clamp das peças reais e resultados obtidos das simulações às features .....	95
Figura 3.44 Parafuso usado nas simulações. (À esquerda) modelação do parafuso; (à direita) detalhe rosca parafuso.....	96
Figura 3.45 Modelo utilizado nas simulações do aparafusamento .....	97
Figura 3.46 Posição inicial do parafuso .....	98
Figura 3.47 Condição de fronteira parafuso .....	98
Figura 3.48 (À esquerda) malha do parafuso; (à direita) malha da placa de suporte .....	99
Figura 3.49 Aparência da junta após efetuada a simulação, a cores deformação realizada.	100
Figura 3.50 Face de recolha de resultados do CF.....	100
Figura 3.51 (No topo) Modelo sem empenos; (No centro) Modelo com overlap de 1 mm; (Em baixo) Modelo com Gap de 1 mm.....	101
Figura 3.52 Esquema de sistemas de análise usado de modo a usar a geometria deformada nas simulações .....	101
Figura 3.53 Deformação do CF feature Ribs para os casos considerados .....	102
Figura 3.54 Tensão no CF feature Ribs para os casos considerados.....	103
Figura 3.55 Deformação do CF feature Protuberâncias para os casos considerados.....	104
Figura 3.56 Tensão no CF feature Protuberâncias para os casos considerados .....	104
Figura 3.57 Comparação valores deformação – sem empeno .....	105
Figura 3.58 Comparação valores deformação – Gap .....	105
Figura 3.59 Comparação valores deformação – Overlap.....	106
Figura 3.60 Deformação na face do CF sem Feature caso Gap .....	107
Figura 3.61 Deformação Gap Feature Protuberâncias .....	107
Figura 3.62 Comparação valores deformação máxima .....	108
Figura 3.63 Comparação valores tensão- Sem Empeno .....	108
Figura 3.64 Comparação valores tensão- Gap .....	109
Figura 3.65 Comparação valores tensão- Overlap.....	109
Figura 3.66 Comparação valores tensão máxima .....	110
Figura 3.67 Tensão face CF sem feature e Gap 1 mm.....	111
Figura 3.68 Tensão feature protuberâncias e Gap 1 mm .....	111
Figura 4.1 (À Esquerda) Geometria peças impressas; (À Direita) Geometria peças modeladasFigura 3.38.....	114

Figura 4.2 Modelo CAD da estrutura de suporte com representação dos comparadores montados e da aparafusadora .....	115
Figura 4.3 Placa de suporte utilizada .....	115
Figura 4.4 Vista em detalha da montagem do protótipo para efetuar os aparafusamentos	116
Figura 4.5 Foto do protótipo montado .....	118
Figura 4.6 Curva de aparafusamento para o caso com feature e gap de 1 mm.....	119
Figura 4.7 Curva de aparafusamento para o caso sem feature e gap de 1 mm .....	120
Figura 4.8 Comparação da zona de aperto para os dois casos .....	121
Figura 4.9 Declive Curva Binário c/Feature.....	121
Figura 4.10 Declive Curva Binário s/Feature .....	122
Figura 4.11 Força de aperto vs binário caso sem feature .....	123
Figura 4.12 Força de aperto vs binário caso com feature.....	123
Figura 4.13 Comparação c/ força de aperto modelo numérico caso s/ feature .....	124
Figura 4.14 Comparação deformação System Carrier s/feature simulação vs resultados experimentais.....	124
Figura 4.15 Comparação c/ força de aperto modelo numérico caso c/ feature .....	125
Figura 4.16 Pormenores força de aperto simulação features vs resultados experimentais deformação features.....	125
Figura 4.17 Pormenores força de aperto simulação features vs resultados experimentais deformação SC .....	126

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Concentração de óxidos em alguns tipos de fibra de vidro (adaptado de [59]) .....	31
Tabela 2 Métodos de formulação dos problemas de mecânica dos sólidos e estrutural (adaptado de [60]).....	35
Tabela 3 Resumo das vantagens e desvantagens de cada formulação (adaptado de [76]) ....	47
Tabela 4 Outras soluções encontradas .....	73
Tabela 5 Algumas propriedades dos materiais das peças .....	77
Tabela 6 Pontos Multilinear Isotropic Hardening para ambos os materiais .....	80
Tabela 7 Tipo de simulações usadas para as diferentes features.....	84
Tabela 8 Parâmetros de contacto Simulação Feature Cónica .....	85
Tabela 9 Definição do contacto na simulação features ribs .....	89
Tabela 10 Mass scaling nas features ribs .....	91
Tabela 11 Body Interactions feature protuberâncias .....	93
Tabela 12 Deslocamento aplicado ao parafuso .....	98
Tabela 13 Propriedades material PA2200.....	113

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

BU – *Black Uniformity*

LCD – *Liquid Crystal Display*

LCP – *Liquid Crystal Panel*

CRT – *Cathodic Ray Tube*

LED – *Light-emitting Diode*

FPD – *Flat Panel Display*

TFT – *Thin-film Transistor*

FOS – *Front-of-Screen*

JND – *Just Noticeable Difference*

LMD – *Light Measuring Device*

GFRP – *Glass Fiber Reinforced Plastic*

PPS – Sulfeto de Polifenileno

PBT – Polibutileno Tereftalato

PET – Polietileno Tereftalato

PCB – Printed circuit board

SFRP – Short Fiber Reinforced Polymers

MPC – Multi-point Constraints

FEM/MEF – Finite Element Method/Método dos elementos finitos

## LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo	Definição	Unidade
L	Luminância	Cd/m <sup>2</sup>
$\sigma$	Tensão	MPa
$\varepsilon$	Deformação	-
$\mu_e$	Coefficiente atrito estático	-
$\mu_d$	Coefficiente atrito dinâmico	-
$u, x$	Deslocamento	mm
F	Força	N
g	Força residual	N
C	Amortecimento	Ns/mm
M	Massa	kg
K	Rigidez	N/mm
$\dot{x}, \dot{u}$	Velocidade	mm/s
$\ddot{x}, \ddot{u}$	Aceleração	mm/s <sup>2</sup>
t	Tempo	s
E	Módulo de Young	MPa
$\rho$	Densidade	kg/m
c	Velocidade do som material	mm/s
T	Binário	Ncm
F <sub>c</sub>	Força de Aperto	N
F <sub>t</sub>	Pré-carga	N
T <sub>T</sub>	Binário de aperto	Ncm
T <sub>D</sub>	Binária abertura rosca	Ncm
U	Energia	J

## GLOSSÁRIO

**Cluster** – Nome utilizado na empresa para designar os painéis de bordo de instrumentos (volante, tacómetro, velocímetro, etc).

**System Carrier** – Peça injetada que faz parte do painel de instrumentos em estudo. É uma carcaça que serve de cobertura (*back cover*) do painel e é aparafusada ao Carrier Frame.

**Carrier Frame** - Peça injetada com função estrutural no painel de instrumentos. Serve para acomodar os diferentes constituintes do painel (PCB's, dissipador de calor, adesivos, etc) e é a peça que está em contacto com o ecrã LCD.

**Display** – É o ecrã do painel de instrumentos onde a informação relativa ao funcionamento do automóvel é mostrada. É no *Display* onde a uniformidade do negro é medida e onde se pretende reduzir as tensões derivadas do aparafusamento.

**Black Uniformity (BU)** – Uniformidade do negro, representa a capacidade do ecrã de mostrar o preto uniformemente ao longo da sua extensão.

**Feature** – Nome utilizado para a aplicação dos conceitos, ou possíveis soluções, às peças em estudo.

**Warpage** – Defeitos dimensionais provenientes do processo de fabrico das peças que provocam a alteração dos contactos entre as peças no processo de aparafusamento. Em relação aos contactos entre os castelos das peças, podem levar a que estes se encontrem com uma folga (*Gap*), ou que se encontrem mais encostados (*Overlap*).

**Mura** – Termo usado na indústria para as zonas de baixo contraste e irregulares que causam a não uniformidade do ecrã LCD.

# 1 INTRODUÇÃO

Atualmente a indústria automóvel prende-se por alcançar a excelência a todos os níveis. Para que todas as necessidades e desejos do consumidor possam ser satisfeitos, o funcionamento de todos os componentes de um automóvel deve corresponder estritamente a como foram desenhados. De modo que qualquer comportamento não previsto é investigado de modo a poder solucioná-lo. Certos comportamentos podem provir de vários fatores, e é importante conhecê-los todos para solucionar o problema. O componente em estudo neste trabalho é um painel de instrumentos, e pretendeu-se estudar o efeito da transmissão de esforços num dos seus componentes na deterioração do *Black Uniformity*. Esses esforços são gerados através do aparafusamento do *System Carrier* ao *Carrier Frame*, pelo que estes são os dois principais componentes em estudo. Foi feita uma simulação desse aparafusamento e foram consideradas possíveis soluções no sentido de minimizar esses esforços.

Neste capítulo será apresentado o tema trabalhado nesta dissertação, o seu enquadramento com os outros projetos que estão atualmente a ser investigados no departamento onde estive inserido, e objetivos deste. Este trabalho foi desenvolvido durante um estágio curricular em parceria com a Bosch Car Multimédia Portugal, S.A., cuja duração foi de 8 meses.

Nos subcapítulos seguintes é feita uma apresentação do Grupo Bosch, da sua história e dos mercados onde está inserido atualmente, passando depois à Bosch em Portugal e ao que se dedica no nosso país. São também descritos os objetivos que teve este projeto, o seu enquadramento e a estrutura da dissertação.

## 1.1 Robert Bosch GmbH

Bosch é uma empresa multinacional com sede em Gerlingen que é líder mundial em ramos como soluções de mobilidade, tecnologia de energia e edifícios, bens de consumo e tecnologia industrial.

A empresa emprega cerca de 395000 colaboradores em todo o mundo (31.12.2020) e faturou em 2020 cerca de 71,5 mil milhões de euros. [3]



*Figura 1.1 – Um dos edifícios do Grupo Bosch em Braga [1]*

Fundada em 1886 por Robert Bosch, começou como uma oficina de mecânica de precisão e engenharia elétrica. No princípio trabalhava maioritariamente com a instalação de sistemas de telefone e campainhas elétricas, e os primeiros anos são caracterizados por tanto altos como baixos.

No entanto, a partir de 1897 começou a instalar aparelhos de ignição por magneto em automóveis, onde se distinguiu das outras empresas pela sua fiabilidade. A partir daí desencadeou-se uma rápida expansão. No ano seguinte foi fundada a primeira empresa Bosch fora da Alemanha, que se seguiu por outras em outros países europeus. Com a virada do século, Bosch viu a oportunidade de expandir o mercado mundialmente e em 1910 já estava presente em todos os continentes. Após a grande guerra, com vista a fazer ressurgir a imagem da marca, o inovador chefe, Gottlob Honold, desenhou o famoso logotipo da Bosch, uma ancora dentro de um círculo.

Nos anos seguintes a Bosch continuou a inovar com produtos como limpa-para-brisas e buzinas e produtos essenciais como a bomba de injeção a diesel, conseguindo reinventar-se para fazer frente à crise de meados da década 20, com parcerias e novas áreas de negócio.

Com o advento da segunda guerra mundial, as dificuldades continuaram com várias fábricas de produção bombardeadas. Com a saúde deteriorando-se desde 1937, em 1942 Robert Bosch acaba por falecer em tempo de guerra. O seu maior desejo no testamento foi que a

empresa continuasse a mostrar um “desenvolvimento forte e com sentido”, num sentido não só de crescimento, mas também de apoio a causas sociais e de caridade. [2]

A história de uma empresa afeta a responsabilidade que esta sente nas suas atividades. Um produto Bosch é um produto cunhado com valores como a sustentabilidade, a *compliance* e a qualidade.

Hoje, a Bosch continua com o objetivo de inovar para fazer frente aos desafios atuais que nos são apresentados, sempre seguindo o slogan “Invented for Life”, Bosch molda a mudança em temas como a condução autónoma, a inteligência artificial, o combate à poluição do ar, automação industrial, e-bike, etc. Soluções benéficas não só para o consumidor, mas que diretamente afetam o tempo em que vivemos. [4]

## **1.2 Bosch em Portugal**

Em Portugal, a Bosch encontra-se presente em 5 pontos. Três destes destinam-se à produção e ao desenvolvimento e os outros dois representam a Bosch ao nível de serviço de vendas e marketing. Estas unidades encontram-se distribuídas pelo norte e centro de Portugal e em Lisboa. Em Braga encontra-se a Bosch Car Multimedia, que se foca no desenvolvimento e produção de soluções multimédia e sensores de automóveis. Em Aveiro, a Bosch Termotecnologia, onde é gerida a unidade de negócios de água quente residencial, produz equipamentos como esquentadores, caldeiras e bombas de calor, é fornecedora a nível mundial. Em Ovar, a Bosch Security Systems – Sistemas de Segurança que produz e desenvolve sistemas de segurança e comunicação como alarmes de incêndio e displays eletrónicos. Por último, os últimos dois pontos localizam-se ambos em Lisboa, uma subsidiária da BSH Eletrodomésticos e a sede da Bosch em Portugal. A Bosch em Lisboa trabalha em áreas como vendas, formação e assistência técnica, no entanto, a organização tem-se expandido e atualmente é muito mais do que apenas um escritório, é composta por três entidades jurídicas, a Robert Bosch, a Bosch Security Systems e a Bosch Termotecnologia que são compostos por vários departamentos com ligação à relação comercial. [3] [4]

### 1.3 Bosch Car Multimédia Portugal, S.A

A unidade da Bosch em Braga abriu em 1990 como uma fábrica da Blaupunkt, uma empresa que se dedicava à produção de autorrádios. Era, já nesta altura, um foco importante para a região e para o país. Em 2009, no entanto, a marca acabou por ser vendida e a unidade passou a chamar-se Bosch Car Multimedia S.A. Sob este nome, alargou a sua produção, passando a fabricar vários produtos multimédia automóvel, como ecrãs *head-up*, sistemas de navegação, sensores de segurança e painéis de instrumentos. Uma aposta forte na formação e inovação são algumas das suas filosofias, fazendo parte de ambiciosos projetos como o *easyride*: mobilidade inteligente e tendo concretizado inúmeras parcerias com a universidade do Minho. [6]

### 1.4 Enquadramento do projeto

O estágio foi realizado com integração na equipa ECM3 do departamento XC-CI2 da Bosch Car Multimedia, S.A. Esta equipa trabalha com vários *clusters* de veículos de duas rodas e quatro rodas de várias marcas e trata de vários problemas de cariz mecânico e ótico, como problemas do tipo *Mura*, como é o caso do *Black Uniformity*, especificações mecânicas, métodos estatísticos para controlo de processo, entre outros.

O projeto surge no sentido de tentar minimizar o *Black Uniformity* associado ao aparafusamento do *Back Cover* com a armação (*frame*) do *cluster BMW 35 up 4.1*, que se trata de um aparafusamento de duas peças com materiais GFRP extremamente rígidos em que uma delas está colada ao ecrã, causando a propagação de esforços a este, e consequentemente deteriorando o BU.

### 1.5 Objetivos e Metodologia

O principal objetivo deste projeto é perceber o efeito dos desvios mecânicos que surgem da distorção (empeno) dos componentes quando estes são fabricados por moldação por injeção na deterioração do *Black Uniformity*, quando se dá o aparafusamento dos mesmos. Após ser feita esta avaliação, encontrar soluções construtivas que atenuem o seu efeito na deterioração do BU.

De modo a atingir esse objetivo, os seguintes passos devem ser seguidos:

- i. Estudo e caracterização dos dois componentes que vão ser aparafusados e materiais que os constituem, bem como tipos de desvios dimensionais que devem ser considerados;
- ii. Recolha de soluções que conceptualmente possam reduzir o efeito do empeno dos componentes e transformar as que demonstrem mais potencial em *features* dos componentes;
- iii. Criação de um modelo numérico que permita a validação das *features* através de simulações do aparafusamento;
- iv. Validação desse modelo numérico através de testes a protótipos com a consideração de diferentes casos de empeno;
- v. Medição ou simulação do *Black Uniformity* à peça original e à peça com a solução possível e comparar resultados.

A metodologia seguida encontra-se representada no esquema da Figura 1.2.



Figura 1.2 Metodologia escolhida para levar a cabo o projeto

## 1.6 Estrutura da dissertação

A tese começará por fazer uma introdução à empresa, em Portugal e no mundo, à sua história e aos seus atuais focos, ao enquadramento do projeto, e aos seus objetivos.

No segundo capítulo será aprofundado um pouco o que são os problemas do tipo “Mura” em *displays* e porque merecem continuar a ser estudados, seguido de como se dá a sua medição e fatores que afetam o BU. De seguida, um subcapítulo sobre ligações em plásticos, aprofundando as ligações por adesivos e as ligações mecânicas. Este capítulo termina com um subcapítulo sobre materiais compósitos e mais especificamente plásticos reforçados com fibras de vidro (GFRP). Seguidamente, será dada uma introdução ao método dos elementos finitos, a como funciona, vários métodos e tipos de análise, quais os requisitos para uma análise, introdução do software usado, o *Ansys Mechanical* e de algumas das suas funcionalidades. Será dada ainda uma explicação das limitações e características de dois tipos de análises que foram utilizadas no projeto e o porquê do seu uso.

No terceiro dar-se-á início à descrição do caso em estudo, das forças e parâmetros em jogo no aparafusamento dos dois componentes, conceitos que foram considerados como possíveis soluções ao problema, criação do modelo e método de validação dos conceitos. Por fim, serão apresentadas as várias simulações que foram efetuadas, considerações prévias, parâmetros utilizados e exposição dos resultados obtidos.

O capítulo 4 trata o design do protótipo que servirá para validar as simulações e do *jig*, ou estrutura de suporte, que foi desenhado para que se pudesse proceder ao aparafusamento do protótipo, bem como, ensaios efetuados, equipamentos de medição e aparafusadora utilizados. Contém a descrição de como se procedeu para cada ensaio e resultados que foram obtidos.

No capítulo 5 será feito um sumário das conclusões deste projeto e dada uma proposta de trabalhos futuros, para que se possa continuar o trabalho que já foi feito.

## 2 ESTADO DE ARTE

Neste capítulo serão expostos os problemas do tipo “Mura” em *displays*, formas de deteção e medição dos mesmos, assim como os fatores que afetam o *Black Uniformity*. Em seguida, será também feita uma apresentação das maneiras de ligação de plásticos, mais especificamente ligações por adesivos e ligações mecânicas plásticos que se usam em bastantes indústrias e que têm uma particular relevância em equipamentos da indústria automóvel. Por último, será feita uma breve descrição das propriedades dos compósitos com um maior enfoque nos compósitos com fibra de vidro.

### 2.1 Problemas do Tipo “Mura” e Black Uniformity

Problemas do tipo “Mura” são defeitos visuais que ocorrem durante a manufatura do *display*, sendo prevalentes em LCD’s, CRT’S, LED’s entre outros [7]. Com a dominância que têm atualmente os LCD’s no mercado dos *displays*, devido aos seus preços cada vez mais baixos e à excelente qualidade de imagem que oferecem, este problema vai ganhando cada vez maiores dimensões e por isso é merecedor de vários estudos a seu respeito. Neste caso, o problema surge num Flat Panel TFT-CLD que combina as vantagens anteriores com o facto de necessitar de pouco espaço, possuir baixo peso e baixo consumo de energia. Defeitos deste tipo afetam a qualidade Front-of-Screen (FOS) do display e podem ser de vários tipos e devido a vários fatores.

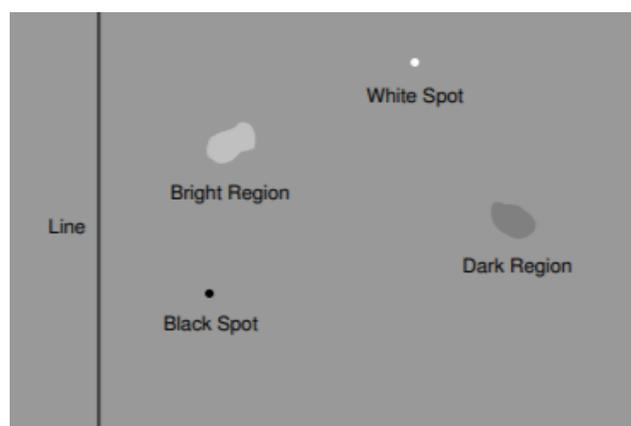


Figura 2.1 – Ilustração dos tipos de defeitos Mura no ecrã do display [7]

Dependendo da forma e tamanho do defeito podem ser classificados de *mura* de linha, *mura* de local e *mura* de região [7]. O que é comum a todos os tipos é que a aparência dos defeitos são zonas de baixo contraste com regiões não uniformes de brilho, e que tipicamente são maiores que um pixel [9]. Como se pode ver na Figura 2.1, defeitos do tipo *mura* de linha aparecem como uma linha no *display*, *mura* de local como um ponto, e *mura* de região como uma mancha não uniforme.

Da figura pode-se retirar que os problemas de BU se manifestam quando não é possível obter um negro uniforme no *display*, pelo que seriam visíveis no ecrã *White spots* ou *blobs*.

Em LCD's com transístores de película fina (TFT) torna-se não só um problema a sua presença, mas a sua identificação pode apresentar-se também um desafio, dado que existe intrinsecamente uma não uniformidade devido aos cristais líquidos não estarem distribuídos uniformemente e à variância que a retroiluminação (*backlight*) tem. O desafio de identificar estes defeitos passa por encontrar um limite que tenha em conta esta não uniformidade inicial e que consiga separar os defeitos que muitas vezes têm baixo contraste e mudança suave da luminância em relação às regiões não afetadas. [8]

#### 2.1.1 Medição do BU

Apesar de em muitos casos a inspeção visual humana em termos de performance seja melhor que a das máquinas no que toca à decisão e de esta ser, numa última etapa, o fator último no que toca à boa qualidade da imagem (quando esta possa ser comprovada pelos utilizadores), máquinas conseguem recolher e procurar imagens de uma forma muito mais rápida e precisa. [7] Posto isto, vários algoritmos têm sido desenvolvidos para a deteção automática dos defeitos, visto que a deteção pela perceção humana como método metrológico dá sempre lugar a variações estatísticas entre a observação e o observador. Atualmente os métodos automáticos permitem a deteção de diferenças JND (*just noticeable differences*). [9] Estas diferenças formam uma escala em que uma diferença de 1 é o “just noticeable” por um ser humano. Este tipo de análise parte de um algoritmo baseado num modelo da sensibilidade visual humana ao contraste espacial [10]. Este algoritmo tem como input a imagem a avaliar, captada pelo colorímetro e com possíveis defeitos *Mura* e uma imagem de referência, gerada a partir da outra após passagem de um filtro passa baixo de forma a eliminar o *Mura*. A

diferença entre as duas imagens é depois filtrada por uma função sensível ao contraste (CSF) que será multiplicada por uma função de abertura. No final, após um *pooling* não linear da imagem sobre o espaço obtém-se a imagem JND [9]. É possível formar um mapa da distribuição espacial da luminância e da cor do display com vários valores JND que darão uma classificação aos defeitos [9].

Um teste de medição das não uniformidades de uma display pode ser dividido em três componentes: [11]

1. Colorímetro por imagiologia: Permite a recolha de vários pontos de dados numa só medição, fazendo com que seja muito mais rápido que um método usando medição por pontos. Permite medir a luminância e cor de cada pixel num display simultaneamente, para um dado ângulo de medição [12]. Na Figura 2.2 estão representados os principais componentes de um colorímetro.

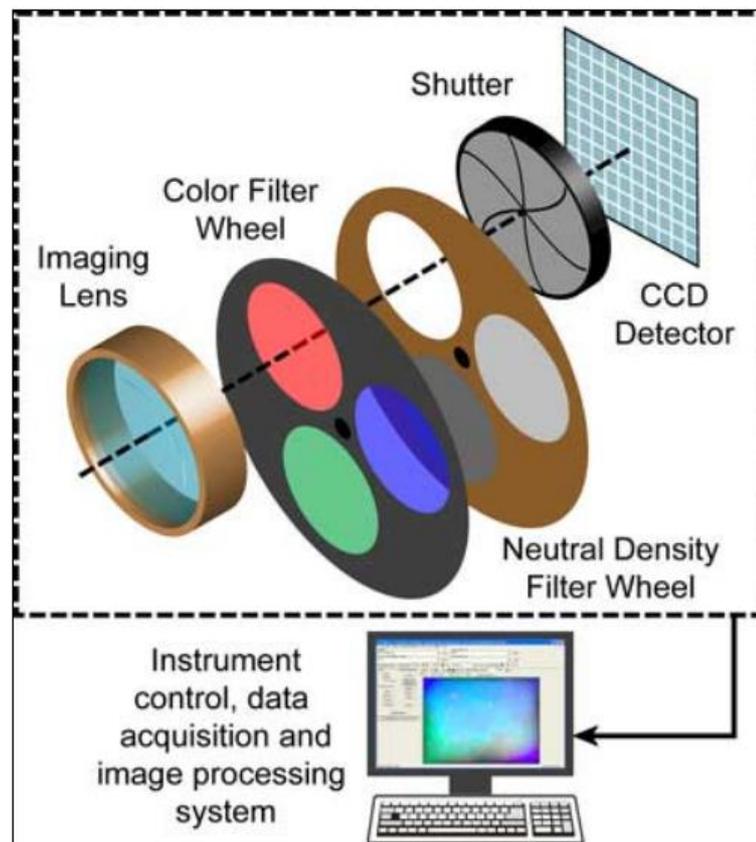


Figura 2.2 (da esquerda) Lente, filtro de cor, filtro de densidade neutra, obturador, dispositivo de carga acoplada [12]

2. Execução dos testes e Análise através de software: software que permita a deteção de defeitos, calcule as correções necessárias a fazer e decida se o equipamento é

rejeitado ou não [11]. Em certos casos, como no caso do *display* em estudo, a taxa de rejeição chega quase aos 20%, sendo uma grande parte destes *clusters* levados a retrabalho.

Para a medição com o colorímetro existem vários standards, uns mais aceites ao nível industrial, enquanto outros não são tão gerais e foram criados para um fim mais específico. A ISO 13406-2, que toma uma abordagem mais ergonómica à medição, tem como principal objetivo encontrar o nível de adequação do *display* a um ambiente de escritório, tratando também de aspetos como posição da cabeça do utilizador, direção da visão, legibilidade de caracteres e características de reflexão [13]. Está mais focado na classificação ergonómica do *display*, pelo que a medição é apenas um de outros tantos procedimentos. Por outro lado, existem normas como a VESA – norma para a medição de monitores de tela plana (*Flat-Panel Display Measurements Standard*), que é dos mais aceites e referenciados, conta na sua versão 2.0 com atributos como tratamento da fotometria, colorimetria, diagnóstico de medições e discussões técnicas e aplicações em indústrias como a aeroespacial, militar, médica, entre outras [13]. Estas normas no que toca à medição constituem diretrizes em como proceder para determinar as especificações do display, como a uniformidade da cor, o rácio de contraste, teste de reflexão, etc.

Procedimentos para certos testes podem não estar explícitos em alguns dos *standards*, também por isso é o da VESA o mais aceite, por apresentar uma forma padrão de proceder para uma grande parte dos testes. Independentemente do tipo de teste, o que o padrão nos indicará em relação às medições serão os pontos onde o LMD (Dispositivo de medição de luz) será posicionado e apontado, tanto em número de pontos como localização destes no *Flat Panel Display*.

No caso de testes à uniformidade da cor, o padrão da VESA indica a medição em pelo menos 5 locais que correspondem a pontos no display (ou 9), um no centro e os outros em zonas periféricas, como ilustra a Figura 2.3.

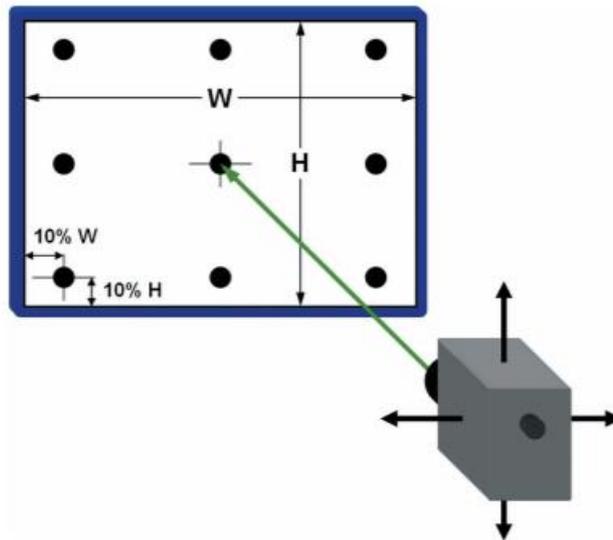


Figura 2.3 Standard Vesa FPDM para a medição da uniformidade da cor, o LMD para as medições deve ser posicionado no centro e em quatro (ou 8) outros pontos que se encontram a 10% da altura e largura dos lados do display [13]

Através destas medições pode ser calculada uma métrica de “não-uniformidade” [13] através da seguinte expressão:

$$\text{Não uniformidade} = 100\% \left[ 1 - \left( \frac{L_{\min}}{L_{\max}} \right) \right] \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde  $L_{\min}$  e  $L_{\max}$  representam a luminância mínima e máxima, respetivamente. Este parâmetro (a luminância) tem como unidades SI a candela (cd), e no caso dos *displays* os valores costumam ser apresentados como candela por metro quadrado ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) ou nits.

Embora o standard referido não indique qual é o critério de rejeição/aceitação do *display*, a partir dos valores da uniformidade e da não uniformidade estes podem ser definidos.

No *cluster* em estudo, o critério de rejeição é o nível de não uniformidade estar abaixo dos 40% ou 50%, dependendo da especificação, para medições ao *black uniformity*, e acima de 80% para o *white uniformity*. Dependendo dos *batches*, a rejeição devido ao *black uniformity* pode atingir os 17%. É importante salientar que uma parte significativa dos *clusters* rejeitados apresentam valores para o BU muito perto do limiar de aceitação (entre 45 e 50%), de modo que mesmo um melhoramento ligeiro do BU pode resultar em uma quantidade significativa

de componentes que não são levados a retrabalho e que resultam numa despesa extra para a empresa.

### 2.1.2 Fatores que afetam o Black Uniformity

O *Black Uniformity* em *displays* pode dever-se a vários fatores. Os defeitos podem provir do processo de montagem/manufatura do cluster, do próprio design do mesmo (por exemplo, como é garantida a fixação dos vários componentes ou a tensão induzida pela expansão térmica de componentes [14], não uniformidade da iluminância dos cristais pela retroiluminação do LCD). Saber quais as causas que afetam o *cluster* em consideração são de extrema importância para minimizar os problemas de uniformidade. Este projeto concentra-se apenas em avaliar se as tensões desenvolvidas no display durante o processo de aparafusamento são causadoras de uma degradação do BU, no entanto outros estudos foram feitos onde se avaliou a influência da planeza dos componentes para este mesmo *cluster*, como é o caso da união do *cover glass* ao *display*, da temperatura, do tempo tendo em conta o relaxamento dos polímeros, entre outros.

Relativamente ao caso em estudo, o efeito do aparafusamento na deterioração do BU, foram efetuados testes anteriores a este projeto onde se mediu o BU do display do cluster para o aparafusamento das diferentes cavidades da junta *System Carrier - Carrier Frame*. Os resultados mostraram que parece existir uma relação entre o aperto dos parafusos e a deterioração do BU, como se pode ver pelas Figura 2.4 e Figura 2.5.

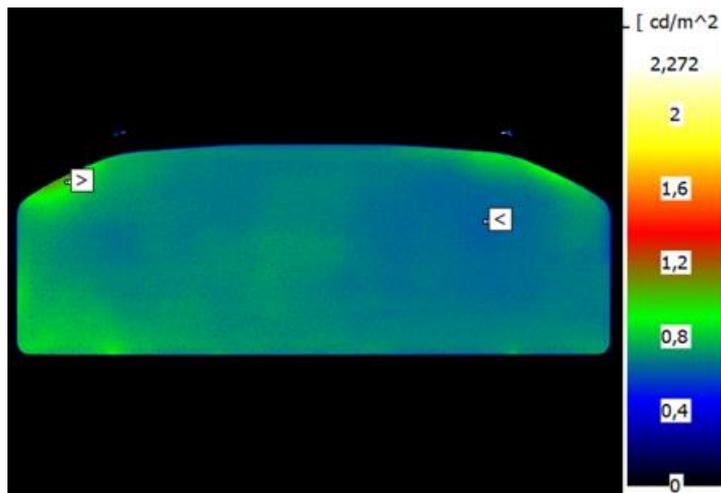


Figura 2.4 Imagem Luminância display parafusos sem aperto

Neste primeiro caso da Figura 2.4, os parafusos encontram-se por apertar e o valor de BU é de 61,87%. [97]

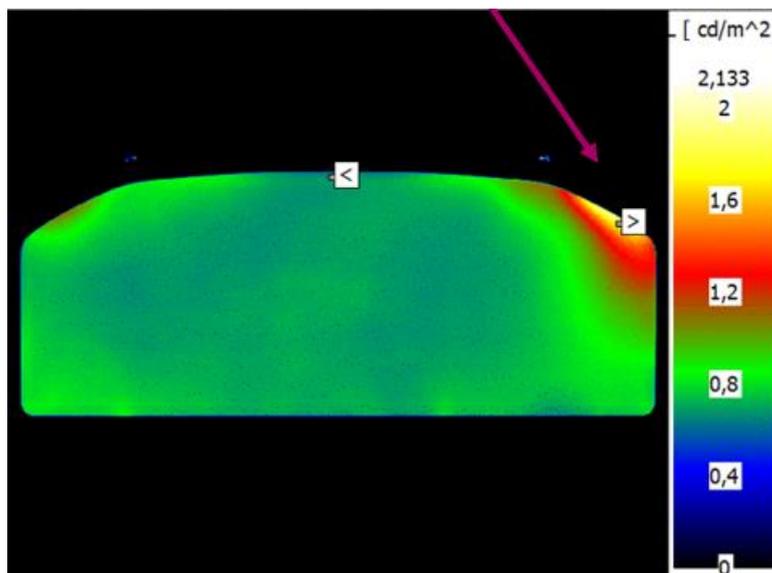


Figura 2.5 Imagem Luminância display cavidade apertada [97]

A Figura 2.5 serve para ilustrar o problema. Quando se deu o aperto da cavidade indicada pela seta da figura, o BU passou a 37%. [97]

Estas imagens servem apenas para ilustrar o problema, pelo que não serão mostrados todos os resultados dos testes. No entanto, estes foram efetuados a cada cavidade aparafusada em isolado, para averiguar o peso de cada uma no BU, e a todas aparafusadas ao mesmo tempo. Ao parafuso foi-lhe aplicado  $\frac{1}{2}$  de volta, 1 volta e  $1 \frac{1}{2}$  voltas, sendo também vista uma relação entre a deterioração do BU e a força de aperto aplicada pelo parafuso nas peças.

## 2.2 Conceitos Mecânicos dos Clusters

Os principais métodos de fixação que são usados no cluster em estudo são a ligação por adesivos e a ligação mecânica.

Para além destes dois métodos de ligação, dois materiais poliméricos podem ser fixados recorrendo a outras tecnologias de ligação, como: [22]

- Ligação (*bonding*) por solventes;
- Ligação por soldadura por aquecimento direto (laser, infravermelhos; ferramenta quente, gás, resistência);
- Ligação por aquecimento induzido (electrofundição, indução, dielétrico);
- Ligação por aquecimento gerado por fricção (ultrassons, radiação).

Neste capítulo será feita uma breve apresentação das ligações de peças plásticas mais usadas na indústria automóvel e no *cluster* em estudo, fazendo uma pequena descrição dos processos, preparações e tratamentos ao material, bem como algumas vantagens e desvantagens das mesmas, incidindo um pouco mais nas ligações mecânicas, que são as que estão diretamente relacionadas com o projeto.

### 2.2.1 Ligação por adesivos

Ligação por adesivos, ou colagem, pode ser usada tanto em polímeros termoendurecíveis como termoplásticos e traz várias vantagens relativamente aos métodos tradicionais não só em facilidade de realização, mas também em custo e durabilidade da junta.

Como foi dito anteriormente, os adesivos são usados para várias aplicações na indústria automóvel e é esperado que o número continue a crescer associado ao crescimento do número de materiais poliméricos e compósitos nos carros (estima-se que cresça de 8,1 mil milhões de dólares em 2019 a 10,7 milhões de dólares em 2024 [23]). Os adesivos podem cumprir diferentes funções em diferentes partes de um carro. Podem ser adesivos estruturais e atuarem com bastantes solicitações mecânicas, como os metacrilatos, servindo para a absorção de impactos ao mesmo tempo que resiste a altas temperaturas e oferecendo resistência ao corte da ligação adesiva [24]; podem ser adesivos com uma excelente adesão a vários materiais e por isso valer pela sua flexibilidade, como as resinas epóxido e acrílico;

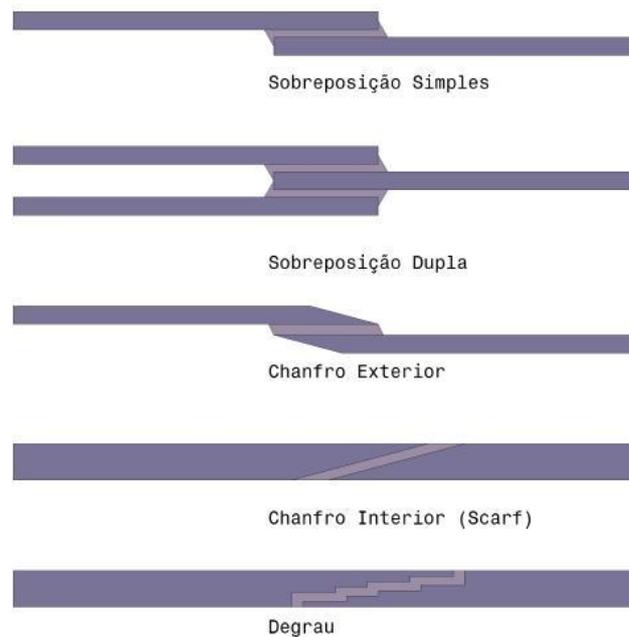
Podem também não ser líquidos e serem uma fita ou um filme, podendo servir para fazer a ligação com um vidro, uma ligação difícil devido à pouca rugosidade do vidro e à pequena área, ou em ligações no exterior como com o emblema de um automóvel [25]. Além da indústria automóvel, os adesivos também são muito usados na indústria naval, onde o número de compósitos e plásticos também está em crescimento, o que torna os adesivos uma escolha por excelência para as ligações entre componentes. Neste caso, no entanto, deverá ter-se em conta a resistência do adesivo ao meio marinho, que pode ser bastante severa [26].

Os adesivos podem ser classificados quanto à sua estrutura molecular e ser divididos nas três famílias características dos materiais poliméricos [22]:

- Resinas termoendurecíveis
- Resinas termoplásticas
- Elastómeros

A seleção do adesivo adequado pode ter em conta estas famílias, visto que estas apresentam propriedades diferentes entre elas, mas atualmente os adesivos usados costumam ser misturas de resinas, pelo que outras classificações serão mais adequadas, como segundo o processo de envelhecimento.

Uma união de componentes realizada por um adesivo é denominada junta adesiva ou junta colada. Os membros estruturais da junta, os dois membros que são unidos pelo adesivo, são denominados por substratos ou aderentes, estando a distinção dos dois termos na aplicação ou não do adesivo. Antes da aplicação são chamados de substratos e depois por aderentes, no entanto esta distinção não é muito comum de fazer-se e os dois termos são quase sinónimos [22].



*Figura 2.6 Tipos de juntas adesivas mais comuns [26]*

As juntas com adesivos podem ter várias configurações. Como representado na Figura 2.6, as configurações do tipo JSS (Junta de sobreposição simples), a JSD (junta de sobreposição dupla), com chanfro e em degrau são as mais comuns. Destas, as juntas do tipo JSS são as mais utilizadas, pelo seu rápido fabrico e facilidade de uso. No dimensionamento de uma junta adesiva deve ter-se em atenção não só às forças de corte, tração e compressão a que os membros estão sujeitos, mas também, em alguns tipos de junta, ao arrancamento e clivagem nas extremidades causado pela flexão dos aderentes [26] [22]. Este problema é de especial importância nas juntas do tipo JSS, sendo uma das suas desvantagens. Numa junta adesiva deve-se tentar que os esforços suportados sejam maioritariamente de corte, pois são menos localizados que os de clivagem e arrancamento, o que de uma forma geral faz com que tipos de juntas sujeitos a este tipo de esforços sejam mais resistentes [22]. Os esforços a que as juntas adesivas podem estar sujeitas estão representados na Figura 2.7.

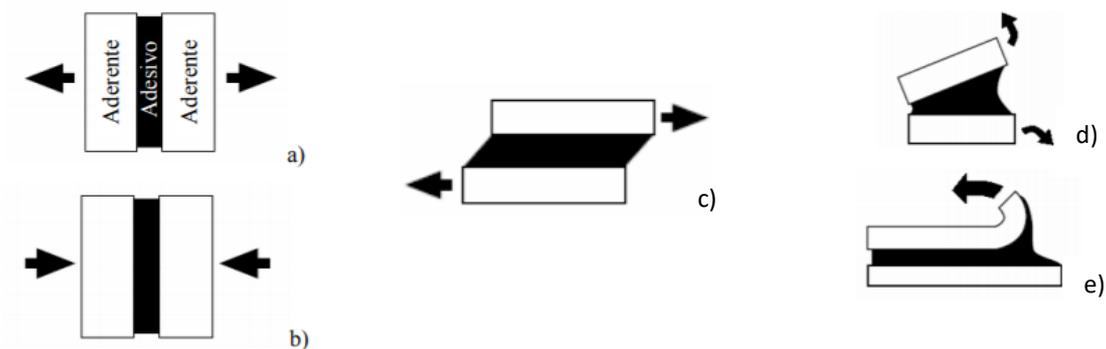


Figura 2.7 Esforços de tensão (a), compressão (b), corte (c), clivagem(d) e arrancamento (e) [22]

Os substratos de uma ligação adesiva muitas vezes têm de sofrer uma preparação prévia, pré-tratamentos, antes da aplicação do adesivo. Isto deve-se ao facto de ser necessário conferir atributos ao plástico de modo a facilitar a molhagem e a adesão do adesivo. Estes atributos são a rugosidade e a energia de superfície. Os tratamentos normalmente usados para os termoplásticos são por chama, por plasma e por corona. O uso destes tratamentos provocará um ou uma combinação dos três efeitos seguintes [22]:

1. Remoção do material da superfície, como uma camada fracamente ligada que dificulta a adesão desse aderente, que pode estar constituída por pó e outras partículas contaminadoras;
2. Modificação química da superfície, de modo a aumentar a sua energia de superfície;
3. Alteração da topografia da superfície, resultando na alteração da sua rugosidade.

Os adesivos possuem imensa flexibilidade de uso e vários elementos do *cluster* em estudo são unidos com recurso a esta tecnologia, como por exemplo o *display* ao *Cover Glass* e o *Cover Glass* ao *Carrier Frame*. Porém, o seu uso traz também desvantagens que tornam outros métodos de ligação melhores noutros casos e fazem com que sejam requeridas certas precauções no seu uso.

De uma forma geral as vantagens do uso de adesivo são as seguintes:

- Possibilidade de unir materiais diferentes: metais, plásticos, compósitos, entre outros;
- Um adesivo estrutural aumenta a resistência dos membros sem acréscimo de peso relevante, o que possibilita a produção de estruturas mais leves;

- Pode servir como elemento de vedação, protegendo contra partículas contaminadoras;
- Distribuição mais uniforme das tensões, o que leva a uma maior resistência à fadiga;
- Baixo custo e elevada cadência de produção;
- Boa aparência do produto.
- Boa resistência a vibrações

Quanto às desvantagens, geralmente são:

- Muitos adesivos necessitam de um tempo de cura longo para atingir o endurecimento esperado;
- Não permitem a desmontagem como as ligações aparafusadas;
- Gama de temperaturas limitada;
- Pré-tratamento dos aderentes muitas vezes moroso e dispendioso;
- Fraca resistência ao arrancamento;
- Toxicidade de alguns adesivos.

Em suma, a ligação por adesivos tem o seu lugar na indústria automóvel pela flexibilidade que permite na ligação de materiais diferentes, com o tratamento correto permitir montar componentes delicados como um *display* ou um PCB ao resto dos componentes e pela resistência que oferece sem aumentar consideravelmente o peso do produto

### 2.2.2 Ligação mecânica

Juntamente com a ligação adesiva, a ligação mecânica é das formas de unir componentes mais usada para os materiais plásticos e compósitos. Este tipo de ligações traz, mesmo à primeira vista, vantagens em relação à ligação adesiva, como possibilidade de desmontar e voltar a montar e não ser necessário preparação superficial dos componentes, que a tornam mais atrativa para inspeção e retrabalho. No entanto, o uso de ligações mecânicas em compósitos requer certos cuidados que se dispensam quando se trata de juntas metálicas. Dado que este projeto trabalha com o aparafusamento de GFRP, este subcapítulo será mais aprofundado do que o anterior e começará por falar dos elementos que podem ser usados para efetuar a ligação mecânica; cuidados a ter durante as várias fases do processo de união; testes

mecânicos *standard* feitos à junta; modos de rutura da junta e limitações dos compósitos no que toca a certos tipos de tensão; vantagens e desvantagens do processo.

Para além do aparafusamento, alguns outros elementos comumente usados para a união mecânica de compósitos e de compósitos a metais são:

- Rebites (*self-riveting* e *friction-riveting*), como ilustrado na Figura 2.8 ;
- Pinos.

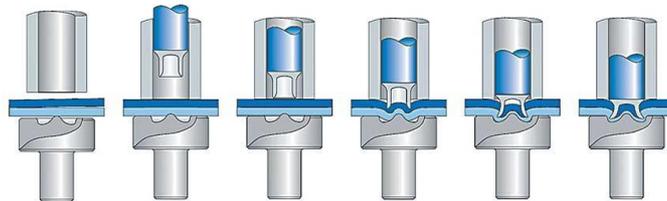


Figura 2.8 Processo de Self-Riveting [29]

Existem também outros processos mecânicos alternativos como *form-locked*, junta “*loop*” e ligação (*attachment*) mecânica que procuram oferecer vantagens em relação às ligações aparafusadas para tipos de materiais compósitos e condições específicas [28] [30].

O *attachment* mecânico, por exemplo, requer que os componentes sejam desenhados de forma a que o *attachment*, o componente que vai unir os dois componentes, possa interligar as duas peças de modo a que possam ser resistidos os esforços na junta. No entanto, este processo requer uma complexidade de moldação que o faz não muito útil para materiais compósitos, e por isso é mais usado em materiais termoplásticos sem reforço de fibra. [30]



Figura 2.9 Exemplo de perfis de features para o attachment mecânico [30]

Em compósitos, os furos podem ser formados durante o processo de manufatura ou após o mesmo. Furos pós-manufatura têm a vantagem de serem mais precisos pois não são afetados pela variação geométrica da peça durante a moldagem [30]. São feitos por remoção de material com tecnologias como a furação e a fresagem.

Ao contrário do que acontece nos metais, a criação de um furo num material compósito após a sua manufatura é extremamente difícil e pode levar a defeitos como delaminação, dano na fibra, dano na superfície, degradação térmica, fibras por cortar ou rasgo destas (tear-up) devido a ferramentas rombas [32]. Dado que os materiais compósitos são não homogêneos, anisotrópicos, contêm fibras duras e altamente abrasivas, bem como uma matriz sensível ao calor [29], apenas um número reduzido de materiais de ferramenta de corte podem ser usados e os mecanismos de desgaste da ferramenta considerados são muito diferentes aos considerados para materiais isotrópicos [29]. Estes problemas são mais perceptíveis na zona de entrada (*peel-up*) e saída da broca (*push-down*) e podem ser reduzidos com parâmetros associados à ferramenta (geometria e material da ferramenta) e à própria operação de corte (velocidade de corte e velocidade de avanço). Quando não considerados, estes defeitos podem causar danos estruturais que podem reduzir a *performance* dos componentes e a sua confiabilidade [30].

Dos problemas acima referidos, um dos mais comprometedores da força da junta são os de delaminação, que também afetam a sua resistência à fadiga [29].

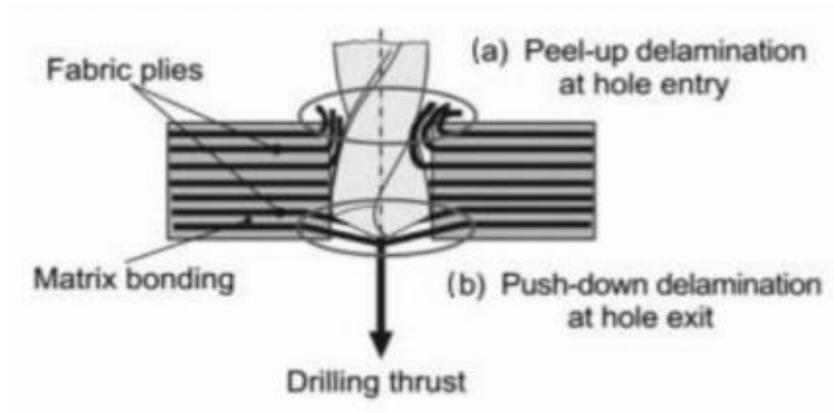


Figura 2.10 Delaminação do tipo à entrada “peel-up” (a) e do tipo à saída “push down” (b) [29]

Outras técnicas menos convencionais de maquinagem não-mecânica, como por jato de água (*water-jet*), eletroerosão, maquinagem por ultra-sons e maquinagem por laser também podem ser usadas, no entanto apresentam um maior custo e muitas vezes o tempo de corte é mais elevado que as técnicas convencionais, levando à preferência pelas segundas [29].

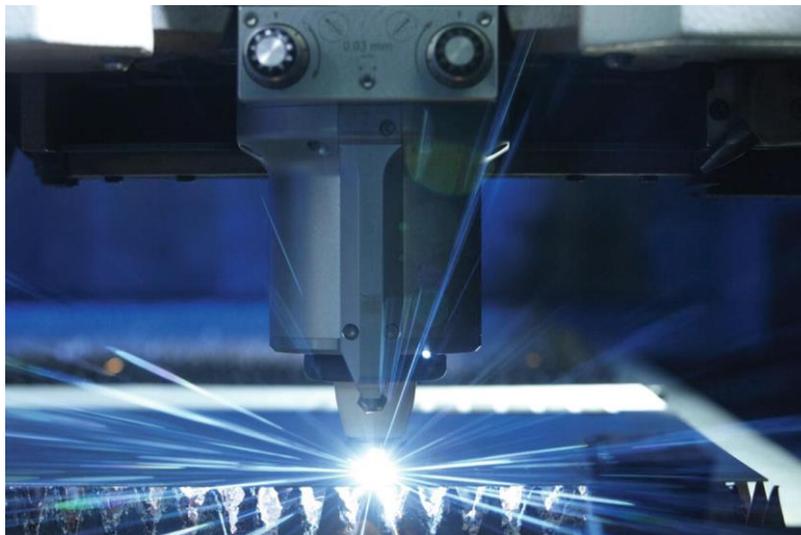


Figura 2.11 Maquinagem por laser (LBM) [34]

Posto isto, existem técnicas que permitem minimizar os danos causados pela furação ou eliminar a necessidade desta operação, algumas delas são [29]:

- Furos moldados, continuidade da fibra à volta do furo;
- Substituição de *plies* à volta do furo por filmes de titânio;
- *Bonding* de *inserts* metálicos no furo que impedem a propagação do dano;

O furo no cluster em estudo provém do processo de manufatura dos componentes e são moldados, pelo que eliminam completamente o dano causado pela furação.

Um outro aspeto importante do aparafusamento de materiais GFRP é a redução da pré-carga com o tempo. O relaxamento também acontece em juntas metálicas devido à incorporação das irregularidades de material das superfícies, esmagado à medida que prossegue o aperto do parafuso [34]. Para além deste fenómeno, graças à matriz polimérica do compósito que possui propriedades viscoelásticas, no aparafusamento de GFRP também ocorre o relaxamento por fluência. Este fenómeno ocorre à temperatura ambiente e é exacerbado por temperaturas elevadas e níveis de humidade elevados [38]. Este relaxamento ocorre pouco tempo após o aperto dos componentes e leva a mudanças dimensionais na zona do furo que podem levar ao desaperto do parafuso por perda de fricção [35], como se pode ver pela Figura 2.14. Nesse gráfico, as retas que representam a perda de pré-carga para diferentes matérias, onde é possível verificar que a maior perda de pré-carga acontece nos polímeros reforçados com fibra de vidro (GFRP). É, devido a isso, alvo de estudo no aparafusamento de materiais com estas características, dado a perda da força de aperto ser um fator crítico na segurança que oferece o aperto da junta e tem, por isso, uma grande influência nas outras propriedades do aparafusamento.

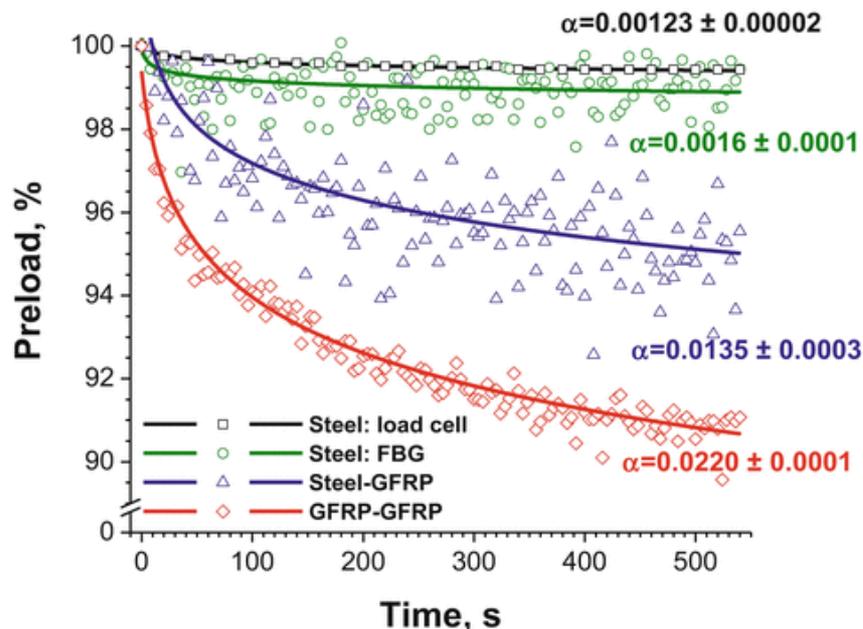


Figura 2.12 Comparação a curto prazo dos efeitos da relaxação na perda de pré-carga para juntas compostas por diferentes materiais [36]

Este efeito é mais evidente na direção dominada pela matriz polimérica do compósito, a direção “intra-espessura” - *through-the-thickness* (TTT) e para compósitos com fibras unidirecionais torna-se vital saber se a pré-carga vai ser retida (e quanto) após o aparafusamento e quais os efeitos da temperatura, humidade e cargas externas no relaxamento [38].

Existem normas como a ASTM F1276 - 99(2016) que indicam como devem de ser efetuadas as medições da relaxação por fluência medindo o comprimento do parafuso com um relógio comparador no final do aperto deste e passadas 22h num forno de convecção a  $100 \pm 2^\circ\text{C}$ . No final a percentagem de relaxamento é calculada a partir da seguinte expressão [37]:

$$\text{relaxamento, \%} = \left[ \frac{D_0 - D_f}{D_0} \right] / 100 \quad \text{Equação 2.2}$$

Consideram-se três modos de rotura de uma junta de compósitos aparafusada, com uma quarta que é uma mistura de dois (por clivagem). Estas são as seguintes e estão representadas na Figura 2.13:

- Falha por tensão de tração
- Falha por corte
- Falha por pressão de contacto
- Falha por clivagem

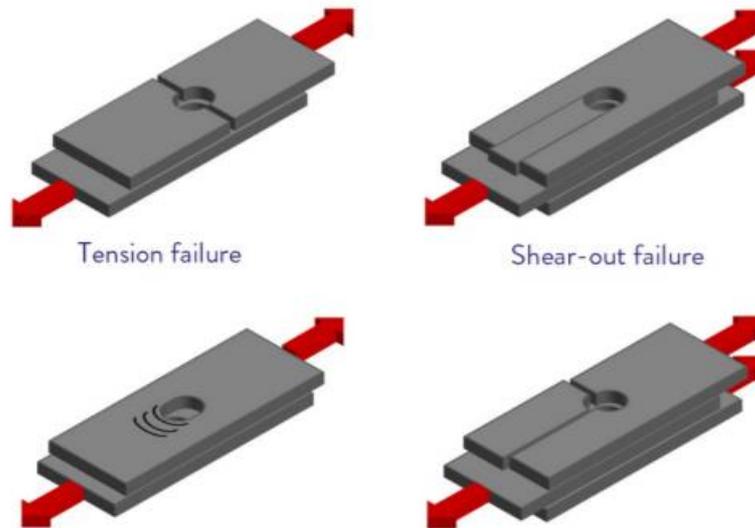


Figura 2.13 Modos de falha de uma junta de compósitos aparafusada [30]

A falha por tração ocorre na área entre o furo e o lado da estrutura e está associada à falha da fibra e da matriz por tensões de tração no canto do furo. [28] Costuma acontecer quando a secção transversal da peça (rácio  $w/d$ ) é pequena. [39] A falha por clivagem é uma mistura da falha por tração e por corte e ocorre maioritariamente quando a distância entre o lado da peça e o canto do parafuso é pequena [39]. A falha por cisalhamento é observada em peças com suficiente largura para resistir à falha por tração, mas insuficiente distância entre o furo e o lado. A falha por pressão de contacto ocorre devido à falha da fibra e da matriz por tensões de compressão e inclui fratura da matriz, microencurvadura e dobramento das fibras (*kinking*) e não pode ser evitada por alterações geométricas da peça. [39] Enquanto as roturas por tração e corte são súbitas e catastróficas, a rotura por pressão de contacto apenas ocorre quando se dá uma deformação exagerada do furo. [30] Devido ao dano ocorrer progressivamente, é o tipo de rotura desejado pois supõe um aviso antes da falha total. [39]

De modo a prever melhor a rotura, pode-se seguir a norma ASTM D 5766/5766M-02a para determinar a força à tração da peça com um furo aberto e um furo preenchido [38].

Partindo do exposto neste subcapítulo e no subcapítulo anterior, pode-se entender que as desvantagens do uso de ligações mecânicas nos compósitos são:

- Concentração de tensões causada pela existência de um furo;

- Danos causados pela furação, resultando em fibras que já não servem para transferir a carga e deterioração da resistência à fadiga [28];
- Fonte significativa de aumento do peso da estrutura, particularmente na indústria aeronáutica [30];
- Possibilidade de corrosão galvânica do parafuso pelo compósito (no caso do uso de um compósito com fibra de carbono);
- Possibilidade de entrada de água/detritos no furo/junta.

Apesar das desvantagens, as ligações mecânicas continuam a ser das mais populares formas de ligação de compósitos por:

- Facilidade de montagem/desmontagem;
- Único método factível e económico para juntas que suportam cargas elevadas (especialmente em aeronaves) [30];
- Tolerância a mudanças ambientais;
- Facilidade de inspeção e reparação;
- Reforço intra-espessura [30];

### 2.2.3 Propriedades gerais dos compósitos e dos GFRP

Os materiais compósitos são materiais multifásicos que se obtêm pela combinação artificial de diferentes materiais de modo a combinar certas propriedades destes. Ao contrário das ligas, que são formadas naturalmente por fundição, na formação dos materiais compósitos escolhem-se os componentes, a sua distribuição, proporção, morfologias, graus de cristalinidade e texturas cristalográficas, bem como estrutura e composição da interface entre os componentes [40]. A matriz e o reforço podem ser cerâmicos, plásticos ou metálicos, o que possibilita uma multitude de combinações. Com a procura sempre atual por materiais com específicas e especiais propriedades [41], os materiais compósitos tornam-se um material de excelência para a engenharia pelas suas possibilidades de personalização para várias áreas da indústria.

Entre os vários tipos de compósitos, os que possuem uma matriz polimérica assumem um grande papel em várias indústrias devido às suas excelentes propriedades físicas, mecânicas e térmicas [41]. O fabrico de compósitos com este tipo de matriz é muito mais fácil que o

fabrico com matrizes metálicas e cerâmicas devido à temperatura relativamente baixa de processamento. A matriz polimérica resulta da mistura de uma resina com um material de enchimento e aditivos, que melhoram certas propriedades como a resistência ao fogo e reduzem o seu custo [41].

A matriz polimérica pode ser classificada quanto ao tipo de polímero, termoendurecível ou termoplástico. Atualmente são mais comuns as matrizes com polímeros termoendurecíveis, devido à sua baixa viscosidade e facilidade de impregnação com as fibras [43], mas as matrizes com termoplásticos são agora o foco de desenvolvimento para aplicações onde são necessários compósitos estruturais com boas propriedades mecânicas [40].

Estes apresentam as seguintes vantagens em relação aos termoendurecíveis [40]:

- Menores custos de fabrico:
  - Sem necessidade de cura;
  - Menores riscos para a saúde;
  - Possibilidade de reaproveitamento (reparação e reciclagem);
  - Soldabilidade.
- Melhor *Performance*
  - Alta dureza
  - Boas propriedades a temperaturas altas/baixas
  - Boa tolerância ao ambiente

Como desvantagens encontram-se as seguintes:

- Elevadas temperaturas de processamento (tipicamente entre os 300°C e os 400°C [40]);
- Elevada viscosidade;
- Tratamento de superfície da fibra menos desenvolvido;
- Pré-impregnado (ou *prepreg*, são fibras de reforço ou tecidos nos quais a resina foi impregnada numa tarefa de pré-processamento [42]) é rígido e seco quando não é usado um solvente.

Um dos métodos de fabrico de compósitos com matriz termoplástica é a moldação por injeção. Este é o método de formação dos compósitos dos componentes em estudo e consiste em aquecer o *slurry* (mistura das fibras com uma resina líquida [40]) e forçá-lo até a abertura

de um molde fechado através de um fuso. Devido à alta viscosidade dos termoplásticos, a correta impregnação das fibras é difícil, o que pode resultar em vazios, baixa adesão e más propriedades mecânicas [43]. No entanto, a alta cadência de produção, possibilidade de moldar geometrias complexas, boa resistência ao impacto, melhor aparência superficial e possibilidade de reaproveitamento [43] fazem com que o fabrico de compósitos com matriz termoplástica por moldação esteja a evoluir e novas tecnologias como o uso de placas sólidas pré-impregnadas (formadas por moldação por compressão ou prensa de rolo duplo em moldação por injeção [43] e moldação líquida [43]).

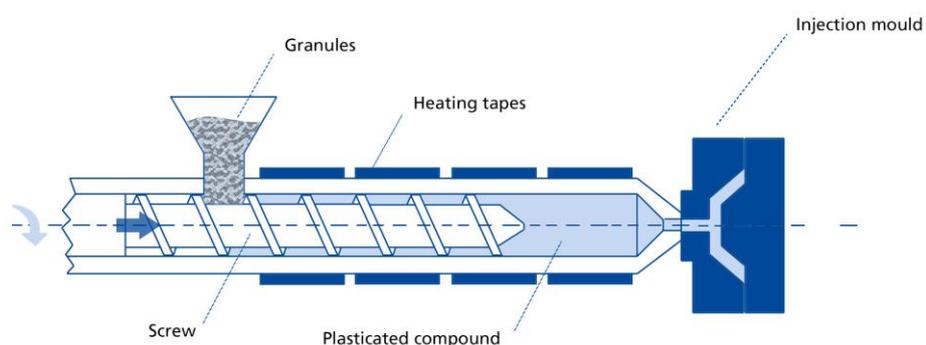


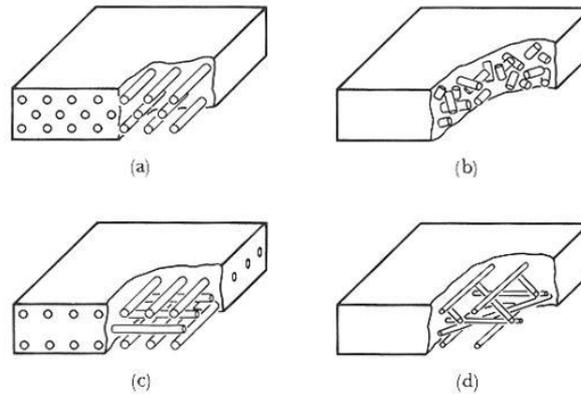
Figura 2.14 Componentes da moldação por injeção: (a partir da esquerda) fuso, grânulos, bandas de aquecimento, composto plastificado, molde [44]

Para que o produto fabricado por moldação por injeção possua dimensões precisas, reprodutibilidade e boas propriedades, devem ser considerados parâmetros como secagem antes da moldação, pressão e velocidade de injeção, temperatura do *slurry*, remoagem, *drool* (fenômeno onde, devido à baixa viscosidade, o material fundido sai do bico de injeção sem ser aplicada a pressão de injeção) [44]

#### 2.2.4 Fibras de Vidro

A principal função das fibras é suportar as solicitações mecânicas e fornecer a força e a rigidez à estrutura. O comportamento mecânico de um compósito depende das características mecânicas da fibra, da sua estabilidade química, força da matriz e interface de união fibra/matriz para permitir a transferência de tensões [46]. Existem várias formas de reforço

com fibras como filamentos contínuos, fibras contínuas dispostas aleatoriamente, fibras contínuas direcionadas ( $0/90^\circ$ ) entrelaçadas, fibras contínuas direcionadas ( $0^\circ/\pm 45/90^\circ$ ) [48], entre outras, que conferem ao compósito as propriedades da fibra na direção em que esta está disposta.



*Figura 2.15 Diferentes orientações das fibras num compósito, unidirecional (a), aleatória (b), bidirecional ( $0/90^\circ$ ) e multidirecional em diferentes planos ( $0^\circ/\pm 45$ ) [49]*

Os materiais dos componentes em estudo foram produzidos por moldação por injeção e estão reforçados com fibras curtas de vidro. As fibras de vidro curtas têm entre 0,125 e 0,5 mm de modo a conseguirem suportar as cargas de forma eficiente. [68] Neste processo sabe-se que a fração de volume e a orientação das fibras não é aleatória [50]. A orientação das fibras depende de parâmetros como o fluxo de material fundido, quedas de pressão, geometria do molde e polímero da matriz [68]. Através de uma secção em corte da peça onde se pudesse ver o fluxo entrar pelo molde, seria possível distinguir três zonas distintas de diferentes orientações e volume de fibras, como se pode ver na Figura 2.16.

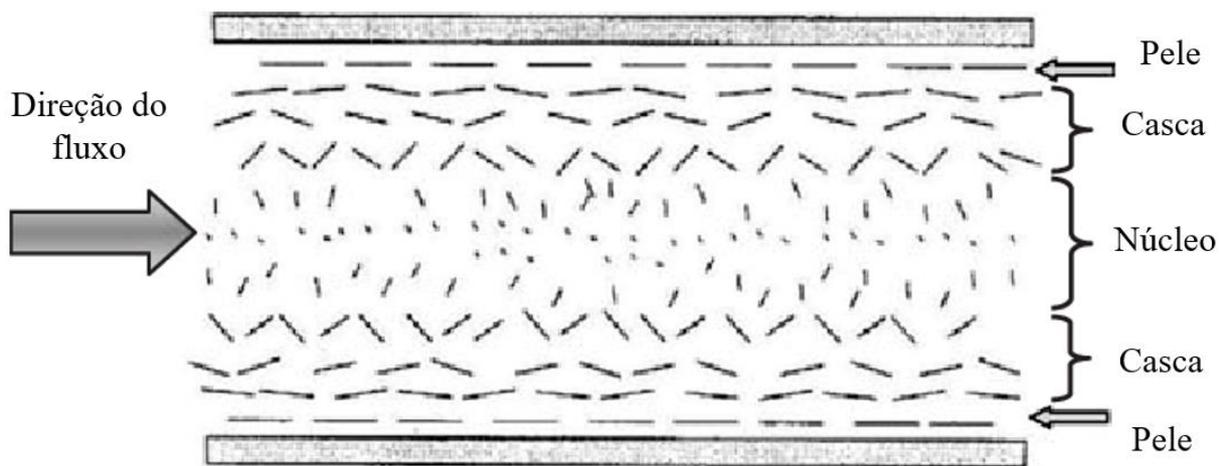


Figura 2.16 Diferentes camadas num sfrp formado por moldação por injeção – (partindo do centro) núcleo (core), casca (shell) e pele (skin), adaptado de [52]

Foi identificada essa morfologia para compósitos de fibra de vidro/poliamida 6 moldados por injeção [52]. Para esta morfologia verifica-se que nas camadas “casca” perto da parede e nas camadas *skin* as fibras estão maioritariamente orientadas segundo a direção do fluxo, enquanto no “núcleo” estão maioritariamente orientadas na perpendicular. Apesar de estes e outros estudos [54-57] feitos no sentido de encontrar um modelo que conseguisse prever e controlar a orientação e distribuição das fibras na moldação por injeção, continua a ser um desafio fazê-lo com precisão [57]. À parte disto, foram também feitos estudos e criados modelos para compreender as propriedades e comportamento mecânico dos SFRT. Estes modelos analíticos partilham as seguintes suposições [58]:

- As fibras e a matriz são linearmente elásticas, a matriz é isotrópica e as fibras são isotrópicas ou transversalmente isotrópicas (isotrópica em duas direções).
- As fibras são axisimétricas, iguais na forma e tamanho e podem ser caracterizadas pelo rácio  $l/d$ .
- A interface fibra/matriz mantém-se constante durante a deformação

Foi ainda estudada a relação entre o ângulo preferencial das fibras e a anisotropia [57], tendo-se concluído que para uma distribuição aleatória o material é aproximadamente isotrópico, para um ângulo de  $45^\circ$  o material é transversalmente isotrópico e que com o aumento do ângulo preferencial o módulo de elasticidade na direção predominante das fibras desce e o material vai-se tornando mais isotrópico (o rácio de anisotropia aproxima-se de 1). O rácio de anisotropia exprime-se da seguinte maneira:

$$R = \frac{2E_{xx}}{E_{yy} + E_{zz}}$$

Equação 2.3

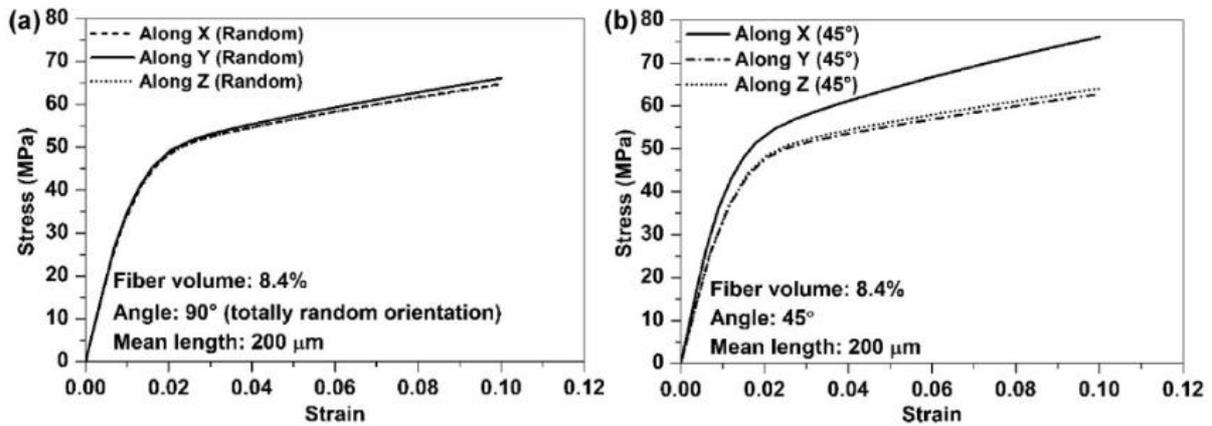


Figura 2.17 Influência da orientação da fibra curva stress-strain à tração nas várias direções [57]

Os resultados de estudos feitos da orientação das fibras, considerando o material homogêneo e isotrópico, para análises elasto-plásticas são um compromisso entre precisão e facilidade de uso [68].

Existem vários tipos de fibras de vidros dependendo da sua aplicação. Para materiais poliméricos a mais usada é do tipo E (*Electrical*), também chamada de E-glass. Outras comumente usadas são as C (*Chemical*) e a S (*Strength*). A diferença entre os tipos está na concentração de óxidos. Na Tabela 1 estão representadas as concentrações de óxidos para alguns tipos comuns.

Tabela 1 Concentração de óxidos em alguns tipos de fibra de vidro (adaptado de [59])

Óxido	C-glass (%)	E-glass (%)	S-glass (%)
$SiO_2$	64 – 68	52 – 56	64 – 66
$Al_2O_3$	3 - 5	12 – 16	24 – 25
$B_2O_3$	4 - 6	5 – 10	--
$CaO$	11 - 15	16 – 25	0 – 0,1
$MgO$	2 - 4	0 – 5	9,5 – 10
$ZnO$	--	--	--
$BaO$	0 - 1	--	--
$Li_2O$	--	--	--
$Na_2O + K_2O$	7 – 10	0 - 2	0 – 0,2
$TiO_2$	--	0 – 1,5	--
$ZrO_2$	--	--	--
$Fe_2O_3$	0 – 0,8	0 – 0,8	0 – 0,1
$F_2$	--	0 – 1	--

Para finalizar este capítulo, as vantagens das fibras de vidro relativamente às outras fibras usadas do mercado são:

- Baixo custo relativamente às outras fibras;
- Elevada resistência química e ao fogo;
- Boas propriedades de isolamento acústico, térmico e elétrico;
- Elevada resistência à tração e à compressão.

Quanto às desvantagens, elas são:

- Módulo de elasticidade reduzido
- Elevada massa específica
- Sensibilidade a temperaturas elevadas
- Baixa resistência à fadiga
- Sensibilidade à abrasão

## 2.3 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos é uma forte ferramenta de simulação que permite chegar a soluções aproximadas para problemas complexos. A solução é alcançada “partindo” o problema em várias partes, pequenas sub-regiões interconectadas [60], chamadas de elementos finitos.

Apesar do conceito ser antigo, chegar a uma solução aproximada de um problema com recurso a aproximações, considera-se que o artigo publicado por Courant em 1943 [102] onde este resolve um problema de torsão de um veio dividindo a sua secção transversal em triângulos e usando nós, a origem do método numa forma semelhante a como é usado hoje. O termo, no entanto, só seria cunhado por Clough em 1960. [103]

Hoje em dia não é apenas usado para resolver problemas relacionados com a aeronáutica [60] ou mecânica dos sólidos, mas também para problemas de mecânica de fluidos, transferência de calor e problemas transientes, entre outros. Tudo isto faz com que seja uma ferramenta de simulação transversal a todas as áreas da engenharia, de modo que todos os estudantes de engenharia têm um contacto prematuro com programas que usam o método. Neste capítulo será feita uma introdução ao método dos elementos finitos, onde serão apresentados os seus fundamentos e requisitos para uma análise. De seguida, será apresentado o *software* usado para as simulações, os seus ambientes, tipos de métodos de análise, limitações dos mesmos e alguns parâmetros a ter em conta quando se pretende fazer uma simulação usando o *Ansys Mechanical*.

### 2.3.1 Introdução e Fundamentos

No método dos elementos finitos, um meio contínuo de matéria, no estado físico, sólido ou líquido, é representado como um conjunto de subdivisões chamadas elementos finitos (*finite elements*) que se encontram ligadas por vértices denominados nós (*nodes*), na fronteira de elementos onde elementos adjacentes consideram-se ligados. Ao conjunto de elementos dá-se o nome de malha [60].

A variação das variáveis de campo consideradas (tensão, deformação, velocidade, etc) é por isso aproximada para o elemento finito através de uma função. Estas funções denominam-se modelos de interpolação [60], tomam uma forma matricial e sendo resolvidas revelam os

valores das variáveis nos nós, que depois quando juntas revelam o conjunto de valores para o elemento na sua totalidade, a distribuição espacial destas variáveis no corpo.

Quando é realizada uma análise numérica por MEF deve ter-se em conta as regiões de maior interesse do corpo para que todas estas estejam devidamente aproximadas pela representação elementar escolhida. Isto significa que certas zonas de grande interesse para a simulação devem possuir uma malha mais refinada de modo que se possa chegar a uma boa aproximação dos valores das variáveis. No entanto, no caso de uma malha mais densa o custo computacional será maior, o que equivale a um tempo de simulação também maior. Isto é de grande importância em, por exemplo, problemas resolvidos utilizando um método explícito, onde o *time-step* depende do tamanho do elemento mais pequeno, que será explicado mais adiante.

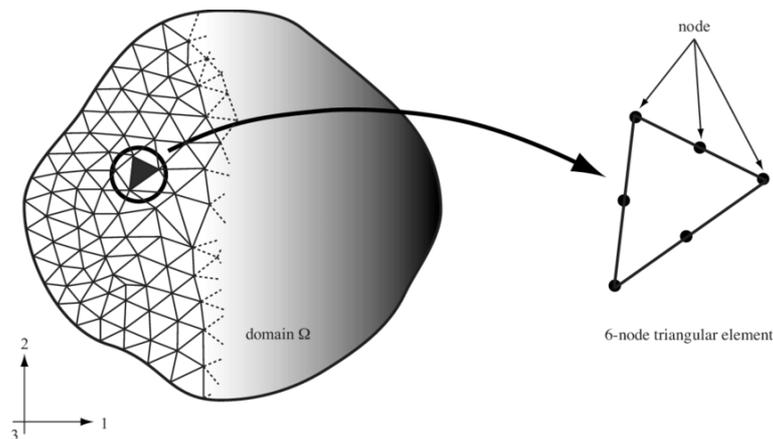


Figura 2.18 Discretização com elementos triangulares com 6 nós [67]

Com o aumento da capacidade computacional dos últimos tempos, é possível resolver problemas cada vez mais complexos usando o método e chegar a soluções cada vez mais aproximadas da realidade.

As análises por elementos finitos podem ser divididas de várias maneiras quanto à geometria dos componentes, modelo do material e tipo de ações aplicadas [61]. Dependendo do tipo de análise que for, o método dos elementos finitos será aplicado de maneira diferente, serão desprezadas forças e as equações podem ser simplificadas.

### 2.3.2 Análise linear estática

Numa análise estática são desprezados os efeitos provocados pela inércia associada às acelerações dos componentes e as condições de fronteira mantêm-se constantes quando é aplicada a carga, isto é, as solicitações e os resultados não dependem do tempo, pelo que este é desprezado. No caso de um problema de mecânica dos sólidos, isto significaria que a carga e a sua resposta seriam estáticas, enquanto num problema de transferência de calor, o fluxo seria nulo.

Uma análise linear tem como material um que siga o modelo linear elástico e que as deformações sofridas pela estrutura não afetam a distribuição de esforços e tensões, considera-se a estrutura inicial indeformada [61].

A análise linear estática é um tipo de análise muito comum em que existe uma relação linear entre a carga e o deslocamento, que depende das características geométricas do elemento e do seu material, que vão alterar a sua resposta à solicitação. Esta relação é dada pela seguinte equação:

$$[K]\{x\} = \{F\} \qquad \text{Equação 2.4}$$

Esta equação trata-se de uma adaptação da equação do movimento para sistemas dinâmicos desprezando os termos dependentes do tempo.  $[K]$  é uma matriz quadrada que representa a rigidez do sistema,  $\{x\}$  representa o vetor deslocamento e  $\{f\}$  o vetor das forças aplicadas.

De uma forma geral, o procedimento de resolução de um problema de este tipo dá-se por estes passos: [60]

- Divisão da estrutura em elementos finitos (discretização)  
Escolha dos elementos finitos adequados para a geometria em análise. Tendo em conta tipo, tamanho, número e arranjo da malha [60] para assegurar uma boa precisão dos resultados e mantendo um tempo de simulação não excessivamente longo.
- Seleção da interpolação ou modelo de deslocamento adequados

Funções que determinam a solução para cada elemento, são normalmente polinomiais. A solução a que a função chega deve ser simples de um ponto de vista computacional, mas satisfazer algum critério de convergência [60].

- Derivação da matriz de rigidez e dos vetores da carga  
Podem ser usados métodos como o do equilíbrio direto, método energético ou o método dos resíduos ponderados.
- Junção das equações dos elementos para obtenção das equações de equilíbrio  
Esta junção resulta numa matriz com os mesmos termos que a equação previamente apresentada.
- Resolução da equação para determinação dos deslocamentos  
Introdução das condições de fronteira que alteram a matriz  $[K]$  e o vetor  $\{f\}$ .  
Determinação do valor das incógnitas por métodos iterativos, eliminação de Gauss ou por decomposição LU [63].
- Determinação das deformações e tensões a partir dos deslocamentos  
Usando as equações de mecânica dos sólidos pode-se chegar aos valores das tensões e deformações

Como se pode ver na Tabela 2, existem 6 métodos de formulação dos problemas de mecânica dos sólidos e estrutural. [60]

Tabela 2 Métodos de formulação dos problemas de mecânica dos sólidos e estrutural (adaptado de [60])

Métodos de formulação de equações diferenciais			Métodos de formulação variacionais		
Método dos deslocamentos	Método das forças	Método das forças e dos deslocamentos	Princípio da energia potencial mínima	Princípio da energia complementária mínima	Princípio estacionário da energia de Reissner

Destes métodos, o dos deslocamentos é dos mais usados na literatura [60], pelo que as equações que o governam serão apresentadas.

As condições de equilíbrio interno que relacionam as 3 tensões da componente normal,  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ , e  $\sigma_{zz}$  e as 3 da componente de corte,  $\sigma_{xy}$ ,  $\sigma_{yz}$ , e  $\sigma_{xz}$ , são as seguintes:

$$\begin{cases} \frac{\delta\sigma_{xx}}{\delta x} + \frac{\delta\sigma_{xy}}{\delta y} + \frac{\delta\sigma_{xz}}{\delta z} + \Phi_x = 0 \\ \frac{\delta\sigma_{xy}}{\delta x} + \frac{\delta\sigma_{yy}}{\delta y} + \frac{\delta\sigma_{yz}}{\delta z} + \Phi_y = 0 \\ \frac{\delta\sigma_{xz}}{\delta x} + \frac{\delta\sigma_{yz}}{\delta y} + \frac{\delta\sigma_{zz}}{\delta z} + \Phi_z = 0 \end{cases} \quad \text{Equação 2.5}$$

Onde  $\Phi_x$ ,  $\Phi_y$  e  $\Phi_z$  representam as forças do corpo atuando nas direções x, y e z, respetivamente. O método dos deslocamentos passa por substituir as seguintes equações nesta primeira de modo que se obtenham 3 equações de equilíbrio com incógnitas os três componentes do deslocamento, u, v e w [60].

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\left[ dx + \left( u + \frac{\delta u}{\delta x} \cdot dx - u \right) \right] - dx}{dx} = \frac{\delta u}{\delta x} \quad \text{Equação 2.6}$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\left[ dy + \left( v + \frac{\delta v}{\delta y} \cdot dy - v \right) \right] - dy}{dy} = \frac{\delta v}{\delta y} \quad \text{Equação 2.7}$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\delta w}{\delta z} \quad \text{Equação 2.8}$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\delta u}{\delta y} + \frac{dv}{dx} \quad \text{Equação 2.9}$$

$$\varepsilon_{xz} = \frac{\delta u}{\delta z} + \frac{dw}{dx} \quad \text{Equação 2.10}$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{\delta w}{\delta y} + \frac{dv}{dz} \quad \text{Equação 2.11}$$

### 2.3.3 Não linearidade

No método dos elementos finitos, as não linearidades podem ser de três tipos:

- Não linearidade geométrica
- Não linearidade de contacto
- Não linearidade do material

Ao contrário das análises lineares, as equações de uma análise não linear não formam um espaço de vetores e não podem ser sobrepostas. Isto faz com que sejam mais complexas, mais difíceis de prever e muitas vezes irreversíveis. [63]

A maioria dos sistemas físicos são não lineares, mas podem ser simplificados em problemas lineares. Alguns problemas que são considerados com uma análise não linear são: Análise de força; análise de deflexão; rotura progressiva, entre outros.

Enquanto nas análises lineares o deslocamento  $\{x\}$  varia linearmente com a força aplicada  $\{f\}$  em função de uma matriz rigidez  $[K]$ , numa análise não linear ambas as variáveis dependem do deslocamento, a rigidez e a carga dependem do deslocamento. De modo que o processo de obtenção do deslocamento  $\{x\}$  terá de ser iterativo e por incrementos.

$$[K] = [K(\{x\})] \quad \text{Equação 2.12}$$

$$\{f\} = \{f(\{x\})\}$$

Equação 2.13

As não linearidades geométricas acontecem quando se está na presença de elevadas deformações (>5% [64]), ou deformações pequenas, mas deslocamento e/ou rotações finitos, como no caso de estruturas esbeltas que perdem a sua estabilidade mesmo para deformações pequenas devido à encurvadura. As não linearidades geométricas levam à alteração da rigidez da estrutura e, como acontece para estruturas altas e finas, pode ocorrer mesmo para deformações baixas.

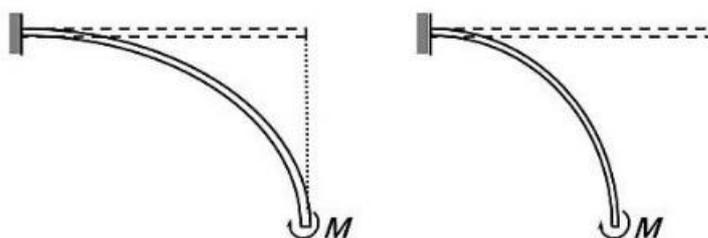


Figura 2.19 Resposta linear da flecha de uma viga encastrada (à esquerda) vs resposta não linear (à direita) [66]

Outro caso que também deve ser mencionado é o aumento da rigidez devido à tensão (*stress stiffening*) [65], causando a alteração da rigidez transversal da estrutura pela aplicação de cargas de compressão ou tração na direção axial.

Pode-se então concluir que, devido à alteração da rigidez do componente, a equação de equilíbrio sofrerá alterações com o decorrer da análise, pelo que deve ser atualizada.

A não linearidade do material pode dever-se a comportamentos independentes do tempo, como a própria plasticidade e rotura do material, ou por propriedades dependentes do tempo, como a fluência, ou o material exibir um comportamento viscoelástico/viscoplástico, onde a plasticidade e os efeitos do da fluência ocorrem em simultâneo [64].

Deste modo, todos os materiais com comportamento elástico-plástico podem exibir não linearidades quando é ultrapassada a sua tensão de cedência, sendo possível determinar quando se dá essa mudança a partir do critério da plasticidade.

Por último, a análise pode também ser não linear devido à não linearidade de contacto. Esta não linearidade surge na interface entre dois componentes e existe devido à necessidade de modelar as interações que ocorrem nessas zonas. Assegurando que não ocorre interpenetração entre os componentes [64], é necessário encontrar as fronteiras de contacto que variam de nó para nó e são muito sensíveis à discretização do modelo numérico [69].

Outros aspetos a ter em consideração são a fricção entre os dois componentes, o atrito, e materiais que exibem comportamento não linear, que dificultam ainda mais a convergência. [64]

Nos programas de análise numérica os utilizadores podem definir tipos de contacto que reduzem o custo computacional, podem levar a resultados mais precisos e a facilitar a convergência, como o nó-a-nó (*node-to-node*), nó-a-superfície (*node-to-surface*) e superfície-a-superfície (*surface-to-surface*) [64]. Em ansys de modo a definir o tipo de contacto pretendido devem usar-se *contact elements*, alguns destes são:

- CONTA178 – para contacto node-to-node, oferece flexibilidade nas formulações disponíveis, rigidez de contacto semi-automática, mais comportamentos de contacto em relação a outros elementos *node-to-node* [74];
- CONTA175 – pode ser usado para representar o contacto ou deslizamento entre uma superfície e um nó, entre duas superfícies e entre uma linha e uma superfície;
- CONTA174 – para elementos 3D, definido por 8 nós, podendo ser degenerado a formas quadrangulares/triangulares de 3-7 nós [74];

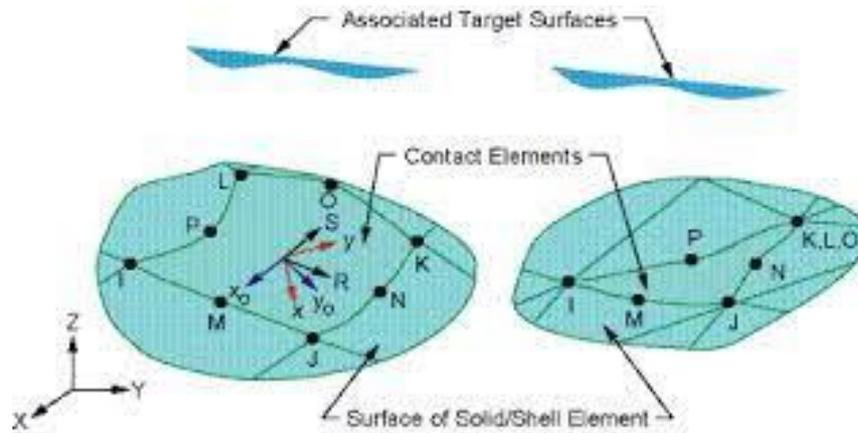


Figura 2.20 Geometria do CONTA174. (à direita) constituído por 8 nós de forma quadrangular e (à esquerda) por 6 nós de forma triangular [75]

A escolha de um ou outro tipo de contacto, depende de fatores como a diferença de rigidez entre os dois componentes, as geometrias de contacto, aplicação da carga e densidade da malha. Na Figura 2.21, pode ver-se um exemplo de um contacto superfície-a-superfície sendo neste caso os pontos de deteção os nós e os pontos gaussianos. Em *Ansys Mechanical*, este tipo de deteção poderia ser usado escolhendo como tipo de deteção “Pontos em Gauss” (*On Gauss Points*).

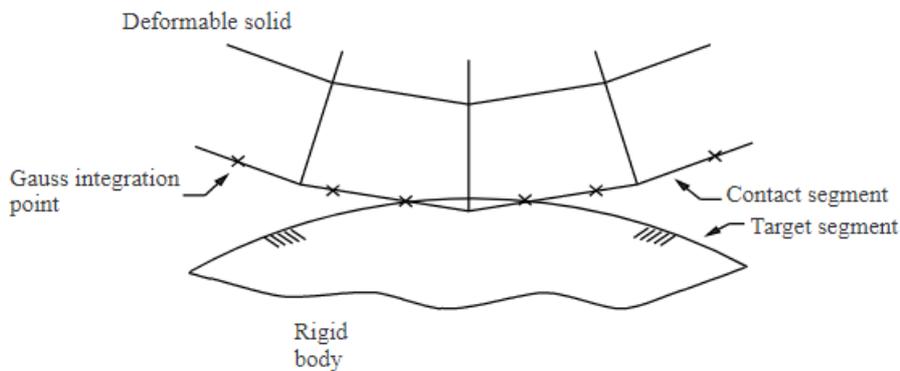


Figura 2.21 Contacto surface-to-surface com deteção por pontos gaussianos [70]

No subcapítulo 4.3 serão apresentados algumas das formulações que fazem o controlo da penetração e formas de deteção que são usadas no Ansys Mechanical.

#### 2.3.4 Requisitos

Concluindo do que foi exposto no subcapítulo anterior, os requisitos necessários para efetuar uma análise por elementos finitos num programa de análise numérica são os seguintes:

1. Modelo geométrico da peça a analisar criado num programa de CAD 3D, como o *Catia V5* ou o *Inventor*;
2. Definição das propriedades do material da peça: Introdução das propriedades físicas e escolha dos modelos de plasticidade e dano que melhor representem o comportamento do material numa análise numérica, caso estes sejam considerados na análise;
3. Escolha de uma malha com uma qualidade que garanta resultados precisos para um tempo de execução do programa adequado: ter em conta o tipo, tamanho e arranjo da malha, número de elementos, zonas críticas e presença de singularidades;
4. Condições de fronteira que representem as situações reais de funcionamento dos componentes: definição correta dos deslocamentos, cargas, suportes, contactos e, no caso de análises transientes ou pelo método explícito, condições iniciais.
5. Definição do tipo de *solver* pretendido e dos dados do *output*.

### 2.3.5 Programa computacional escolhido

O programa escolhido é o Ansys, um programa de grande uso na indústria que usa o método dos elementos finitos que inclui pré-processamento (criação da geometria e da malha), calculador (*solver*) e pós-processamento [60]. É utilizado para resolver vários problemas da engenharia, como dimensionamento e análise de estruturas, transferência de calor e fluidos, otimização da topologia, entre outros. Alguns tipos de análise suportados pelo *software* são: Análise estática, dinâmica, modal, transiente, termo-elétrica, entre outras. Ao painel inicial de interface com o utilizador dá-se o nome de *Ansys Workbench* que é a página que serve de controlo de projeto. Neste é possível criar a partir da *toolbox* sistemas de análise constituídos por módulos de arrastar e soltar (*drag-and-drop*) [71] que permitem importar ou criar uma geometria, definição das propriedades do(s) material(ais), discretização do modelo, *setup* da análise, a sua monitorização e pós-processamento.[71] Para este efeito estão disponíveis diferentes softwares, como o *Ansys Mechanical*, o *SpaceClaim*, o *Design Modeler*, entre outros. Na Figura 2.22 está representado um dos esquemas de projeto (*project schematic*) usados para as simulações numéricas efetuadas.

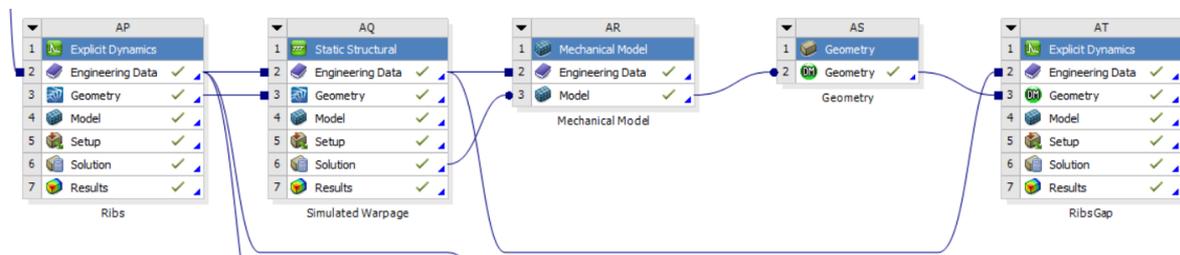


Figura 2.22 Aspecto de um esquema de projeto no Ansys Workbench

Como se pode ver pela figura, os módulos podem estar ligados e permitem a partilha de dados entre eles. No exemplo da figura, as propriedades dos materiais são as mesmas em todas os sistemas de análise e a geometria deformada do *Warpage* simulado é a geometria do *Ribs Gap* por meio destas ligações.

Estando o sistema de análise definido, é necessário começar a preencher os “blocos”. Os dados de engenharia (*engineering data*) é onde são definidas as propriedades mecânicas e

físicas dos materiais, bem como a escolha de modelos que traduzem o comportamento que queremos que o material tenha na análise, seja, por exemplo, um modelo linear elástico para uma análise linear elástica, ou a curva S-N do material para uma análise de fadiga.

O Ansys possibilita a opção de introduzir as propriedades do material da análise ou a escolha de um dos materiais predefinidos da biblioteca (*Engineering data sources*), cujas propriedades podem ser alteradas ou serem acrescentadas outras. A quantidade de materiais que existem na versão base do *software* é bastante limitada, no entanto, pode ser adicionado o pacote *Granta Library* que expande muito a oferta, principalmente nos materiais compósitos e materiais fabricados por manufatura aditiva. Na Figura 2.23 é possível ver as janelas do *Engineering data*, estando à esquerda a caixa de ferramentas (*toolbox*), que permite escolher a propriedade que queremos adicionar ao material, à direita na parte de cima, a identificação dos materiais da análise (o aço estrutural vem como predefinição) e, por último, à direita na parte de baixo, as propriedades do material selecionado.

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	7850	kg m <sup>-3</sup>
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
Young's Modulus	2E+11	Pa
Poisson's Ratio	0,3	
Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
Strain-Life Parameters		
S-N Curve	Tabular	
Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa
Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa
Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa
Compressive Ultimate Strength	0	Pa

Figura 2.23 Página do engineering data

A geometria pode ser importada de vários formatos, entre estes Step, Igs e Stl, ou modelada a partir dos softwares de CAD 3D do Ansys, o *Space Claim* e o *Design Modeler*. No caso dos

modelos utilizados neste projeto, estes foram primeiramente modelos em *Catia V5*, e posteriormente importados em formato *model*, formato escolhido pois verificou-se que era o formato que menos alterava a geometria do modelo quando importado pelo Spaceclaim.

Tendo já uma geometria e as propriedades do material, os próximos passos são a discretização do modelo e a definição das condições de fronteira. Este e todos os passos seguintes de pré-processamento serão efetuados no *Ansys Mechanical*, o *software* de análise. É neste programa onde definimos as condições de fronteira, contactos, malha e condições iniciais da análise, bem como “*solving*” e visualização dos resultados. Independentemente do tipo de análise, a parte do pré-processamento no *Ansys Mechanical* é bastante similar, variando apenas pequenas opções como no caso de numa análise dinâmica existir a opção de definir as interações entre corpos. De resto, variam também obviamente as opções relacionadas com a análise, como os seus *settings*.

#### 1.1.1 Contacto em Ansys

Uma parte fundamental do pré-processamento é a definição correta dos contactos entre componentes. De modo que os dois corpos não se interpenetrem durante a análise, é necessária estabelecer uma relação correta entre eles [72].

Os tipos básicos de contacto disponíveis em Ansys são:

- *Bonded* (fixo) – Os componentes encontram-se ligados e não é permitida a separação, penetração ou deslizamento das suas faces e arestas;
- *No separation* (sem separação) – Não é permitida a separação e a penetração, no entanto pode ocorrer o deslizamento sem fricção entre faces;
- *Frictionless* (sem fricção) – Não permite a penetração, mas permite a separação e o deslizamento sem resistência;
- *Rough* (áspero) – Parecido ao *Frictionless*, mas sem deslizamento dos componentes ( $\mu=\infty$ );
- *Frictional* (com fricção) – Permite o deslizamento proporcional ao coeficiente de fricção definido pelo utilizador [72] e a separação de componentes sem resistência.

Ao conjunto do elemento de contacto e do elemento *target* dá-se o nome de par de contacto. O comportamento do contacto pode ser simétrico ou assimétrico. No caso do primeiro, os elementos *target* e *contact* estão presentes em ambos os componentes enquanto no segundo um componente é o *target* e o outro o *contact*. Possuindo menos elementos, um par assimétrico é mais eficiente e pode reduzir a exigência computacional, no entanto, em casos onde a penetração é excessiva e o programa não chega a convergir, mudar para um par simétrico pode resolver o problema. Alguns casos onde é necessário um par simétrico são, por exemplo, ambos os componentes possuem malhas muito grosseiras ou quando a distinção entre a superfície de contacto e a *target* não é clara [74]. Por norma, a superfície convexa, de malha mais fina, menos rígida ou mais pequena deve ser a superfície de contacto. Corpos rígidos apenas podem ser o elemento *target*.

As formulações de contacto asseguram que existe uma compatibilidade de contacto eliminando a interpenetração entre os componentes [73]. As formulações disponíveis em Ansys são o método da penalidade (*Pure Penalty*), Lagrange normal, Lagrange aumentado e constrangimento em vários pontos (*Multi-point Constraint MPC*).

Os métodos *Pure Penalty* e *Augmented Lagrange* são ambos *penalty-based*. A força de contacto  $F_c$  está relacionada com a rigidez de contacto  $K_c$  pela seguinte expressão:

$$F_c = K_c \cdot x_p \quad \text{Equação 2.14}$$

O aumento da rigidez de contacto leva à diminuição da penetração  $x_p$ . Quanto menor a penetração, mais semelhante será o contacto a uma situação real e mais precisos serão os resultados. A rigidez de contacto depende das características, geometria, qualidade superficial e cinemática dos materiais e tem componentes normal e tangencial [72].

A expressão da formulação de *Augmented Lagrange* é semelhante, mas adiciona um novo termo que leva à diminuição da sensibilidade à rigidez de contacto.

$$F_c = K_c \cdot x_p + \lambda$$

Equação 2.15

Na prática as formulações *penalty-based* atuam como molas na zona de contacto entre os corpos que oferecem resistência à penetração dependendo da sua rigidez.

Numa análise estática, o aumento da rigidez leva a resultados mais precisos, mas quando aumentada demais pode dificultar a convergência. A rigidez de contacto apenas pode ser alterada pelo utilizador na direção normal, a rigidez tangencial não pode ser alterada.

A formulação *Normal Lagrange* em vez de usar as fórmulas antes apresentadas, adiciona um novo grau de liberdade ao sistema, a pressão de contacto, que atua na direção normal à superfície de contacto.

$$F_c = \text{Grau de Liberdade}$$

Equação 2.16

Em detrimento da facilidade de convergência, oferece resultados mais precisos que as duas formulações anteriores. É usada para problemas de grandes deslizamentos ou onde é necessário que não exista penetração. O seu nome deve-se a apenas criar o constrangimento à penetração na direção normal, sendo que na direção tangencial continua a existir uma rigidez que não pode ser alterada.

Por último, a formulação MPC apenas se aplica a contactos do tipo *bonded* ou *no separation*, onde não há separação dos componentes. Este tipo de formulação gera equações que restringem o movimento ou a ação das superfícies em contacto. É uma formulação usada em regiões de contacto linear e garante uma boa convergência e uma não penetração das superfícies.

Na Tabela 3 está representado um resumo das características de cada formulação.

Tabela 3 Resumo das vantagens e desvantagens de cada formulação (adaptado de [76])

	Pure Penalty	Augmented Lagrange	Normal Lagrange	MPC
Convergência	+ Boa convergência	- Convergência prejudicada quando penetração é elevada	- Convergência pode ser prejudicada pelo efeito do chattering	+ Boa convergência
Rigidez	- Sensível à escolha da rigidez de contacto normal	Menos sensível que o <i>pure penalty</i>	+ Não utiliza a rigidez de contacto	+ Não utiliza a rigidez de contacto
Penetração	- Existência de penetração sem controlo	- Existência de penetração, mas relativamente controlada	+ Penetração muito reduzida	+ Sem penetração
Tipos de contacto	+ Pode ser usada com todos os tipos de contacto	+ Pode ser usada com todos os tipos de contacto	+ Pode ser usada com todos os tipos de contacto	- Apenas pode ser usado contacto do tipo <i>bonded</i>
Procedimento do Solver	+ Procedimento iterativo ou direto	+ Procedimento iterativo ou direto	- Apenas procedimento direto	+ Procedimento iterativo e direto
Comportamento	+ Contacto simétrico ou assimétrico	+ Contacto simétrico ou assimétrico	- Apenas contacto assimétrico	- Apenas contacto assimétrico
Tipo de deteção	+ Deteção de contacto nos pontos de integração (gaussianos)	+ Deteção de contacto nos pontos de integração (gaussianos)	-Deteção de contacto nos nós	-Deteção de contacto nos nós

### 2.3.6 Static Structural

*Static Structural* é o nome dado em Ansys ao tipo de análise estática. Esta pode ser acedida arrastando-a desde o toolbox do Workbench. Este tipo de análise pode ser linear ou não

linear. No caso de uma análise linear, o método de resolução é o indicado no capítulo 2.3.2, um método direto. No caso de uma análise não linear (um tipo de análise usada nas simulações efetuadas) usa-se um método iterativo-incremental [77], dado que o problema é discretizado no tempo (usando incrementos) e para se chegar a um equilíbrio no final de cada incremento usam-se iterações. Neste tipo de simulações, dependendo dos tipos de não linearidade presentes, os vetores da força externa e interna podem variar não linearmente, como se pode ver na Figura 2.24.

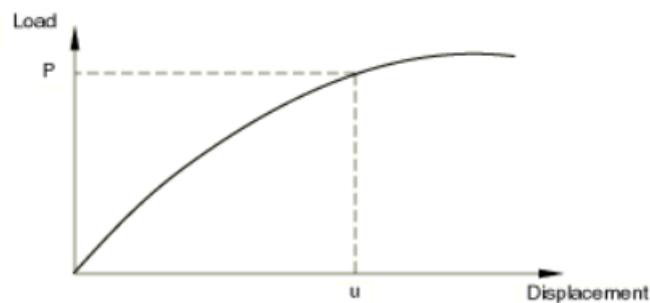


Figura 2.24 Relação não linear entre força e deslocamento [79]

Os métodos disponíveis no *Static Structural* são conhecidos como o método de Newton-Rhapson, chamado Newton-Rhapson Full em Ansys, método de Newton-Rhapson modificado e o Newton-Rhapson assimétrico.

Considerando que a magnitude da força interna  $f_{int}$  e da força externa  $f_{ext}$  apenas depende dos deslocamentos  $u$ , as equações de equilíbrio apenas dependem da variação dos deslocamentos  $\Delta u$  [77] e para um incremento o problema pode ser formulado da seguinte maneira [77]:

$${}^{t+\Delta t}{}_i u = {}^t{}_i u + \Delta u \quad \text{Equação 2.17}$$

e sendo  $g$  as forças residuais,

$$g(\Delta u) = f_{ext}(\Delta u) - f_{int}(\Delta u) = 0 \quad \text{Equação 2.18}$$

A resposta não linear da estrutura é dada pela seguinte expressão:

$$[K].\overline{\Delta u} = \overline{\Delta F} \quad \text{Equação 2.19}$$

onde K representa a matriz da rigidez,  $\Delta F$  o vetor da força incremental aplicada e  $\Delta u$  o vetor da variação do deslocamento.

Um processo iterativo reduz os erros resultantes de um processo incremental [77], e permite que possa ser usado um *time-step*, ou passo, maior. O procedimento geral de resolução para um processo iterativo é o seguinte:

1. Início do incremento;
2. Aumento da força externa aplicada  $f_{ext}$ ;
3. Cálculo da força residual  $g = f_{ext} - f_{int}$ ;
4. Estimar a alteração nos deslocamentos  $\Delta u_{i+1} = \Delta u + \delta u_{i+1}$
5. Determinar  $f_{int}$
6. Repetir a partir do passo 2 ou parar o processo caso a solução convirja

onde  $\delta u$  significa os incrementos iterativos do deslocamento. As diferenças entre os métodos devem-se à forma de chegar ao valor de  $\delta u$ . [77] Em ambos os métodos Newton-Raphson, a matriz da rigidez  $K_i$  é expressa da seguinte forma:

$$K_i = \frac{\delta g}{\delta \Delta u} \quad \text{Equação 2.20}$$

Esta rigidez trata-se da rigidez tangencial da estrutura, que é usada em ambos os métodos Newton-Raphson. A aproximação à relação entre a carga e o deslocamento é feita por aproximações lineares cujo declive é a rigidez tangencial. A diferença entre os dois métodos está na frequência em que o valor desta rigidez é calculado, no caso do Newton-Raphson a cada iteração e no caso do Newton-Raphson modificado no início do incremento. Tal como se pode ver na Figura 2.25, em cada iteração pelo primeiro método, o declive da rigidez muda até a diferença entre a força exterior e a força interna, o  $\delta g$ , esteja dentro da tolerância escolhida. O uso deste método leva à necessidade de menos iterações, mas que estas possam

demorar mais tempo. Outra desvantagem é, também, no caso de ser usado um tipo de *solver* direto e não iterativo, implicar a decomposição da matriz a cada iteração [77].

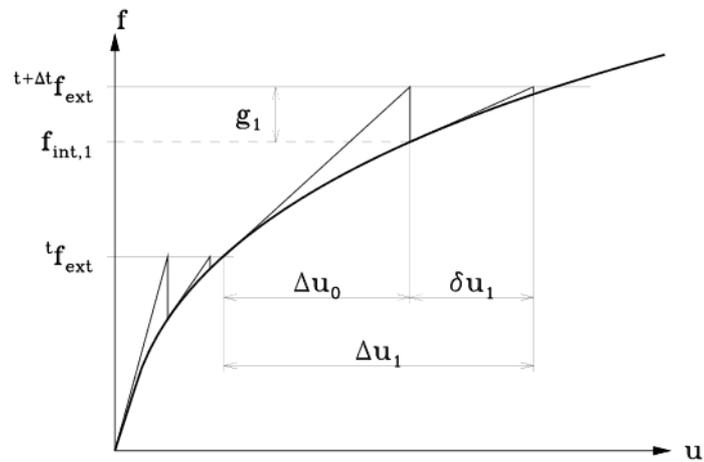


Figura 2.25 Iterações pelo método Newton-Raphson [77]

O método NR modificado, por outro lado, como se pode ver na figura, requer mais iterações, mas estas são mais rápidas.

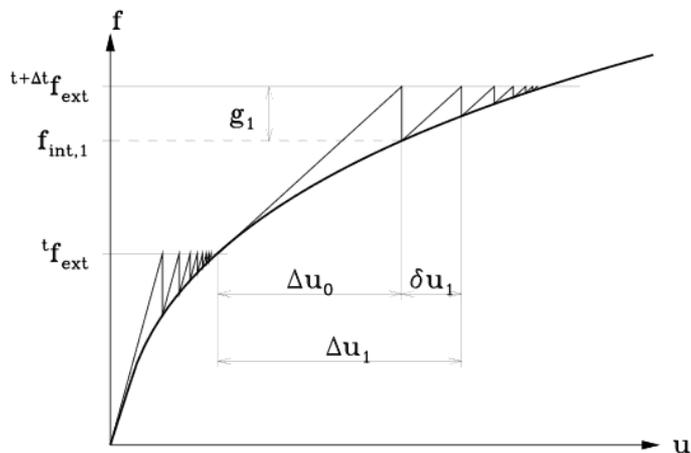


Figura 2.26 Iterações pelo método Newton-Raphson modificado [77]

O Newton-Raphson assimétrico, um procedimento particular do método Newton-Raphson Full disponível em Ansys, é usado em problemas com elevada fricção onde a matriz da rigidez pode ser assimétrica. Em casos em que não é, mudar para este tipo de *solver* não afetará os resultados, mas pode tornar a resolução mais lenta. [80].

Em Ansys, o método de resolução pode ser escolhido a partir de *Nonlinear controls* na secção Analysis settings, tal como se vê na Figura 2.27. Quando deixado em *Program controlled*, o programa decide qual o melhor método dependendo das características do problema.

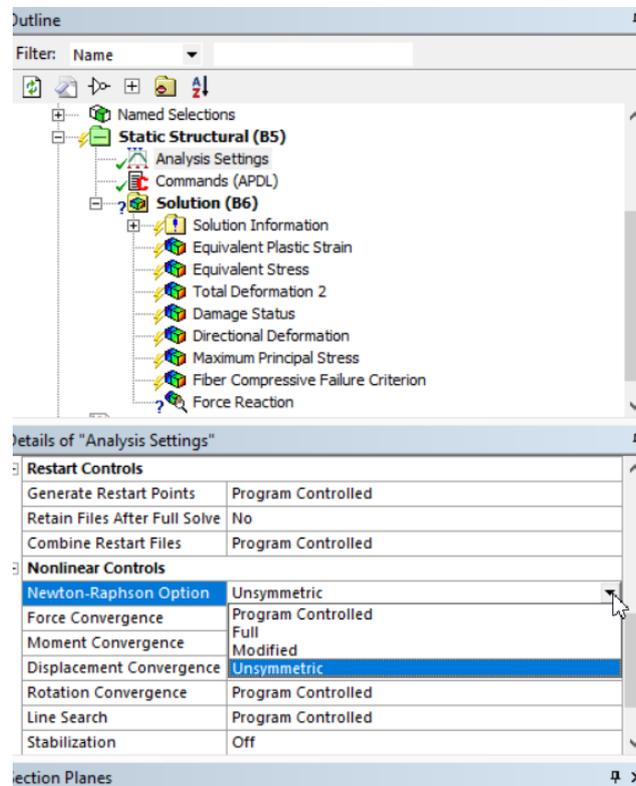


Figura 2.27 Nonlinear Controls em Static Structural

Nessa secção pode-se também escolher o tipo de convergência pretendido, por predefinição as quatro que se podem ver na janela estão “ON”, bem como ativar o Line Search a Stabilization.

O Line Search é um algoritmo que ajuda a que se chegue à convergência multiplicando o incremento de deslocamento por um fator entre 0 e 1 quando a estrutura quando deteta uma resposta de enrijecimento.

A *Stabilization* adiciona amortecedores a todos os graus de liberdade do sistema e ajuda na convergência. É usado na deteção de contactos altamente não lineares e permite a estabilização momentânea do modelo em, por exemplo, uma situação de alteração repentina do contacto.

Este tipo de análise apenas foi usado na simulação da deformação da *feature* cônica. Utilizou-se uma análise de tipo não linear usando o método *Newton-Raphson Full*. Nesta simulação, a *feature* deformou-se plasticamente, no entanto, não houve perda de contacto e não foi necessário recorrer à erosão de componentes. Porém, para as outras *features*, pretendia-se simular o seu esmagamento, o que levaria a uma taxa de deformação bastante grande. Nas simulações tentadas em *Static Structural* para as outras *features*, por isso, surgiam constantemente erros de formulação dos elementos devido a distorções elevadas. Tentou-se para resolver esse problema usar um programa no Ansys APDL (Linguagem paramétrico de design do Ansys) chamado de comando *ekill* que aparece na Figura 2.28, adaptado do comando APDL do Simutech group [100]. Em versões mais recentes do *Ansys Mechanical*, no entanto, esta funcionalidade encontra-se incorporada nas definições de análise e não é necessário recorrer a um programa no Ansys APDL.

```

! Commands inserted into this file will be executed just prior to the ANSYS SOLVE command.
! These commands may supersede command settings set by Workbench.

! Active UNIT system in Workbench when this object was created: Metric (mm, kg, N, s, mV, mA)
! NOTE: Any data that requires units (such as mass) is assumed to be in the consistent solver unit system.
! See Solving Units in the help system for more information.

fini
/config,noelddb,0 ! write results into the database
/solu ! continue with solution
! kill elements for which nodes have values above a designated value...
!
/com, #####
/com, #
*get,myncmls,active,,solu,ncmls ! cumulative number of load steps
*if,myncmls,gt,0,then ! if this is after the first
cmisel,s,killelem ! ELEMENT component to be checked
nsle ! nodes on these elements
SELTOL,1.0e-12 ! stay within range below
! #####
nselect,r,s,eqv,326, 1000 ! re-select nodes with results above a value <<<
! #####
SELTOL ! selection tolerance back to default
*get,numnode,node,,count ! how many nodes with result above?
*if,numnode,gt,0,then
esln ! elements with any node selected
*get,numelem,elem,,count
*if,numelem,gt,0,then
ekill,all
*endif
*endif
allsel
*else
! if first load step, have result written to in-memory database
fini
/config,noelddb,0 ! write results into the database
/solu ! continue with solution
*endif
/com, #
/com, #####
!

```

Figura 2.28 Comando *Ekill* para *Static Structural*

Este programa permite eliminar ou “kill” componentes quando a sua tensão ou deformação ultrapassa a tensão ou deformação definida no programa. No caso das *features*, usou-se a tensão de rotura dos materiais. No entanto, compreendeu-se a limitação do programa quando usado em zonas de contacto, pois este levou a ainda mais instabilidade no contacto entre os componentes, visto que os elementos desapareciam e era perdido parcial ou completamente

o contacto entre os componentes. Devido a isso, decidiu optar-se por um tipo de análise dinâmica para o resto das simulações, usando o Explicit Dynamics que será brevemente apresentado no próximo subcapítulo.

### 2.3.7 Explicit Dynamics

O *Explicit Dynamics* é o nome dado em Ansys ao tipo de análises dinâmicas resolvidas pelo método explícito. São o tipo de análise maioritariamente usada nas simulações deste projeto. Este subcapítulo será dedicado a aspetos relacionados com uma análise dinâmica não linear, parâmetros e cuidados a ter em consideração numa análise em Explicit Dynamics, vários tipos de análise e as suas aplicações.

O *Explicit Dynamics* é usado em problemas cujos eventos têm uma duração curta, como é o caso de explosões, impactos ou testes de queda, que se caracterizam por serem não lineares, dinâmicos e transientes. O programa apresenta um ambiente semelhante ao Static structural, onde apenas existem pequenas diferenças na secção do pré-processamento e é na parte das definições da análise e solução onde estão as alterações. Na figura Figura 2.29 está representado o aspeto do *outline* desta Suite do Ansys.

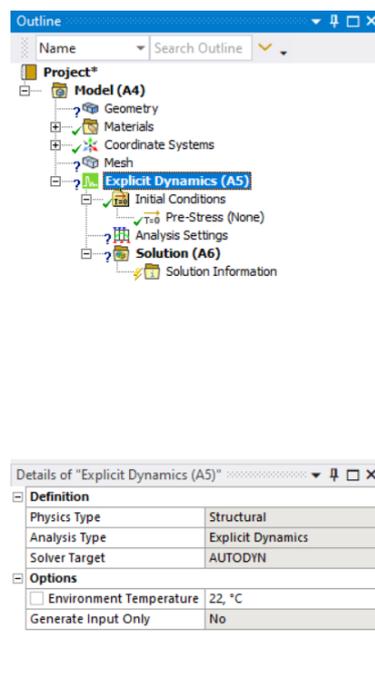


Figura 2.29 Outline de uma análise em Explicit Dynamics

Em análises dinâmicas pode ser usado um método implícito ou um método explícito para a integração no tempo. Ao contrário de uma análise estática, uma análise dinâmica em *Explicit Dynamics* usa um algoritmo explícito para a resolução dos problemas, o que o torna mais apto para prever respostas complexas dos corpos, como elevada deformação e rotura, interações entre corpos, fluídos com superfícies que mudam rapidamente, fragmentação e encurvadura não linear [81]. Deste modo, recorrendo a este tipo de análise é possível resolver problemas de tipo *quasi-static*, impactos a altas e a baixas velocidades, colisão de corpos com ou sem penetração e testes de queda.

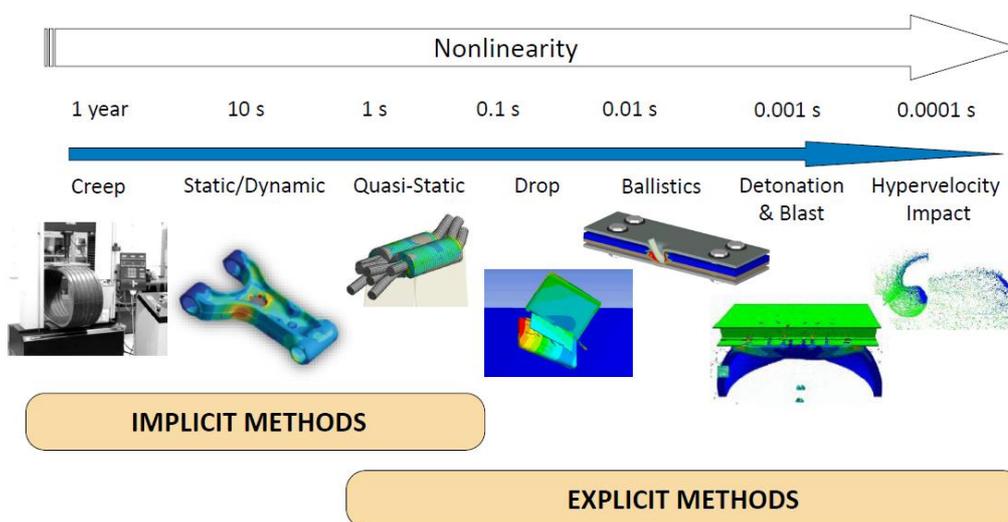


Figura 2.30 Variação dos tipos de análise por magnitude do tempo [82]

Tal como se pode ver pela Figura 2.30, o método explícito é usado para problemas de duração inferior a 1 segundo. Quando na presença de um modelo tridimensional complicado, o método implícito apresenta desvantagens que tornam o método explícito muito mais vantajoso nesses casos, estas são:

1. À medida que o tempo do incremento diminui, o custo computacional da matriz da rigidez tangencial aumenta drasticamente e pode levar à divergência [83];
2. Estabilidades locais levam a que o equilíbrio de forças seja complicado de atingir [83];

A equação de movimento usada numa análise dinâmica para se chegar às soluções é a seguinte:

$$[K]\{x\} + [C]\{\dot{x}\} + [M]\{\ddot{x}\} = \{F\}$$

Equação 2.21

Correspondendo a matriz  $C$  e  $M$  à matriz do amortecimento e da massa e o vetor  $\dot{x}$  e  $\ddot{x}$  ao vetor da velocidade e da aceleração, respetivamente. Como foi dito anteriormente, esta equação é semelhante à equação usada em análises estáticas, com a diferença de possuir dois termos mais, pois são considerados o tempo e o amortecimento [84];

No método implícito, são usados métodos de integração no tempo como o de *Newmark*, *Bathe*, *Houbould* e o método das diferenças centrais, sendo estes chamados de métodos de integração direta; não é efetuada nenhuma transformação à equação de movimento; tentam satisfazer a equação a intervalos de tempo  $\Delta t$ , em vez de para qualquer  $t$ ; assumem uma variação de deslocamento, velocidade e aceleração em qualquer intervalo de tempo  $\Delta t$  [85]. Podem também ser usados métodos de sobreposição, que reduzem o número de incógnitas da análise dinâmica, reduzindo o tempo computacional [86].

No método explícito, a equação de movimento do passo, ou *time-step*,  $t$  não é usada para determinar o deslocamento do *time-step* atual, ao contrário do método implícito, mas sim do *time-step*  $t + \Delta t$  [87]. O método mais comum de integração no tempo numa análise explícita é o esquema de integração pelas diferenças centrais (também chamado de *Leapfrog Method*) [85], que usa matrizes de massa diagonais. A efetividade deste processo deve-se às matrizes massa e amortecimento serem diagonais, o que faz com que a sua inversão não implique a decomposição da matriz e é feita do seguinte modo [85] [88]:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & & & & \\ & m_2 & & & \\ & & \dots & & \\ & & & \dots & \\ & & & & m_N \end{bmatrix}$$

Equação 2.22

$$M^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_1} & & & & \\ & \frac{1}{m_2} & & & \\ & & \dots & & \\ & & & \dots & \\ & & & & \frac{1}{m_N} \end{bmatrix} \quad \text{Equação 2.23}$$

No método explícito é necessário o deslocamento no *time-step* anterior  $u_{i-1}$  e no *time-step* atual  $u_i$  para descobrir o do *time-step* seguinte  $u_{i+1}$ , que se obtém de forma explícita.

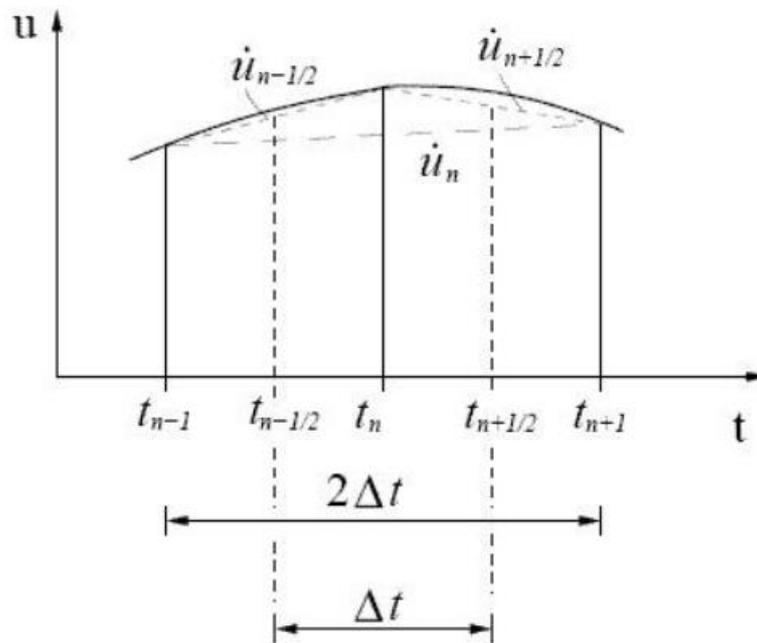


Figura 2.31 Esquema de integração pelas diferenças centrais [88]

A velocidade  $\dot{u}$  e a aceleração  $\ddot{u}$  são dadas pelas seguintes fórmulas:

$$\dot{u}_n = \frac{1}{2\Delta t} (u_{n+1} - u_{n-1}) \quad \text{Equação 2.24}$$

$$\ddot{u}_n = \frac{1}{\Delta t} \left( \frac{u_{n+1} - u_n}{\Delta t} - \frac{u_n - u_{n-1}}{\Delta t} \right) \quad \text{Equação 2.25}$$

Ou

$$u_n = \frac{1}{(\Delta t)^2} (u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}) \quad \text{Equação 2.26}$$

Substituindo na equação de movimento,

$$\left(\frac{m}{\Delta t^2} + \frac{c}{2\Delta t}\right)u_{i+1} = F_i - \left(\frac{m}{\Delta t^2} + \frac{c}{2\Delta t}\right)u_{i-1} - \left(k - \frac{2m}{\Delta t^2}\right)u_{i+1} \quad \text{Equação 2.27}$$

Onde se pode ver a relação entre o deslocamento do *time-step* seguinte com o deslocamento do *time-step* atual e do anterior. Em  $t = 0$  temos a seguinte expressão:

$$u_{-1} = u_0 - \Delta t \dot{u}_0 + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_0 \quad \text{Equação 2.28}$$

Apenas a conservação de massa e do momento neste tipo de análise são forçadas. A conservação de energia pode ser monitorizada no resumo das energias (*Energy Summary*) onde se pode ver a variação da energia total, do trabalho efetuado, energia de referência e do erro de energia. A conservação de energia é um indicador da qualidade da solução e dos resultados. Ao contrário de uma análise implícita, não existe convergência, pelo que a interpretação dos resultados e a monitorização da informação da solução é de extrema importância.

A principal desvantagem do método explícito é ser apenas condicionalmente estável, enquanto o método implícito é estável mesmo para *time-steps* grandes [87]. A instabilidade do algoritmo resultaria em erros demasiado elevados que inviabilizariam os resultados obtidos. Para que o método seja estável, o tamanho do *time-step*  $\Delta t$  não deve ultrapassar o de um *time-step* crítico  $\Delta t_{cr}$ , satisfazendo o critério de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), que é expresso pela seguinte equação:

$$CFL = \frac{c\Delta t_{cr}}{\Delta x} \leq C_{,max} = 1 \quad \text{Equação 2.29}$$

Ou

$$\Delta t_{cr} = TSSF \frac{\Delta x}{c} \quad \text{Equação 2.30}$$

Onde  $c$  representa a velocidade de propagação do som no material,  $\Delta t$  o *time-step* crítico e  $\Delta x$  o comprimento característico do elemento, que depende do tipo de elemento, e TSSF (Time step scale factor) que representa o fator de segurança dado para que o critério seja cumprido.

Como se pode ver pela Figura 2.32, no caso de instabilidade, a informação transmitida pelas derivadas espaciais é insuficiente [89] e são “saltadas” divisões, tornando a solução imprecisa.

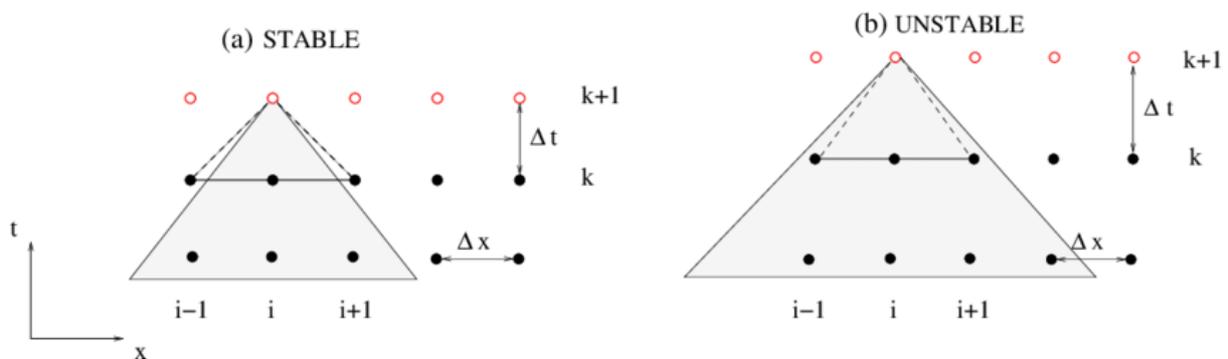


Figura 2.32 Comparação (a)  $CFL \leq 1$ , algoritmo estável e (b)  $CFL > 1$ , algoritmo instável [89]

A velocidade do som no material pode ser calculada pela seguinte relação:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{Equação 2.31}$$

Onde  $E$  representa o módulo de elasticidade do material e  $\rho$  a sua densidade.

No que toca ao aumento do *time-step* da resolução de modo a tornar o tempo de simulação mais curto sem comprometer a estabilidade do algoritmo, existe em *Ansys* a possibilidade de realizar um aumento da massa (*mass scaling*), que permite aumentar a massa dos elementos de dimensão mais pequena, onde o passo é menor, e assim aumentar o valor da condição CFL, isto é, aumentar o tamanho mínimo do *time-step* estável. No entanto, o uso desta ferramenta requer certos cuidados, pois a introdução de demasiada massa nos corpos pode levar a resultados que não correspondem à realidade.

### 2.3.8 Simulação Quasi-Static

Foi usada uma simulação *quasi-static* para a deformação das *features*, devido à magnitude de tempo a que a sua deformação ocorre na realidade ( $\sim 1s$ ). Este tipo de simulação é realizado explicitamente devido à não existência de convergência que, como trata de problemas de não linearidade de contacto e com elevadas deformações, facilita a sua aplicação. Neste tipo de simulações não é económico ser usado o tempo real a que os fenómenos se dão, pelo que deve ser encontrada alguma maneira de acelerar o processo e assim reduzir o tempo de simulação. No final subcapítulo anterior foi falado do *mass scaling*, que permite aumentar a massa dos elementos mais pequenos do modelo (com menor *time-step*) por um fator  $f^2$  e assim aumentar o incremento de tempo estável por um fator  $f$ . No entanto, aumentar demais a massa pode levar a resultados que não se assemelham à realidade e em certas situações ao aumento da energia cinética, que neste caso prejudica a análise. Por isso, outra maneira de assegurar um tempo de resolução não excessivo é diminuir o tempo de simulação e aplicar a carga à estrutura mais rapidamente, que reduz a escala de tempo da simulação. Numa simulação Quasi-Static os efeitos inerciais são desprezáveis, pelo que a monitorização das energias é essencial para serem obtidos os resultados desejados. A energia cinética deve ser comparada com a energia interna e a primeira deve ser menos de 5% da segunda durante a maior parte da simulação [101], como se pode ver pela Figura 2.33.

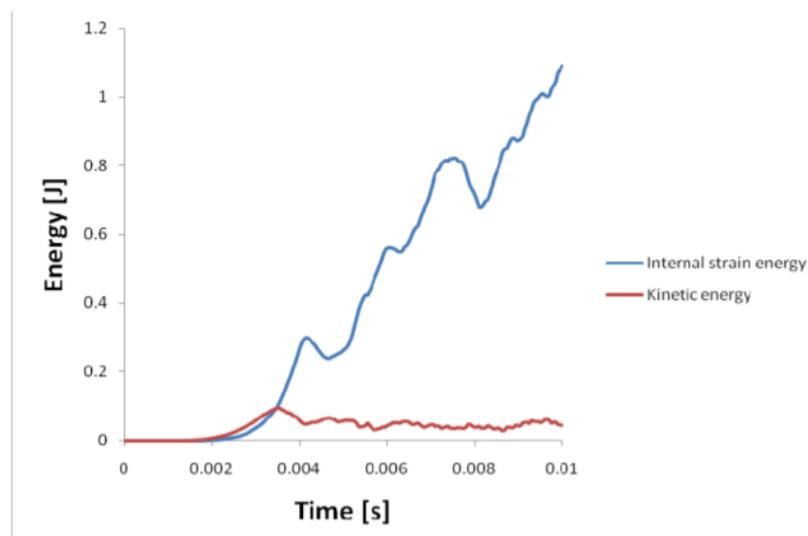


Figura 2.33 Exemplo de um gráfico comparando a energia interna (a azul) com a energia cinética (a vermelho) de uma análise quasi-static [91]

O tempo de simulação ideal pode ser alcançado por tentativas, encontrando um balanço entre rácio energia cinética/energia interna admissível e tempo de simulação pretendido, ou descobrindo a primeira frequência natural do modelo [90], invertê-la para se chegar ao período, e a partir da fórmula,

$$V = \frac{D}{T} \quad \text{Equação 2.32}$$

Sendo D o deslocamento pretendido na simulação, T o primeiro período natural e V a velocidade, estimar uma velocidade de impacto e desde esse valor definir o tempo final da simulação.

Nas simulações realizadas foi seguido o procedimento iterativo, onde se chegou ao *End time* ideal após algumas tentativas e onde se tentou manter a adição de massa abaixo dos 10% da massa total do elemento de modo a não afetar os resultados.

### 3 CASO EM ESTUDO

Neste capítulo será apresentado o caso em estudo, o problema e os conceitos encontrados para solucioná-lo, parâmetros que vão ser usados na validação e a sua relevância no caso e o modelo criado para a validação das *features*.

#### 3.1 Descrição do Cluster

O cluster em estudo trata-se do BMW 35 UP 4.1 e o problema que se vai tratar é o efeito do aparafusamento de dois dos seus componentes na deterioração do *black uniformity*. Atualmente estes dois componentes são fabricados por moldação por injeção, um processo de fabrico que apesar de ser caracterizado por uma elevada taxa de produção e qualidade dos seus produtos, é propenso a empenos do material o que resulta em que as dimensões finais dos produtos difiram das dimensões da cavidade do molde. [15] Este fenómeno depende de muitas variáveis, algumas intrínsecas ao material moldado e outras ao próprio molde e ao processo, pelo que reduzir o seu efeito nas peças finais pode provar-se custoso e entrar em conflito com uma das vantagens de esta tecnologia, fabrico de peças complexas com boas propriedades a um baixo custo. Deste modo, torna-se relevante encontrar soluções conceptuais que possam minimizar o efeito de estes defeitos sistemáticos, neste caso *features* que reduzam a deterioração do *black uniformity* em peças empenadas. Na Figura 3.1 e Figura 3.2 pode-se ver, respetivamente, a modelação das peças reais e da simplificação feita para possíveis simulações de conjunto.

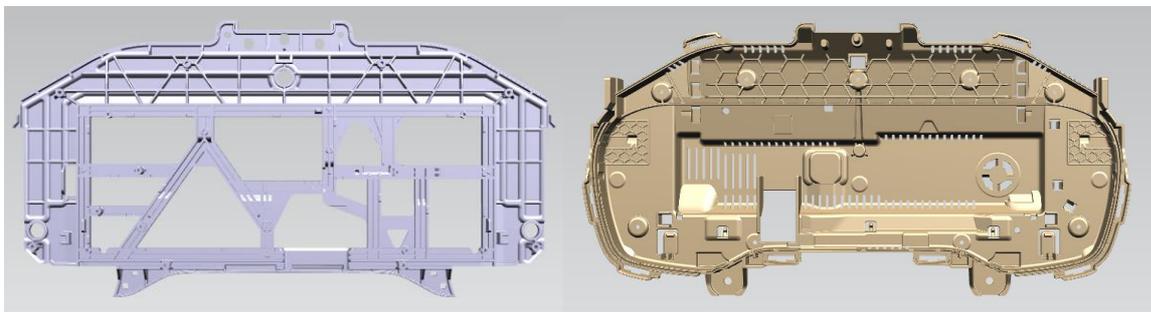


Figura 3.1 Desenho peças reais (da esquerda) Carrier Frame e System Carrier [97]

Os materiais dos dois componentes em estudo são ambos GFRP (*glass fiber reinforced plastics*), conhecidos como materiais com uma excelente relação força/peso e rigidez/peso e

capacidade de produzir formas extremamente complexas. Estes são o Ryton BR111 (GF+MX) e o Celanex 2302 GV1/30, tendo como matriz de sulfeto de polifenileno (PPS) e tereftalato de polibutileno + tereftalato de polietileno (PBT+PET), respectivamente. O Ryton BR111 é fabricado pela Solvay e é o material do Carrier Frame, é conhecido pela sua boa resistência mecânica, boas propriedades elétricas e excelente resistência química mesmo a altas temperaturas. É o material mais rígido dos dois. O celanex foi produzido pela Celanese e possui uma boa resistência mecânica, tenacidade e rigidez, baixa fluência e boas propriedades elétricas.

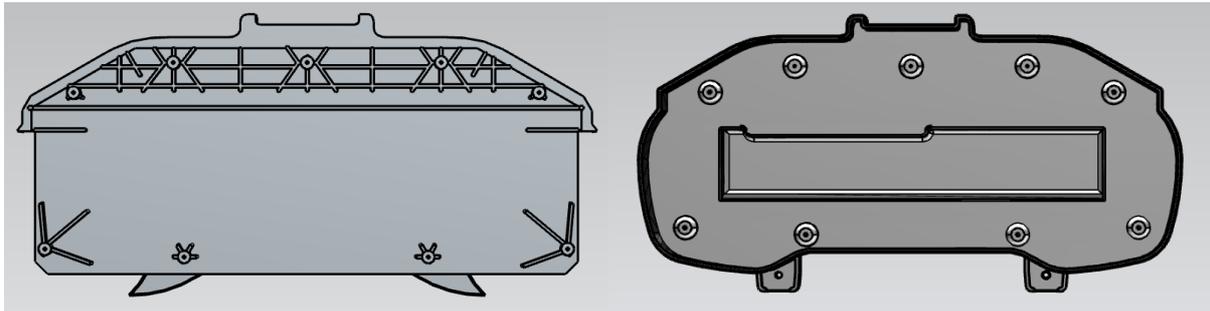


Figura 3.2 Simplificação das peças efetuada para simulações de conjunto

### 3.2 Caracterização do aparafusamento

A junta que compõem o CF e o SC é aparafusada através de um parafuso de abertura de rosca por deformação, também conhecidos como *self-tapping screws*. Este tipo de aparafusamento é muito usado na indústria automóvel e difere do aparafusamento tradicional por se dar a abertura de rosca pelo próprio parafuso por deformação do material, em contraste com o corte do material (*thread cutting screw*), normalmente no elemento inferior da junta. Ao ser dado desta forma, a curva de binário do aparafusamento será diferente e em vez de ser apenas relevante o parâmetro binário de aperto, também se deverá considerar como parâmetro o binário de formação da rosca.

Posto isto, o perfil da curva neste tipo de aparafusamento atingirá um pico de binário e depois

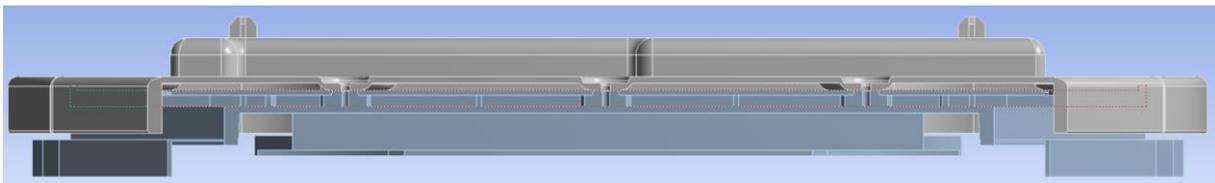


Figura 3.3 Vista em corte da junta composta pelos dois componentes

decrecerá até voltar a subir quando se der o aperto caso o tipo de furo seja passante ou então

crescerá de forma aproximadamente linear, dado que o aumento da penetração leva ao aumento da fricção da rosca do parafuso com a parede do furo, caso seja um furo cego. Depois sofrerá uma mudança de declive quando começa o aperto dos componentes caso a formação de rosca se dê até ao ponto de *snag*, quando a cabeça de parafuso entra em contacto com a junta. Na Figura 3.4, Figura 3.5 e Figura 3.6 estão ilustradas as curvas para estes três casos: aparafusamento sem abertura de rosca (a); aparafusamento com abertura de rosca e furo cego (b); aparafusamento com abertura de rosca e furo passante (c).

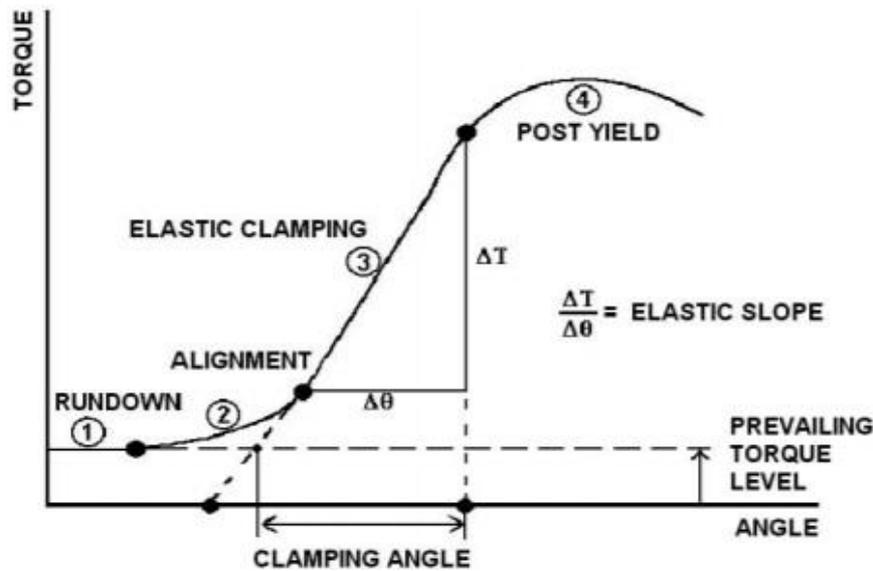


Figura 3.4 Torque vs ângulo para aparafusamento convencional (a) [18]

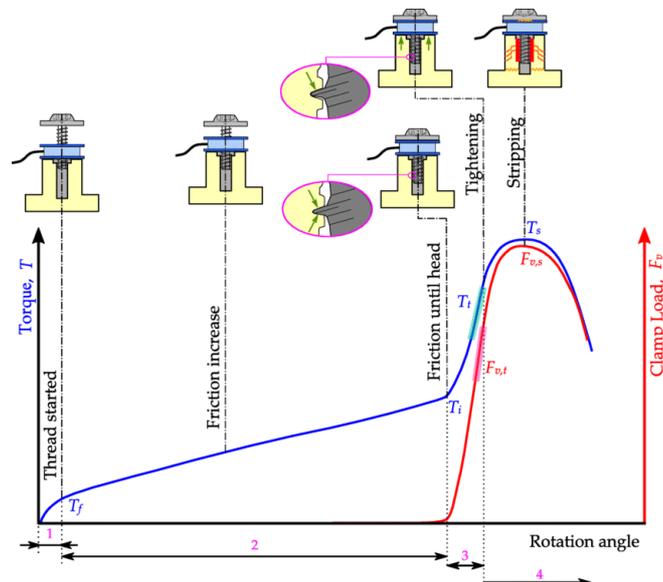


Figura 3.5 Torque vs ângulo para thread-forming com furo cego (b) [19]

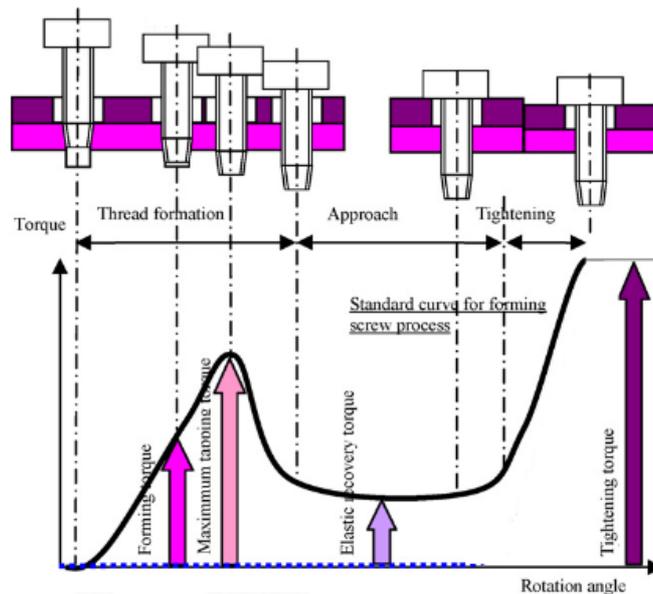


Figura 3.6 Curva típica Torque vs Ângulo para thread-forming com furo passante (c) [17]

No caso em estudo o tipo de aparafusamento envolvido é de *thread-forming* com furo cego, aparafusamento do *System Carrier (near plate)* com furo passante ao *Carrier Frame (tap plate)*, pelo que o perfil de aparafusamento é semelhante ao da Figura 3.5.

O processo de aperto do parafuso pode ser dividido em três fases [21]:

### 1ª Fase – Posicionamento:

Antes da abertura de rosca, o parafuso é posicionado e alinhado com o furo. Nesta fase não existe deformação do material e a resistência que o parafuso encontra é mínima, o aumento de binário nesta fase é desprezável em relação às outras.

### 2ª Fase – Abertura de Rosca:

Quando a rosca entra em contacto com o plástico, dar-se-á início à abertura da rosca do castelo. Nesta fase, o binário de abertura da rosca aumenta linearmente com o aumento da penetração do parafuso e, dependendo se o furo é passante ou cego, atingirá um valor máximo antes do aperto ou aumentará até ao início da próxima fase

### 3ª Fase – Aperto:

O aperto começa quando a cabeça do parafuso entra em contacto com a placa superior da junta, provocando a força de aperto que comprime as duas placas e tensiona o parafuso. O binário aumenta linearmente com o ângulo de rotação do parafuso até que é atingido o

binário de aperto máximo, momento em que começa a diminuir de forma não-linear devido à destruição do castelo e da rosca.

Em relação à força de aperto, de modo análogo ao que passa no aparafusamento convencional, esta só aumenta a partir da fase de *tightening* do aparafusamento e aumenta linearmente até ao binário de aperto. Se o aparafusamento continuasse a penetrar na junta, a partir de certo ponto ocorreria dano no castelo e destruição da rosca, o que resultaria numa diminuição também da força de aperto [20]. Apesar de serem materiais com fibra de vidro, como a base é composta por materiais termoplásticos, estes vão estar sujeitos a fluência e relaxamento após o aparafusamento, levando a uma diminuição da força de aperto [17].

Na Figura 3.7 podemos ver representadas na junta a velocidade de rotação do parafuso,  $\omega$ , o binário aplicado,  $T$ , e a força de aperto,  $F_z$ .

ANSYS  
R19.1

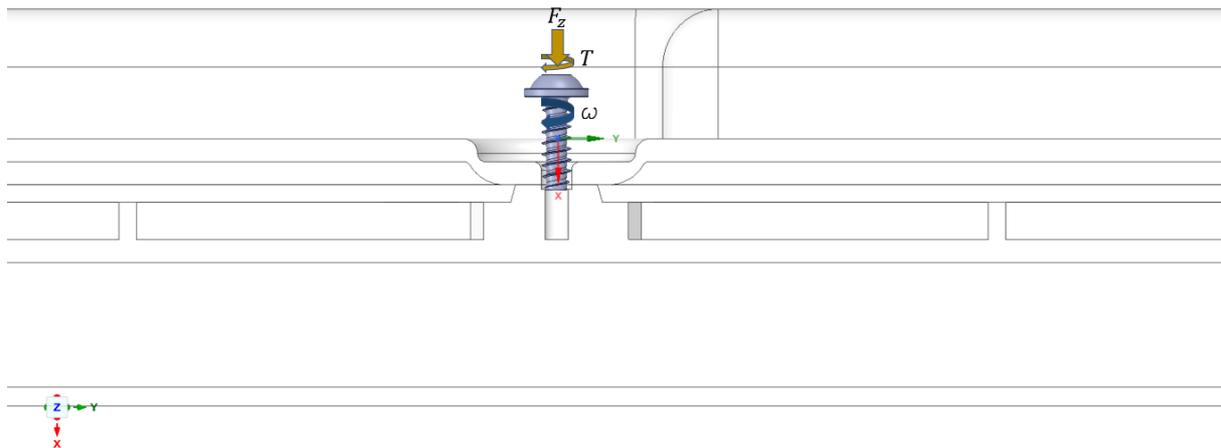


Figura 3.7 Representação da junta SC-CF com a representação das forças envolvidas durante o aparafusamento

A velocidade de rotação do parafuso é definida em função do material da junta onde vai ser aberta rosca e do próprio parafuso. É um parâmetro importante no aparafusamento de plásticos pois à medida que aumentam as rotações por minuto (rpm) aumenta a quantidade de calor gerado. Um aumento do calor provocaria um aumento da temperatura da junta, o que provocaria uma mudança nas propriedades mecânicas com consequentes danos aos componentes e diminuição do binário de rotação.

Na Figura 3.8 estão representadas as forças após o aparafusamento, a força de pré-carga,  $F_t$  e a força de aperto,  $F_c$ .

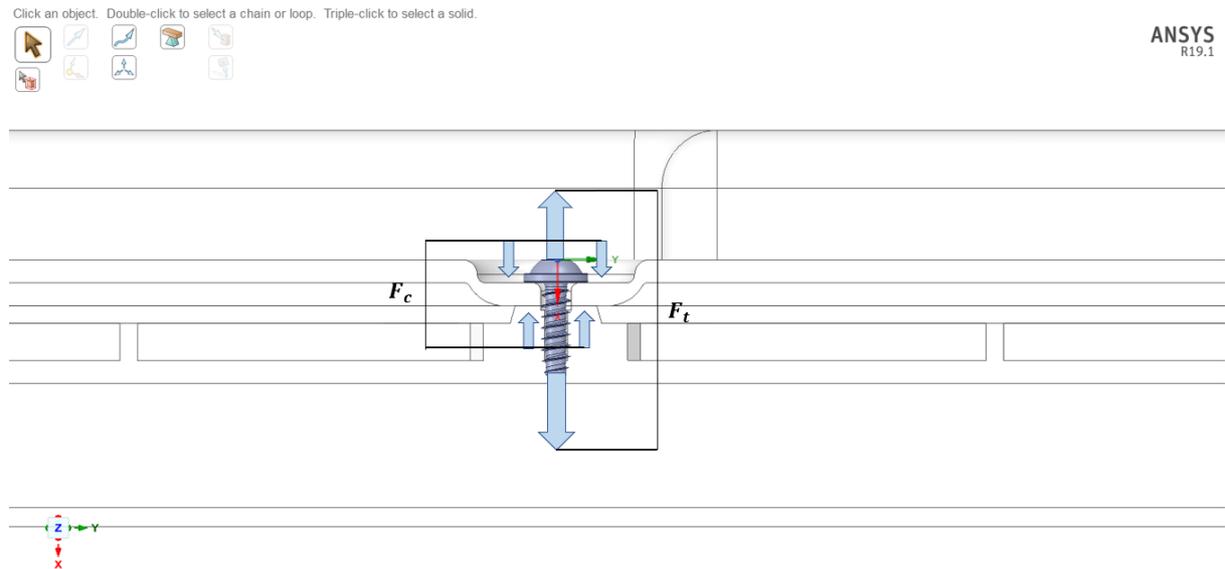


Figura 3.8 Representação das forças presentes na junta após o aparafusamento

Por outro lado, dependendo dos materiais e do parafuso envolvidos, existem diferentes desenhos recomendados para os castelos do componente aparafusado. Para o parafuso desta junta, o *Delta PT thread-forming fastener*, está recomendado no catálogo da *Stanley* [20] o desenho da Figura 3.9:

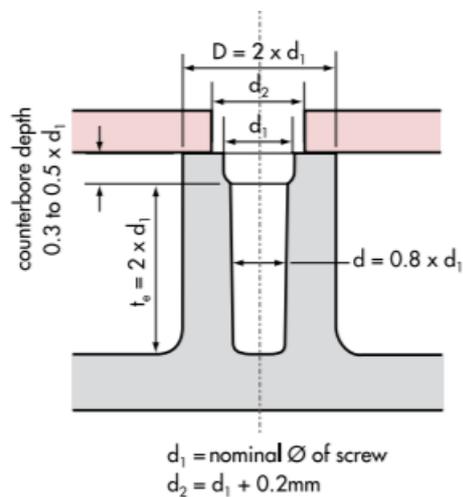


Figura 3.9 Design do castelo recomendado [20]

Alguns parâmetros importantes como o diâmetro ( $0,8 \times d_1$  (diâmetro nominal do parafuso)) e profundidade do furo ( $2 \times d_1$ ) foram tidos em conta no design do componente real e no modelo criado para este projeto. Um *design* assim é uma garantia de que do aparafusamento se vai obter a máxima força de aperto durante o processo de instalação [20].

Naturalmente, estas recomendações têm de estar complementadas pelas recomendações de, por exemplo, o processo de fabrico, a moldação, de modo que é necessário um estudo para cada caso para que, caso seja necessário alterar algum parâmetro do desenho, este não coloque em causa a correta montagem, funcionamento e cumprimento das especificações do componente no equipamento do qual este faz parte.

Em resumo, para um aparafusamento com sucesso dos dois componentes em estudo os parâmetros envolvidos são as rotações por minuto,  $\omega$ , *driving torque* - binário necessário para abrir a rosca,  $T_D$ , o *tightening torque* - binário para o aperto do parafuso,  $T_T$ , a força de aperto que provoca a tensão do parafuso (pré-carga),  $F_p$ , e a compressão dos dois *plates* da junta,  $F_C$ , e o dimensionamento correto dos elementos da junta, com especial importância o *design* do castelo da placa aparafusada.

### 3.2.1 Processo de Montagem do Cluster

A partir da Figura 3.10, é possível ver que o display se encontra ligado, da parte de trás do cluster, ao *Carrier Frame* por ligação adesiva e, da parte da frente, ligado ao *cover glass* por *optical bonding*. As tensões que se geram no *display* devem-se ao *bonding* que este tem com o *Carrier Frame*.

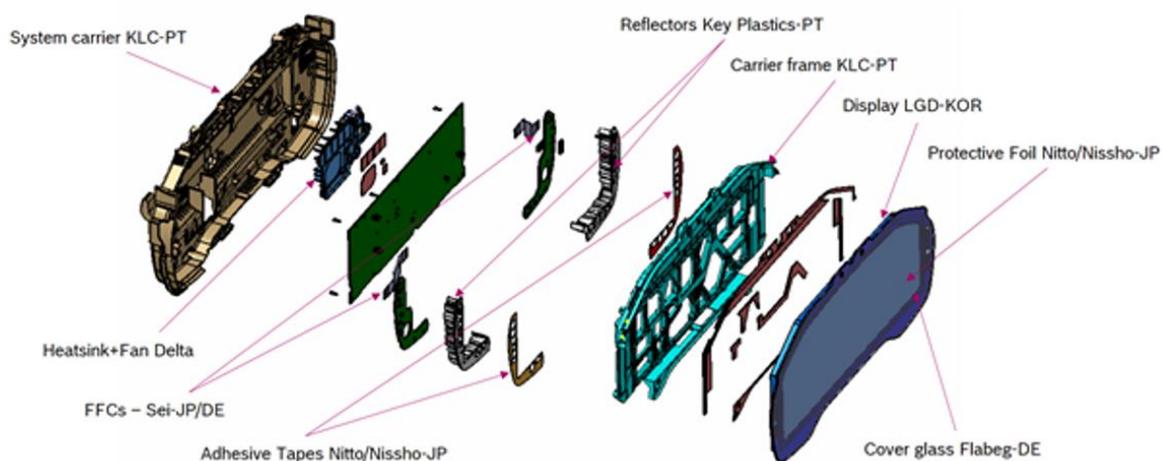


Figura 3.10 Vista explodida do Cluster

Quanto se dá o aparafusamento do CF e do SC e existe uma diferença de altura entre os castelos a serem aparafusados, as duas peças são empurradas uma contra a outra de modo

que se dê a união destas. No display, pela ligação ao CF e devido a estar *bonded* dos dois lados, são formadas tensões no painel de cristais líquidos do display localizadas na cavidade a ser aparafusada. Na Figura 3.11 está representada a junta com empeno do modelo criado para as duas peças e as deformações,  $\varepsilon$ , e tensões,  $\sigma$ , que são causadas no CF com o aparafusamento.

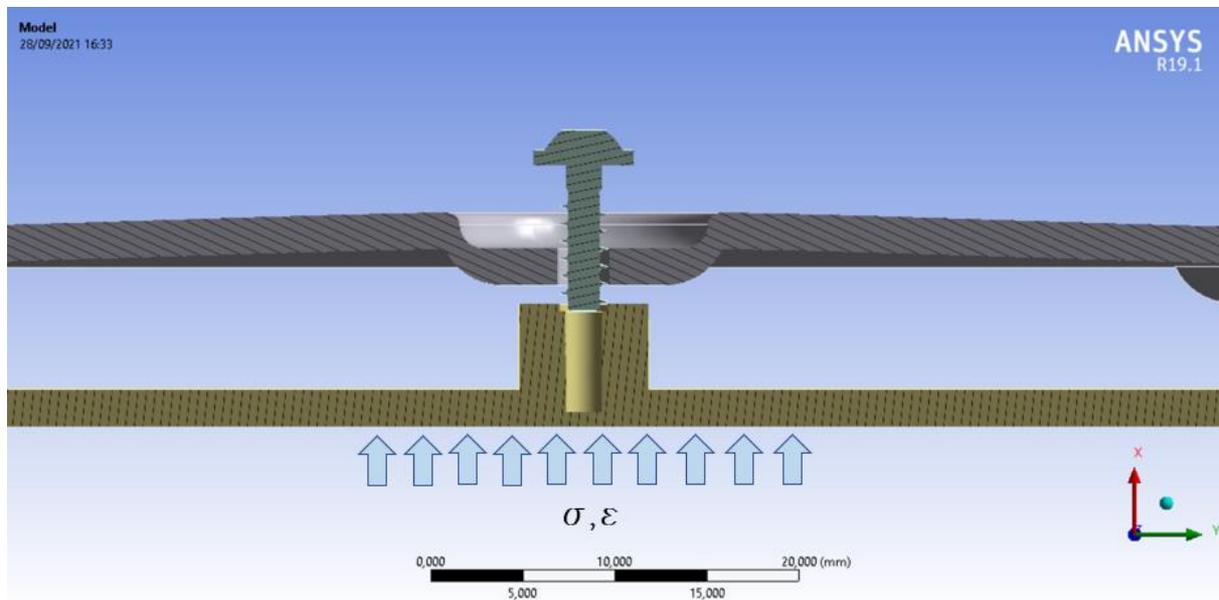


Figura 3.11 Tensões geradas na base do Carrier Frame

### 3.3 Soluções propostas para reduzir a degradação do BU

Foi efetuada uma recolha de soluções já existentes no mercado que poderiam resolver o problema da transmissão de esforços e foram também pensadas soluções concetuais para o mesmo fim. Este capítulo servirá para apresentar os conceitos estudados, com uma definição breve dos mesmos, o seu desenho/representação, bem como as suas vantagens/desvantagens. Estes são:

#### 1. Dispositivo deformável elasticamente

Para esta solução, a parte não roscada do pescoço do parafuso estaria encapsulada por um casquilho polimérico que possui dois braços laterais como representado na Figura 3.12 Conceito dispositivo deformável elasticamente. Neste caso ocorre a deformação elástica dos dois braços laterais da feature à medida que se dá o aparafusamento até que estes se deformem o suficiente de modo que estejam apoiados onde o parafuso apoia a sua cabeça no *System Carrier* ou até haver contacto entre os dois componentes da junta. Deste modo,

na existência de uma folga, seria promovida a deformação local da *feature*, em detrimento de um contacto parafuso-SC onde existe um *pull* do Carrier Frame.

Esta *feature* seria um componente adicional, mas de fácil dimensionamento dado tratar-se da deformação elástica e o deslocamento da *feature* seria conhecido.

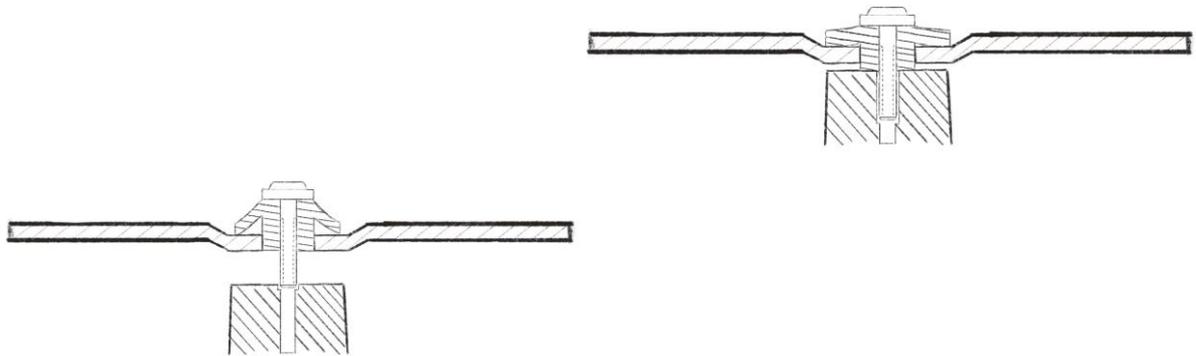


Figura 3.12 Conceito dispositivo deformável elasticamente

## 2. Dispositivo deformável plasticamente

Esta *feature* também se aplicaria como uma espécie de casquilho à zona não roscada do pescoço do parafuso, excetuando que neste caso este teria uma forma cónica. À medida que se dá o aparafusamento, este seria empurrado contra as paredes do furo do System Carrier e seria deformado plasticamente até encostar no castelo do Carrier Frame para se finalizar o aperto dos componentes, como representado na Figura 3.13.

Esta *feature*, ao contrário da primeira, seria mais difícil de dimensionar dado que seria necessário encontrar um material que se pudesse deformar plasticamente até obter uma forma cilíndrica com uma força de aperto baixa de modo que não tenha influência no BU, mas que não levasse ao desaperto do parafuso por relaxamento. Como o parafuso não teria contacto direto com os castelos, a ligação seria fragilizada e dependeria inteiramente de como das características do material escolhido para o cone.

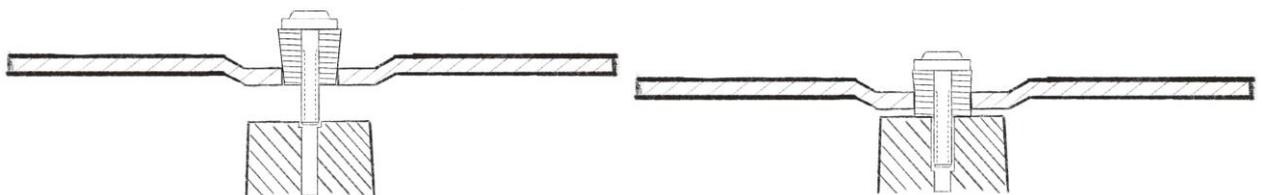


Figura 3.13 Conceito dispositivo deformável plasticamente

### 3. Dispositivo formado por uma serrilha e uma aba de retenção dentro do castelo do CF

Esta feature surge da ideia de aumentar a flexibilidade do castelo do Carrier Frame, sem que a deformação seja transmitida a um nível não local. Neste conceito existiria um segundo castelo dentro do primeiro que subiria quando se desse o aparafusamento e se manteria no lugar após o aperto por umas patilhas de retenção posicionadas nas paredes interiores do castelo original. A subida desta peça dar-se-ia até ao contacto com o System Carrier. Conceito e seu funcionamento representados na Figura 3.14.

Esta possível solução teria a vantagem do corpo da serrilha poder ser feito com um material com melhores propriedades e que pudesse resistir melhor à temperatura e à vibração (*rattling noise*). No entanto, à parte de constituir elementos adicionais, este conceito alteraria a forma como se dá o aparafusamento atualmente, por formação de rosca, e as solicitações elevadas a que estariam sujeitas as patilhas de retenção com o aperto das placas.

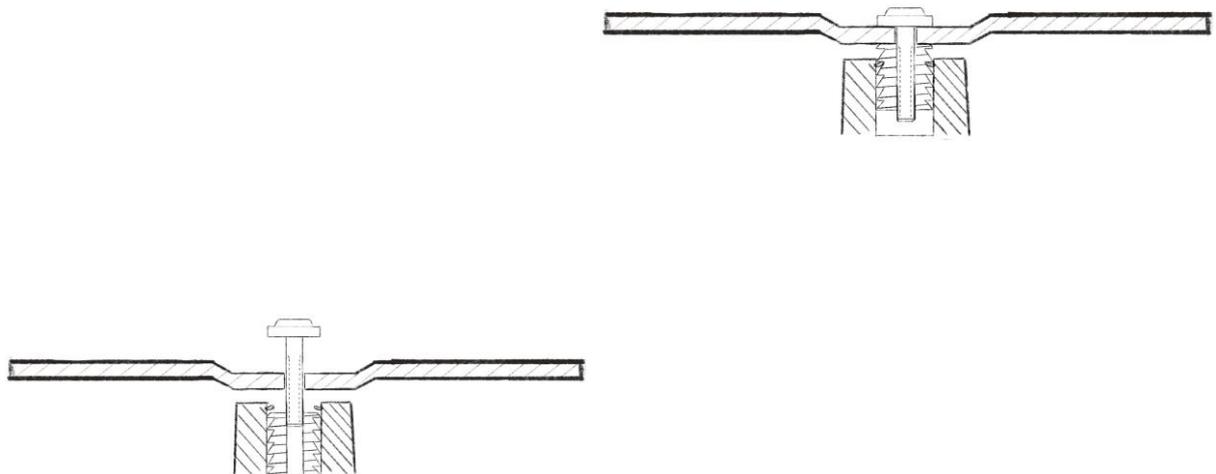


Figura 3.14 Conceito dispositivo com serrilha e patilha de retenção

### 4. Segundo castelo cónico

Em vez de consistir numa peça externa que se deformaria, esta possível solução pretende levar à deformação plástica do furo no dome do System Carrier, modificando a geometria do castelo do CF para que existisse um segundo ligeiramente angulado. Após a penetração deste no SC, ocorreria o contacto do castelo com a cabeça do parafuso, como representado na Figura 3.15.

Esta *feature* possibilitaria uma ligação robusta e também que o parafuso estivesse em contacto com as duas peças. No entanto, a força necessária à deformação do *System Carrier* poderia ser demasiado elevada devido ao seu material e dadas as suas características pode romper em vez de se deformar plasticamente como pretendido. Por outro lado, esta solução não elimina completamente a *gap*, dado que as peças só entram em contacto após o encosto do parafuso ao *System Carrier* e, caso exista folga, esta terá de ser vencida primeiro. Ainda como desvantagem, um castelo com esta geometria não cumpriria com as *guidelines* de aparafusamento e poderia levar a tensões elevadas no mesmo.

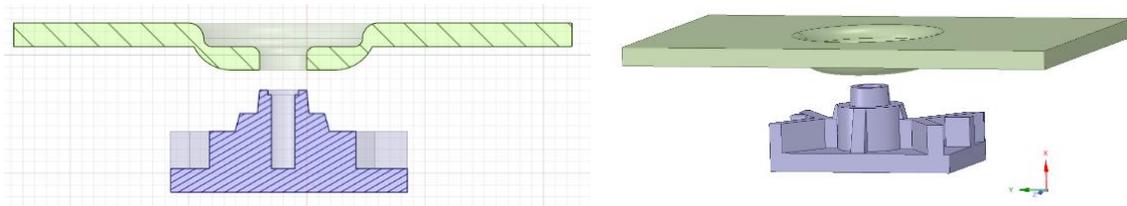


Figura 3.15 Conceito Segundo Castelo Cónico

## 5. Segundo castelo com *ribs*

Feature parecido à anterior, no entanto a deformação ocorreria no *Carrier Frame* numa *ribs* localizada no segundo castelo, que neste caso não seria cónico, como se pode visualizar na Figura 3.16.

Esta solução permitiria alterar as dimensões/número de *ribs* de modo a obter a força pretendida para a sua deformação anterior e, ao contrário da solução anterior, não colocariam o castelo sob elevadas tensões. No entanto, não cumpririam com as *guidelines* de aparafusamento.

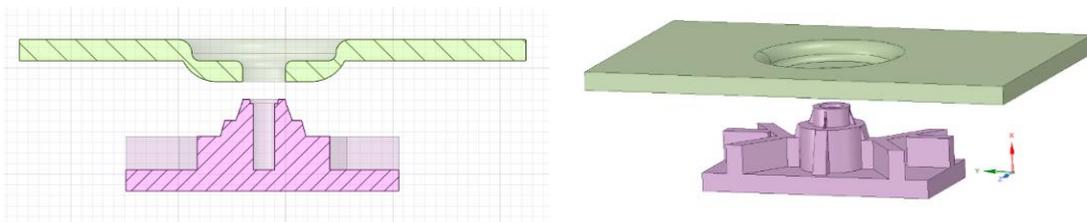
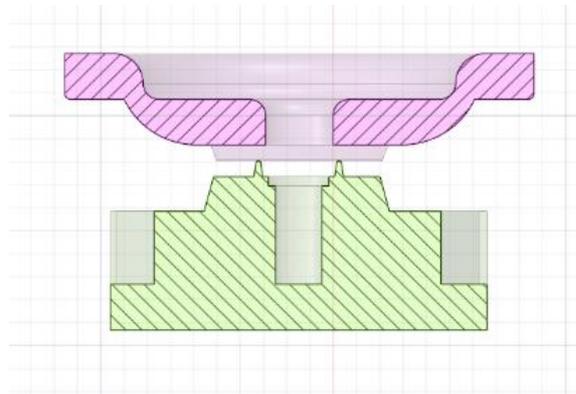


Figura 3.16 Conceito Segundo Castelo com Ribs

## 6. Protuberâncias nos castelos das peças

Esta *feature* consistiria em dois prismas triangulares dispostos perpendicularmente entre CF e SC, como representado na Figura 3.17. Existiriam dois por cada castelo da peça. À medida que se dá o aparafusamento estas serão esmagadas pelas peças, tendo um

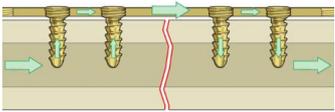
funcionamento semelhante ao de uma anilha, mas sem a adição de um novo componente. Esta *feature* permite que a folga seja ultrapassada numa fase mais inicial do aparafusamento, mas, como alguns outros conceitos considerados, não a eliminam. Apesar disso, poderiam possivelmente permitir detetar quando a folga acaba e entram em contacto os prismas das peças a partir da mudança de declive da curva binário-ângulo do aparafusamento. A deteção da mudança de declive permite um melhor controlo do aparafusamento e poderia levar à necessidade de um binário de aperto menor, que teria um efeito benéfico na transmissão de tensões. No entanto, não se sabe como se deformariam estes prismas e se a sua deformação leva a uma redução das tensões e é, deste modo, necessário um estudo para determiná-lo.



*Figura 3.17 Conceito dois prismas perpendiculares nos castelos*

## 7. Possíveis soluções já existentes no mercado

Tabela 4 Outras soluções encontradas

Designação	Definição	Representação	Vantagens/Desvantagens
<i>Böllhoff ECO</i>	Uma armação de plástico com uma porca metálica. Possui flexibilidade à compressão.		+ Integração no castelo do CF - Custo Elevado
EJOT Adjustment Mechanism	Mecanismo de ajuste à <i>gap</i> existente		+ Eliminação efeito desvios dimensionais - Custo elevado - Aparafusamento em duas fases
EJOT Compression Limiter	Contacto metal-metal entre parafuso e bucha que eliminam a compressão das peças		+ Contacto metal-metal + Reduz efeito relaxamento - Custo elevado
Locked plating	Parafuso locking head, aparafusamento com a existência de uma <i>gap</i> permanente e sem causar compressão dos componentes. O parafuso possui uma segunda rosca na sua cabeça e à medida que é aparafusado entre em contacto com a rosca que o furo do System Carrier teria de ter.	 AO	+ Elimina tensão transmitida ao CF - Tipo de parafuso de custo elevado - Necessita alteração profundas das peças para acomodar o parafuso com <i>locking head</i> - Poderia não funcionar dadas as características do material do System Carrier

### 3.3.1 Validação dos conceitos

Após ser feita uma recolha de ideias e de componentes no mercado que pudessem resolver o problema em questão, resolveu-se apenas avançar com conceitos que não constituíssem um

custo considerável, isto é, procurou-se soluções que não levassem à adição de outro componente ao *cluster*.

As três soluções possíveis escolhidas para modelação, integração no modelo e simulação cumprem uma função semelhante a componentes que poderiam ser integrados na junta, como a solução das protuberâncias funcionar como uma anilha, mas deste modo o seu custo de integração no *cluster* é desprezável e apenas supõe uma alteração aos moldes com que os componentes são fabricados. Dito isto, procedeu-se à criação de um modelo semelhante à junta dos componentes que servisse para acomodar as soluções como *features* dos *domes*.

Os quatro casos do modelo (sem solução, protuberância, *ribs* e castelo cónico) serão usados para serem efetuadas simulações do aparafusamento pelo método dos elementos finitos recorrendo ao software *Ansys Workbench*. Primeiramente, serão efetuadas simulações a apenas um castelo de modo a determinar como se dá a deformação das *features*, sendo avaliada a força necessária para o seu esmagamento. Depois, já com o modelo desenhado, será simulado o processo de aparafusamento dos componentes, onde serão usados os parâmetros de aparafusamento dos componentes reais, os seus materiais e um modelo de parafuso semelhante ao real. Os parâmetros e o software serão discutidos com mais pormenor no capítulo 4 e 5. No geral, o objetivo das simulações é medir as tensões/deformações que ocorrem na face de suporte do *Carrier Frame* e avaliar se as forças de aperto produzidas durante o aparafusamento são suficientes para deformar as *features*.

Serão considerados três casos para as simulações. No primeiro caso considera-se que as peças se encontram em perfeito estado e não sofreram empeno durante o seu fabrico. No segundo caso considera-se uma folga (*gap*) de 1 mm entre o castelo e o *dome* central das peças, tendo sido o *System Carrier* a sofrer o empeno. No terceiro e último caso, considera-se uma colisão (*overlap*) de 1 mm do castelo e do *dome*, fazendo com que a cavidade central esteja encostada e todas as outras cavidades com folga. Neste último caso é também o *System Carrier* a sofrer o empeno.

Os resultados das simulações numéricas permitirão concluir se o problema é reduzido com alguma das soluções e destas escolher uma delas para ser prototipada e testado o seu

aparafusamento. Estes testes servem não só para validar a solução, mas também para validar o modelo numérico, o que significa que poderia ser, mais tarde, usado para a avaliação de outras possíveis soluções ou mais casos de imperfeição das peças. Dos testes e das simulações procura-se saber se as tensões na face do Carrier Frame diminuem ou não com as features e o seu efeito na curva de aparafusamento.

### 3.3.2 Criação do modelo e Design das possíveis soluções

Foi necessária a criação de um modelo para as simulações e para os testes de modo a reduzir o custo computacional no primeiro caso e o custo das peças no segundo. O modelo consiste numa placa quadrada com 5 castelos no caso do *Carrier Frame* e 5 *domes* no caso do *System Carrier*, 1 no centro e os outros 4 em cada uma das extremidades. Na Figura 3.18 e Figura 3.19 pode-se ver a representação do modelo sem as *features* (desenhos técnicos mais em pormenor disponíveis no ANEXO I – Desenho Técnico Peças).

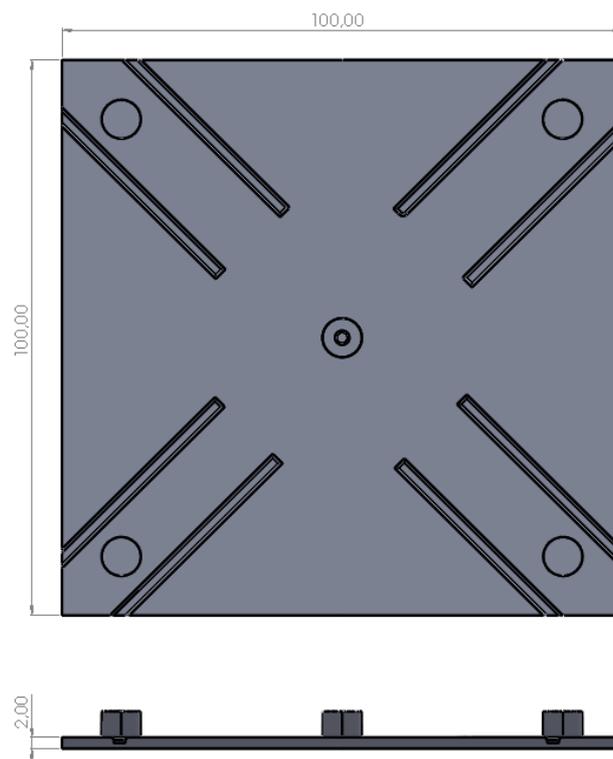


Figura 3.18 Representação do modelo do Carrier Frame

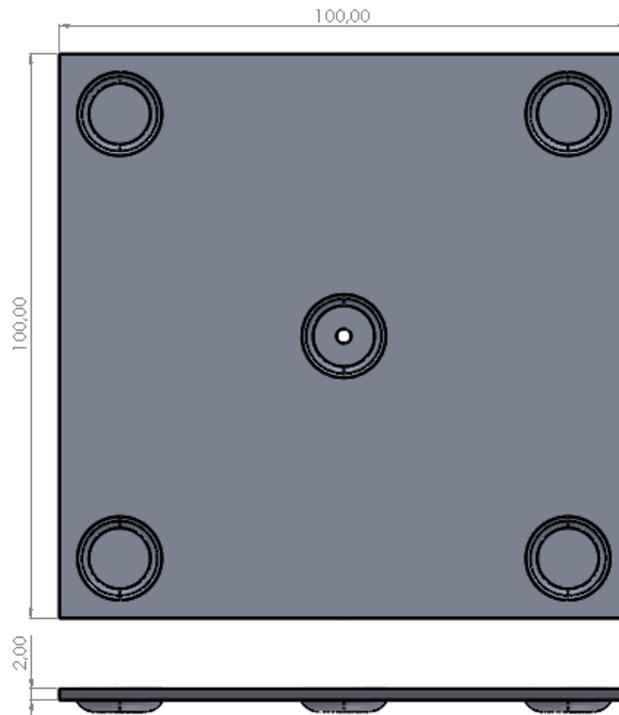


Figura 3.19 Representação do modelo do System Carrier

Os castelos e os domes têm as mesmas dimensões das peças originais e a espessura da placa também é a mesma. O *Carrier Frame* possui umas ranhuras que no princípio iam ser usadas para se poder medir a deformação mais facilmente na fase de testes, no entanto para o método escolhido no final elas poderiam não estar presentes. A geometria do modelo permitirá avaliar o efeito do aparafusamento do castelo central, ou de uma das extremidades, nos outros castelos, isto é, as medições podem ser feitas nos 5 pontos, dando uma boa ideia da influência dos defeitos dimensionais nas várias direções.

### 3.4 Simulações Efetuadas

Neste subcapítulo será feita a apresentação da análise numérica efetuada, começando com as considerações feitas em relação às propriedades e comportamento dos materiais resultados obtidos para as simulações e à geometria dos modelos, seguindo-se de condições de fronteira e parâmetros utilizados e terminando com uma apresentação e análise dos resultados obtidos.

#### 3.4.1 Considerações

Para as simulações foram utilizadas as propriedades dos materiais das peças originais. no entanto, sendo materiais com matriz polimérica e fibra de vidro, como foi explicado no subcapítulo 2.2.3, estes apresentam diferente comportamento mecânico dependendo da orientação da fibra de vidro na peça. Dito isto, nas simulações foi considerado que estes possuem um comportamento isotrópico, dado que conhecer a rigidez e outras propriedades para cada direção em materiais produzidos por moldação por injeção é complexo e são dados que não foi possível obter.

Na Tabela 5 é possível observar algumas propriedades destes materiais:

Tabela 5 Algumas propriedades dos materiais das peças

	<i>Carrier Frame</i>	<i>System Carrier</i>	
Designação	Ryton BR111 + GF/MX 65	Celanex 2302 GV1/30	Tipo Teste
Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	1940	1550	ASTM D792
Módulo de Elasticidade à compressão [GPa]	26		ASTM D695
Módulo de Flexão [Gpa]	19,3		ASTM D790
Módulo de elasticidade à tração [Gpa]	21	10,5	ISSO 527-2
Coeficiente de <i>Poisson</i>	0,34	0,34	ISSO 527
Tensão de rotura (tração) [Mpa]	165	150	ISSO 527-2
Deformação na rotura (tração) [%]	1,1	2,5	ISSO 527-2
Tensão de rotura (compressão)	326		ASTM D695
Percentagem de fibra [%]	65 (vidro + mineral)	30 (vidro)	

Enquanto estas propriedades descrevem o comportamento elástico dos materiais, nas simulações efetuadas também está presente a deformação plástica das peças, pelo que foi necessário incluir adicionalmente para cada material uma curva de tensão-deformação e um critério de rotura. A tensão de cedência considerada foi 0,2% do Engineering Strain para ambos os materiais. [99] Na Figura 3.20 e Figura 3.21 estão representadas as curvas tensão-deformação dos dois materiais que foram utilizadas.

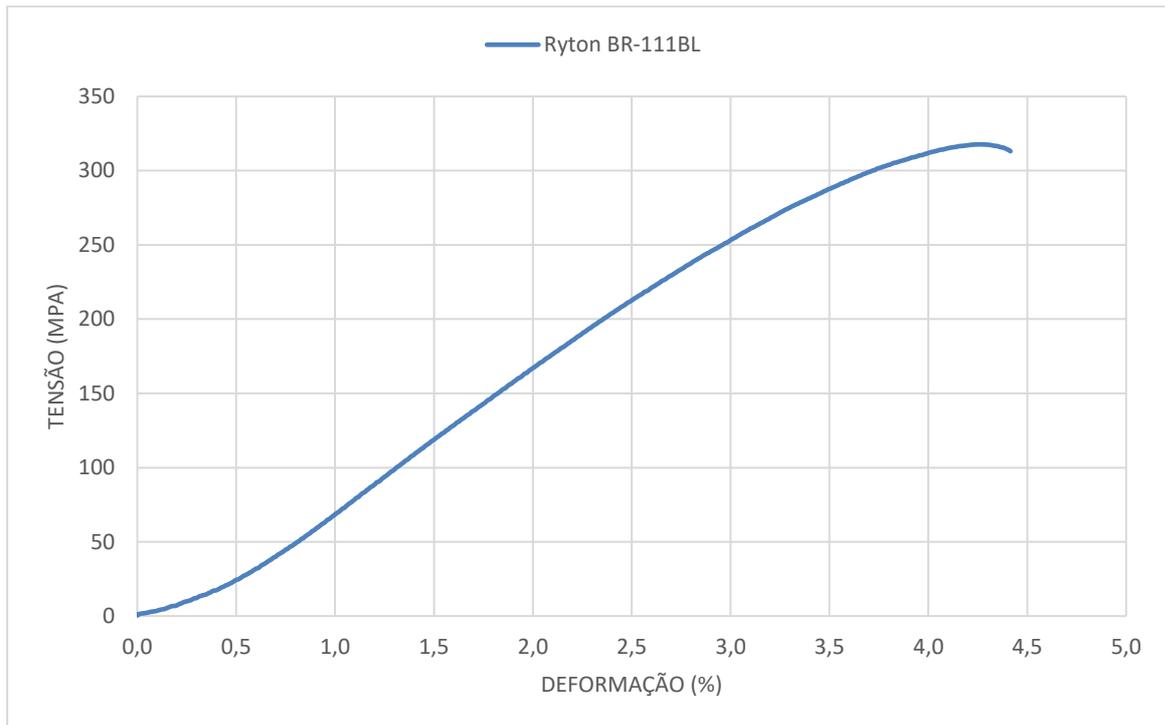


Figura 3.20 Curva Engenharia Stress-Strain Ryton BR111 [97]

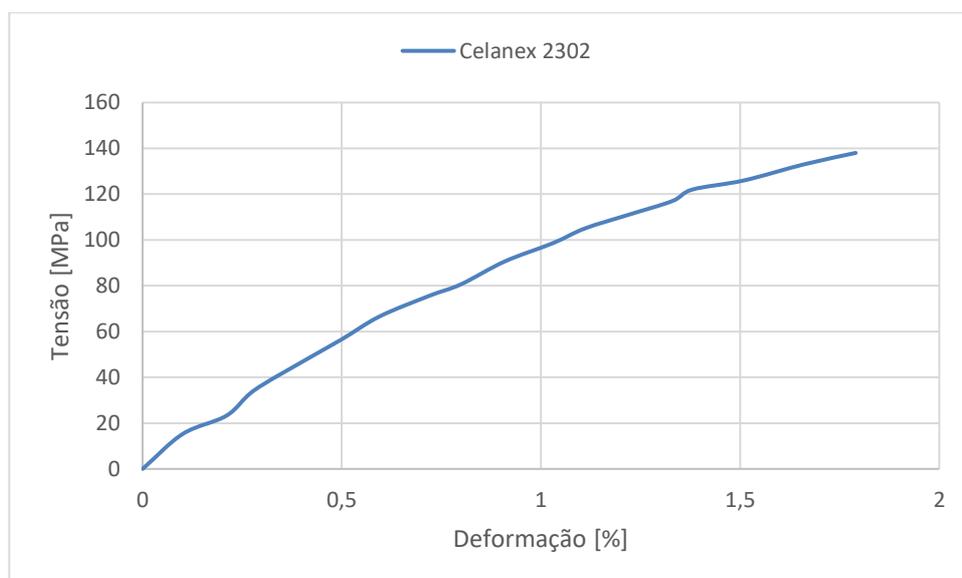


Figura 3.21 Curva Engenharia Stress-Strain Celanex 2302 [100]

Para o comportamento plástico foi escolhido em Ansys a opção “Multilinear Isotropic Hardening”. Esta opção usa os valores da curva tensão-deformação verdadeira e apenas considera a deformação plástica. Para se chegar a esta nova curva, deve partir-se da curva de engenharia e aplicar a seguinte fórmula aos pontos da tensão:

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng}(\varepsilon_{eng} + 1) \quad \text{Equação 3.1}$$

E para a deformação,

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon_{eng}) \quad \text{Equação 3.2}$$

Depois, calcula-se a deformação elástica através da expressão:

$$\varepsilon_{elastic} = \frac{\sigma_{true}}{E} \quad \text{Equação 3.3}$$

E a deformação plástica pela diferença entre a deformação verdadeira,  $\varepsilon_{true}$  e a deformação elástica,  $\varepsilon_{elastic}$ . Para a introdução da curva em Ansys, deverão ser escolhidos no máximo 10 pontos e o primeiro valor da deformação plástica é nula

Tendo-se obtido a seguinte curva para o caso do material do *Carrier Frame*, representada pela Figura 3.22:

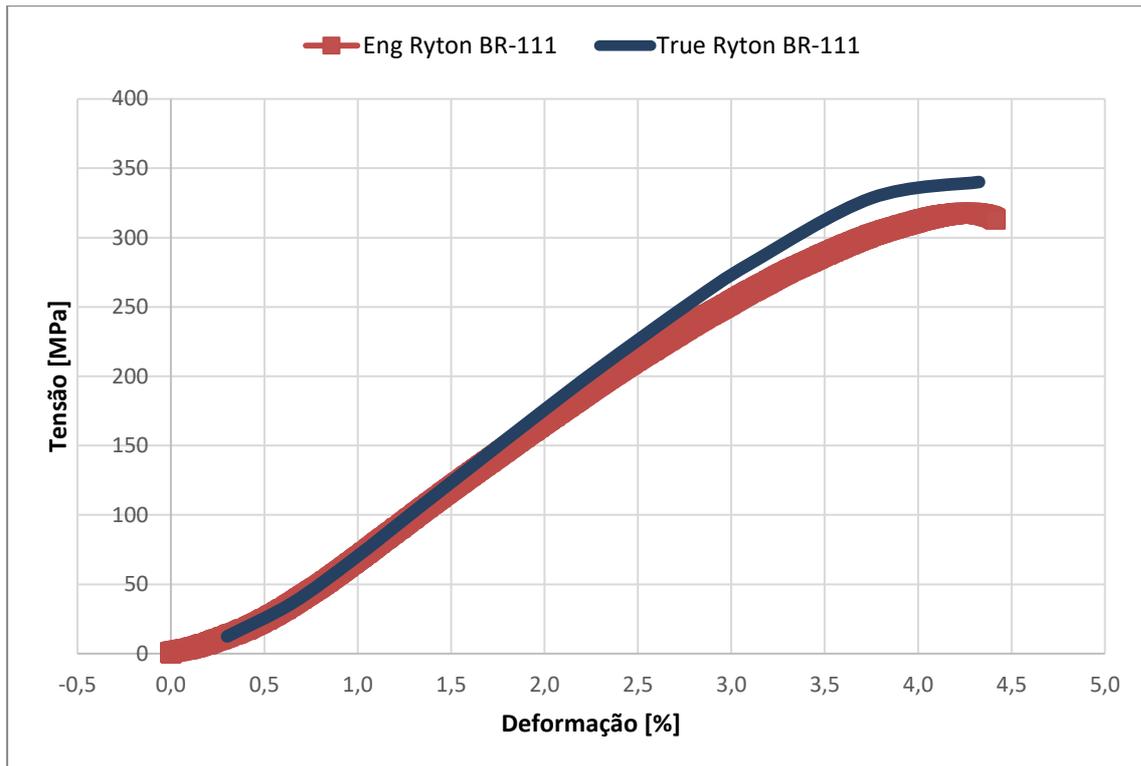


Figura 3.22 Curva tensão-deformação verdadeira vs curva tensão-deformação engenharia

Na Tabela 6 é possível observar os pontos introduzidos para as curvas de ambos os materiais.

Tabela 6 Pontos Multilinear Isotropic Hardening para ambos os materiais

Ryton BR 111		Celanex 2302	
Plastic Strain	Stress [MPa]	Plastic Strain	Stress [Mpa]
0	10	0	27,1
0,0064748	36,1	0,0024684	34,396
0,0098431	68,1	0,0040543	56,883
0,013109	102	0,0054227	76,144
0,019657	169	0,0064552	91,424
0,022942	201	0,0074662	106,17
0,027813	246	0,0084579	118,56
0,031048	273	0,009202	127,9
0,037507	317	0,0097823	135,21
0,043257	326	0,010259	140,47

Em relação ao critério de rotura do material, existem várias teorias que podem ser divididas em três categorias: [92]

- De limite ou não interativas – Critérios da máxima deformação e máxima tensão;
- Completamente interativas – Critérios de Tsai-Hill e Tsai-Wu;
- Parcialmente interativas – Critérios de Hashin-Rotem, Puck e NU-Daniel;

Os critérios interativos consideram o modo de rotura das fibras e intra fibras, tendo em conta os componentes da tensão a atuar no plano. Os critérios não interativos são mais simples e a principal desvantagem deles é não existir interação entre os componentes da tensão e da deformação. No entanto, são os mais usados e a facilidade do seu uso compensa uma ligeira perda de precisão. [93] [94]

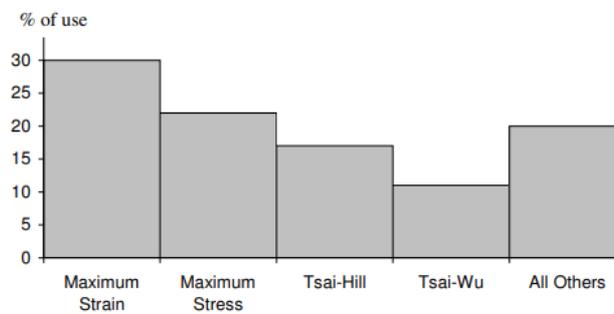


Figura 3.23 Uso na indústria dos critérios de rotura [94]

Deste modo, foi escolhido o critério de máxima tensão (*Maximum Stress* na Figura 3.23) como modelo de dano para ambos os materiais.

#### 3.4.2 Deformações locais

Os objetivos destas primeiras simulações prendem-se por observar o comportamento das *features* quando são deformadas, bem como ter atenção aos seguintes aspetos:

- A força necessária para deformação das *features* até o castelo e *dome* entrassem em contacto;
- Verificar se esta força estava dentro da força de aperto desenvolvida durante o aparafusamento das duas peças reais
- Verificar, por último, que não é de tal modo alta para que possa levar à deterioração do BU, tendo como referência a força de aperto para a especificação uso de 66% da zona de aparafusamento.

Os resultados serão comparados com a força de aperto típica do aparafusamento destas peças para perceber se a acomodação destas seria viável do ponto de vista do seu esmagamento. Para estas simulações o modelo considerado trata-se de um par *Carrier Frame – System Carrier* constituídos apenas por um castelo. Na Figura 3.24, Figura 3.25 e Figura 3.26 estão representados os modelos utilizados para cada uma destas simulações, modelados em *Catia V5* e importados para *Ansys* com algumas alterações efetuadas em *Spaceclaim*, como adição de *fillets*.

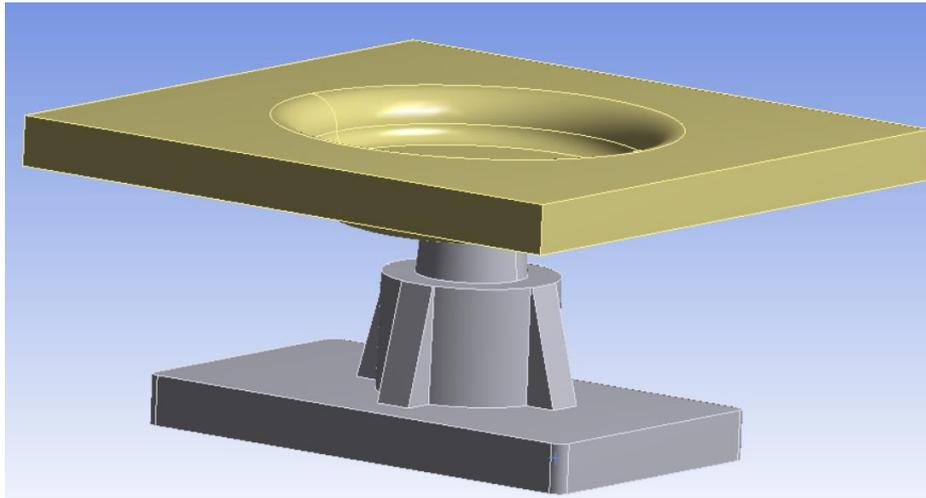


Figura 3.24 Modelo simulação Boss

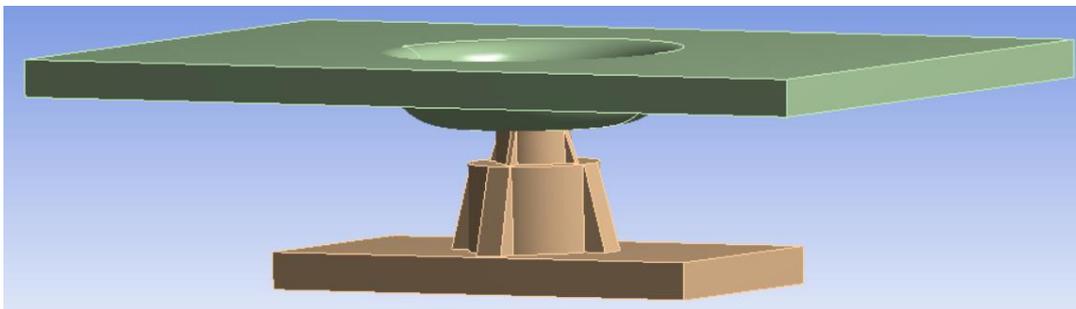


Figura 3.25 Modelo Simulação Ribs

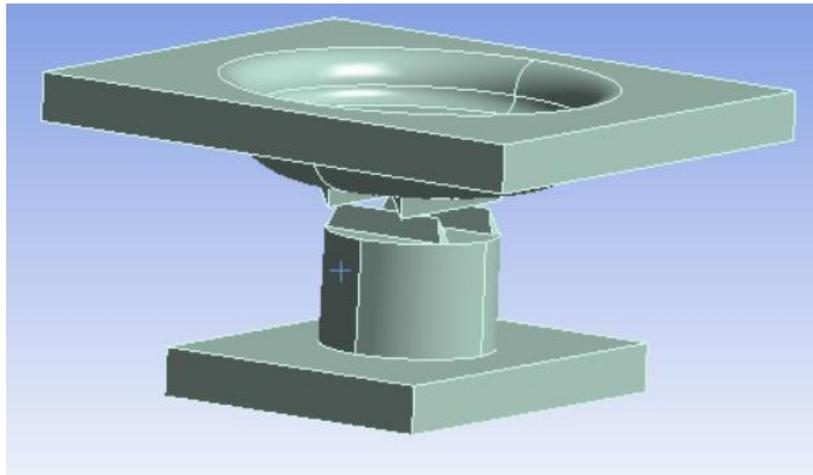


Figura 3.26 Modelo simulação features protuberâncias

O princípio em todos estes conceitos é aproveitar a deformação local plástica das peças para permitir uma sustentação da ligação interferindo o mínimo possível na deformação da superfície do CF. Teoricamente seja qual for o empeno das peças, dentro do limite geométrico considerado, deve haver uma porção do aperto que ampare o erro de fabricação das peças.

#### 3.4.2.1 Condições de fronteira

No caso das simulações realizadas em *Explicit Dynamics*, a solicitação foi aplicada à peça que é empurrada pelo parafuso na situação real uma velocidade na direção do eixo x, como representa a Figura 3.27.

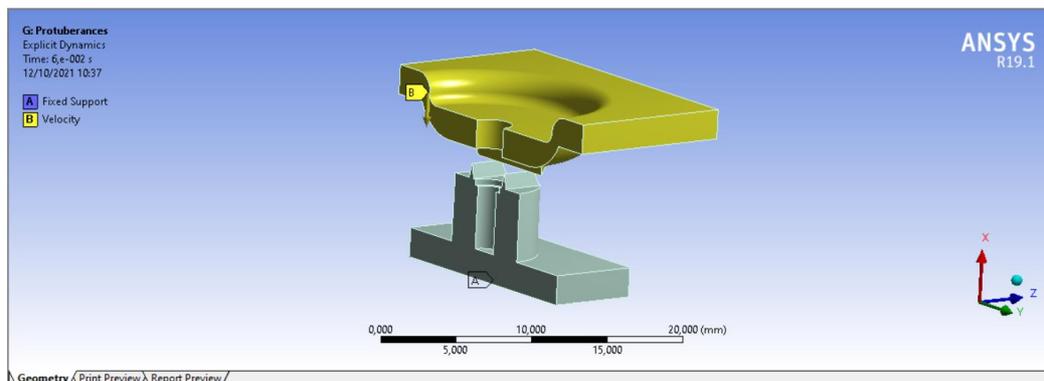


Figura 3.27 Condições de fronteira para simulações locais em *Explicit Dynamics*

A razão pela escolha da velocidade como solicitação em vez de um deslocamento deve-se à facilidade em alterá-la quando é alterado o tempo de simulação. Dado que se usou um método iterativo para se chegar à solução *quasi-static*, tiveram de ser usados *time-steps* diferentes. O uso da velocidade permite a sua aplicação progressiva, que ajuda a obter a solução *quasi-static* e permite mais diretamente uma comparação com as velocidades da

situação real. No caso da simulação à *feature Boss*, utilizou-se um deslocamento da face superior do *Dome* para unir as duas peças, ao qual se juntou um apoio simples nas faces laterais do *System Carrier*, que permitem o seu deslocamento apenas na direção de deslocamento do *Dome*.

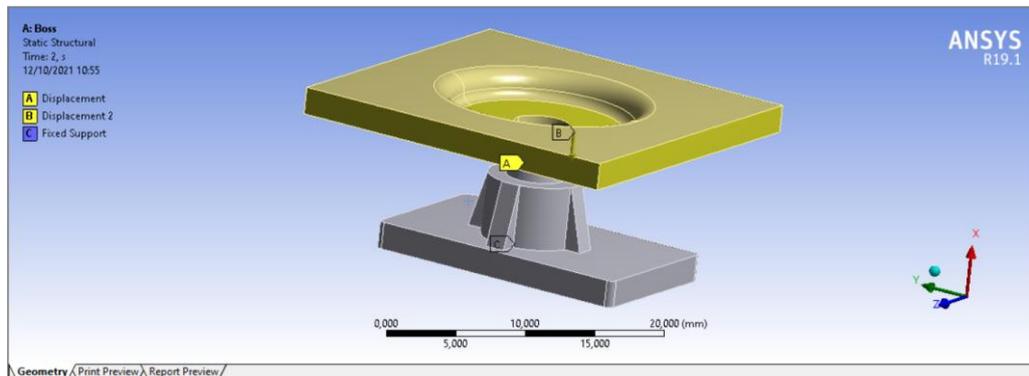


Figura 3.28

Condições de fronteira simulação local em Static Structural

Tanto os modelos da simulação estática como os da simulação *quasi-static* possuem também um encastramento da face inferior do *Carrier Frame* através de um *fixed support* que o fixa, permitindo a deformação das *features*.

Na Tabela 7 estão representados os diferentes tipos de simulação usados para as *features*.

Tabela 7 Tipo de simulações usadas para as diferentes features

Feature	Castelo Cónico	Castelo com Ribs	Protuberâncias
Método	Implícito	Explícito	Explícito
Programa	Static Structural	Explicit Dynamics	Explicit Dynamics
Condição de Fronteira	Deslocamento	Velocidade	Velocidade
Tipo de simulação	Estática	Quase-estática	Quase-estática

### 3.4.2.2 Feature castelo cónico

A primeira simulação da deformação local foi feita à *feature* do castelo cónico, um segundo castelo no *Carrier Frame* que se posicionaria em cima do primeiro e apresenta as seguintes dimensões:

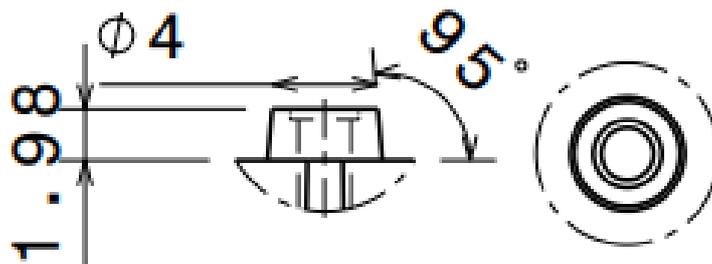


Figura 3.29 Vista em detalhe do segundo castelo do Carrier Frame e suas dimensões

O System Carrier, por sua vez, apresenta um furo de 4 mm.

Como foi dito anteriormente, a simulação local às features cónicas foi realizada de forma estática no *static structural*, onde não são tidos em conta os efeitos da inércia e é usado um algoritmo incondicionalmente estável. Quanto aos pormenores do pré-processamento, a definição do contacto e a discretização efetuada estão representados na Tabela 8:

Tabela 8 Parâmetros de contacto Simulação Feature Cónica

Parâmetros de contacto	
Type	Frictionless
Behavior	Symmetric
Formulation	Augmented Lagrange
Detection Method	Nodal Normal From Contact
Normal Stiffness Factor	3

O principal desafio nesta simulação foi a penetração excessiva que se verificava entre as duas partes em contacto. Através da definição de contacto da Tabela 8, foi possível manter a penetração abaixo dos  $4,3 \mu\text{m}$ , o que permitiu a convergência da solução.

Em relação à malha, foi utilizado um tamanho dos elementos de 2mm para os dois corpos, com refinamento desta a 0,3mm nas áreas onde existe contacto entre estes.

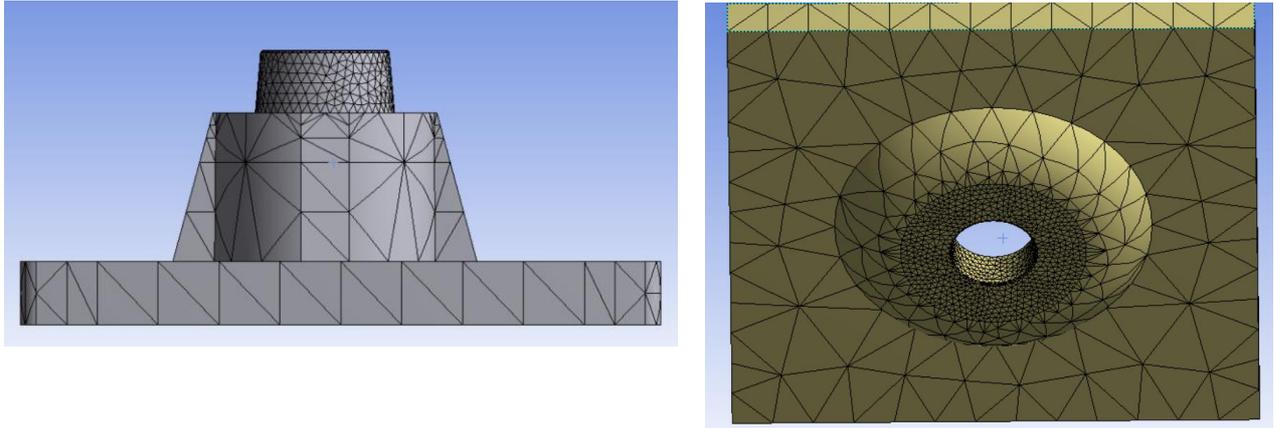


Figura 3.30 Discretização Carrier Frame (esquerda) e System Carrier (direita)

De modo a se obter a força necessária à deformação do cone, foi feita a recolha dos resultados usando o “Force Reaction” nas seguintes faces do System Carrier, que nos indica a força de reação nas faces em contacto com o Carrier Frame:

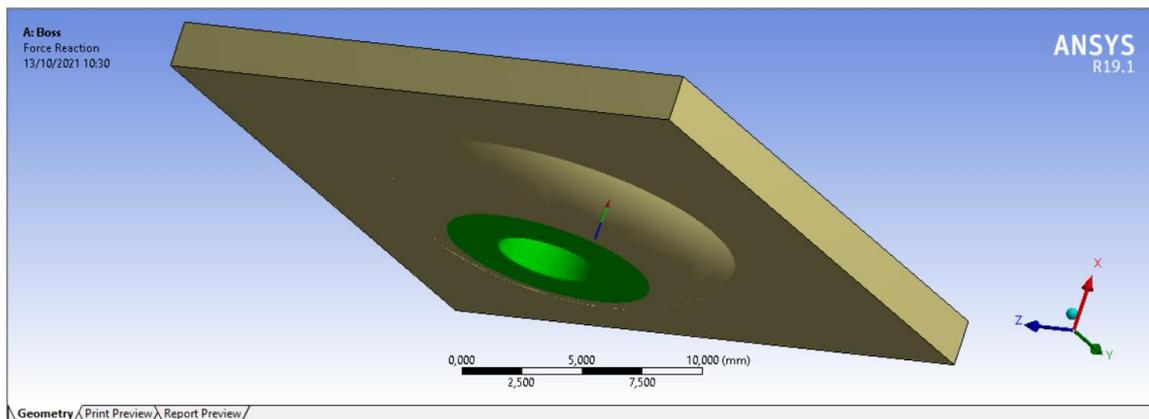


Figura 3.31 Faces do SC onde foi medida a força de reação

O gráfico que se obteve está representado na Figura 3.32:

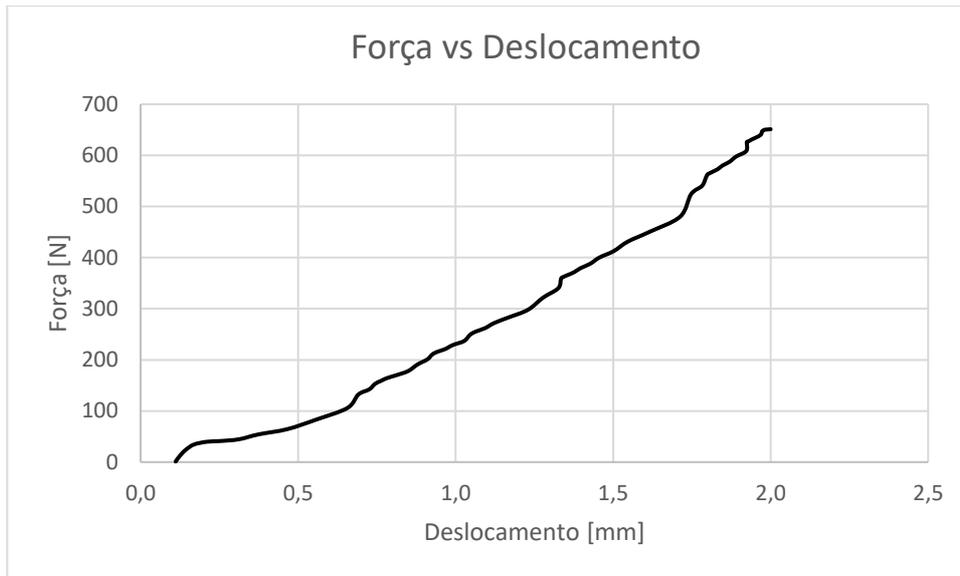


Figura 3.32 Gráfico Força-Deslocamento feature cônica

Como se pode observar, a força resultante é crescente durante o decorrer do deslocamento do *System Carrier*, chegando até aos 650 N quando as duas faces dos castelos se tocam. Este deslocamento é acompanhado pela deformação plástica do orifício do *System Carrier*, que se acopla à geometria cônica do castelo superior do *Carrier Frame*, como se pode ver na Figura 3.33:

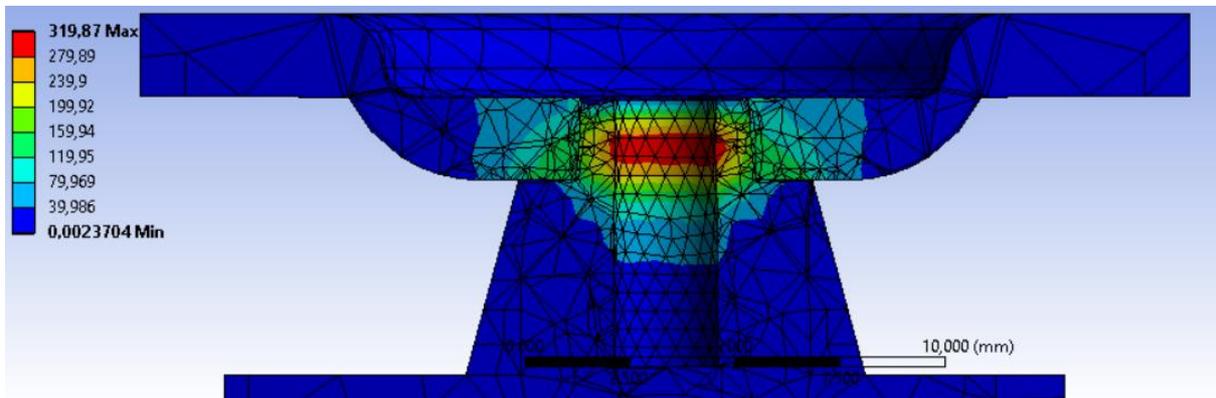


Figura 3.33 Vista em secção da tensão nas duas partes

Como se pode ver pela figura, no final do curso das peças, quando estas se encostam, o interior do furo do *Carrier Frame* contém tensões de Von Mises na ordem dos 300 MPa, consequência da deformação plástica do cone das peças. Esta concentração de tensões é bastante elevada, e considera-se como um ponto fraco deste conceito.

### 3.4.2.3 Feature castelo com ribs

Esta feature, à semelhança da feature anterior, apresenta um segundo castelo. No entanto, este apresenta menor conicidade e possui 4 ribs à sua volta. Este conceito tem como objetivo o esmagamento das ribs à medida que se dá o aparafusamento, funcionando como um amortecedor que impede que no Carrier Frame se desenvolvam tensões que o façam subir. As outras duas simulações às deformações locais foram efetuadas utilizando um algoritmo explícito e um tipo de simulação quase-estática, pelo que necessitam validação dos resultados comparando a energia cinética e a energia interna. Como foi dito no subcapítulo 3.4.2.1, a solicitação aplicada ao System Carrier foi uma velocidade na direção do eixo x até que se obteve uma solução que satisfazia as condições das energias. Depois, será também verificado que a quantidade de massa que se acrescentou aos corpos foi inferior a 100 e foi apenas usada em elementos com tamanho característico mais pequeno, sendo observado através do User Defined Result com a expressão MASS\_SCALE. A geometria e as dimensões das ribs que foram implementadas e simuladas são mostradas na Figura 3.34:

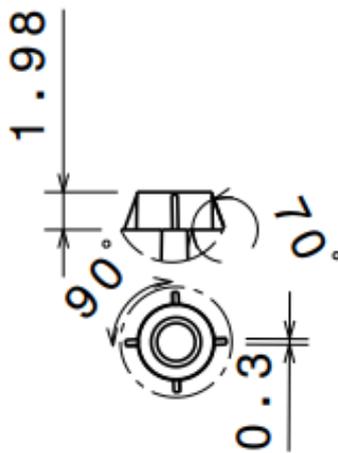


Figura 3.34 Dimensões feature ribs

O modelo utilizado para realizar a simulação é semelhante ao utilizado anteriormente, tendo como diferença a *feature* em estudo, como ilustrado pela Figura 3.35 .

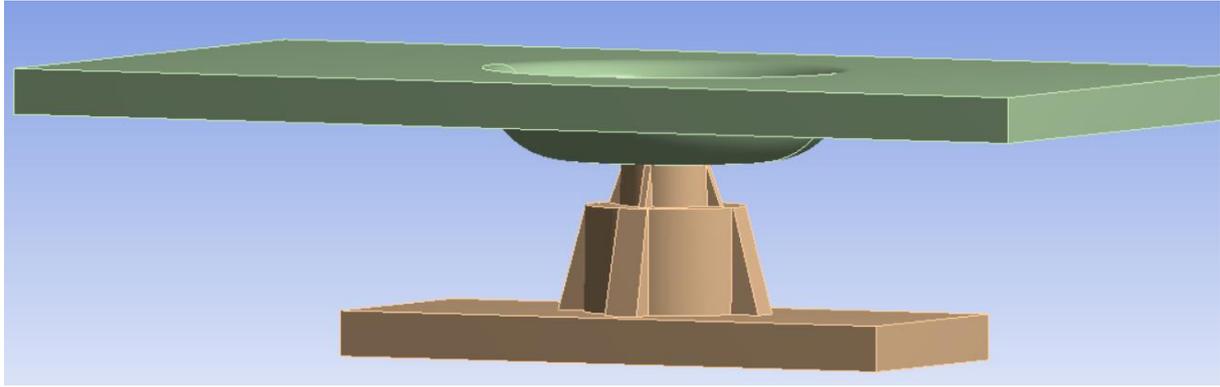


Figura 3.35 Modelo Feature Ribs

Em relação aos contactos, em Explicit Dynamics existe um comando que permite definir contactos ou interações entre todos os corpos, o *Body Interactions*, onde foram escolhidas as opções mostradas na Tabela 9 Definição do contacto na simulação features ribs Tabela 9:

Tabela 9 Definição do contacto na simulação features ribs

<b>Body Interactions</b>	
<b>Contact Definition</b>	Proximity Based
<b>Timestep Safety Factor</b>	0,2
<b>Edge on Edge contact</b>	No
<b>Type</b>	Frictionless

Quanto à força obtida, o gráfico obtido foi o representado na Figura 3.36 Gráfico Força-tempo :

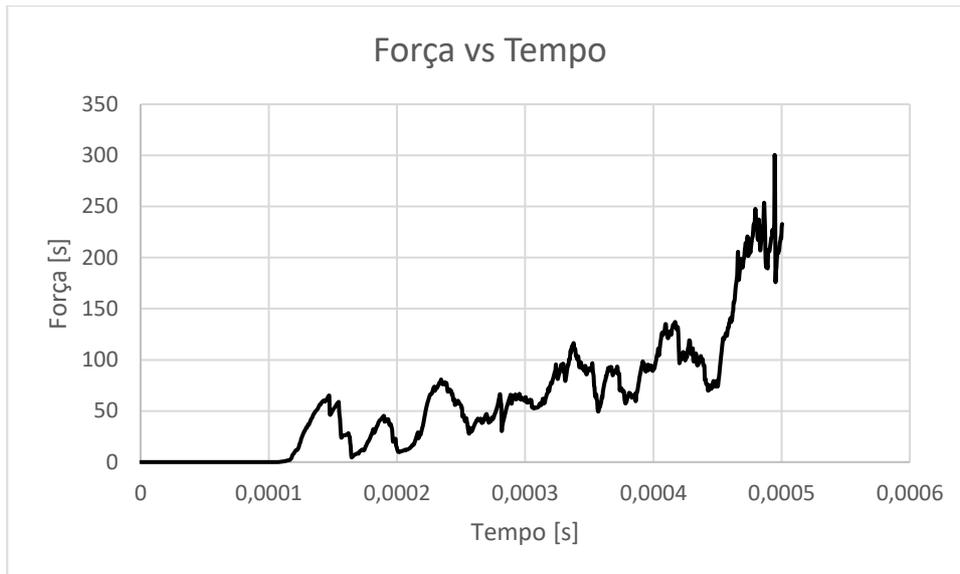


Figura 3.36 Gráfico Força-tempo feature ribs

Como se pode observar pela Figura 3.36, quando termina a simulação e o deslocamento do *System Carrier* leva ao contacto do seu dome e do castelo do *Carrier Frame*, a força necessária para esmagar as *features* é de sensivelmente 300 N.

O *End Time* escolhido foi de 0,0005 s, pelo que para o deslocamento pretendido de 2 mm, a velocidade aplicada foi de 4000 mm/s. O CFL time step escolhido para se obter uma solução num tempo adequado foi de 3,5 e-08s. A partir desta definição, obteve-se as seguintes energias interna e cinética mostradas na Figura 3.37 :

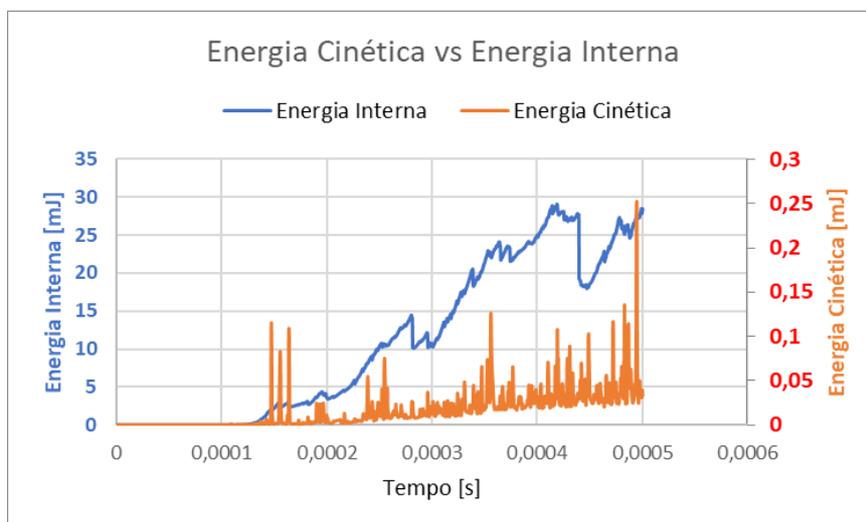


Figura 3.37 Comparação Energia Interna vs Energia Cinética feature Ribs

A energia cinética máxima obtida foi de  $\sim 0,25$  mJ e a energia interna chegou aos  $\sim 28$  mJ. Como se pode visualizar a partir do gráfico da Figura 3.37, a energia interna é bastante superior à

energia cinética durante a maior parte da simulação, cumprindo-se o critério da relação entre as energias para uma simulação *quasi-static*. Em relação á massa adicionada aos corpos, o resultado do MASS\_SCALE indica que o máximo foi de ~17,5, como nos indica a tabela Tabela 10, as zonas onde foi adicionada massa foram nas *ribs* à medida que deformavam e antes de sofrerem erosão. Como se trata de um valor não significativo, considera-se que não teve influência nos resultados obtidos.

Tabela 10 Mass scaling nas features ribs

Tempo [s]	Aumento de massa
1,18E-38	16,6
4,88E-05	16,6
5,49E-05	16,6
6,10E-05	16,6
6,71E-05	16,6
...	...
2,64E-04	16,6
2,76E-04	16,797
2,82E-04	17,47
...	...
4,25E-04	17,485
4,31E-04	17,485
4,37E-04	17,485
4,43E-04	17,485
4,49E-04	17,485
4,55E-04	17,485
4,61E-04	17,485
4,67E-04	17,485
4,73E-04	17,485
4,80E-04	17,485
4,86E-04	17,485
4,92E-04	17,485
4,98E-04	17,485

### 3.4.2.4 Feature protuberâncias

Esta *feature* consiste em dois pares de prismas triangulares posicionados perpendicularmente em cada par *Carrier Frame – System Carrier*. O objetivo destes é, ao serem aparafusadas as peças, ocorrer o seu esmagamento reduzindo a solicitação global no *Carrier Frame* e conseqüentemente a propagação de tensões ao *display*. A sua geometria e dimensões são as mostradas na Figura 3.38:

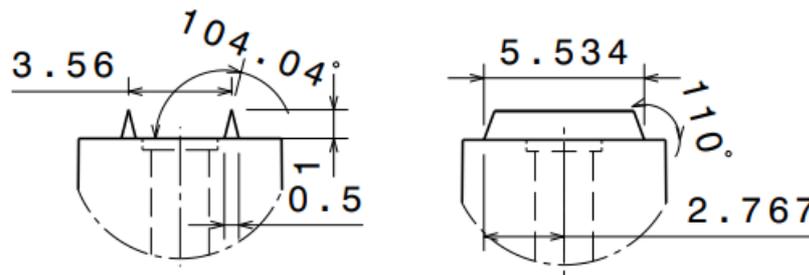


Figura 3.38 Dimensões feature protuberância

O modelo utilizado para esta simulação foi o mostrado na Figura 3.39:

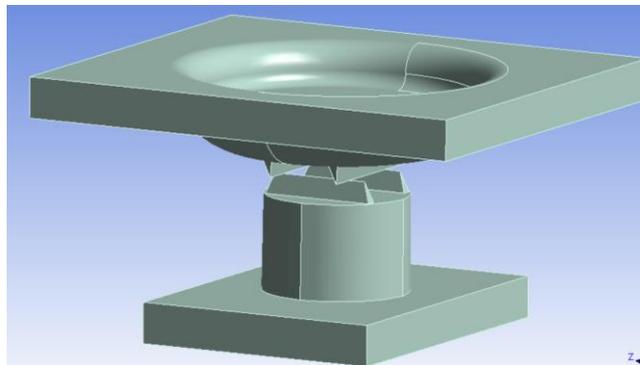


Figura 3.39 Modelo protuberâncias

Ao contrário da simulação anterior, nesta utilizou-se uma deteção de contacto por trajetória com uma formulação por *penalty*, semelhante à formulação apresentada anteriormente para o método implícito, de modo a tornar a simulação mais eficiente. Alguns parâmetros utilizados no *body interaction* estão representados na Tabela 11:

Tabela 11 Body Interactions feature protuberâncias

Body Interactions	
Contact Detection	Trajectory
Formulation	Penalty
Element Self Contact	Yes
Type	Frictionless

O element self-contact permite que um elemento seja removido se se deforma de tal maneira que um dos seus nós se aproxima de uma das suas faces. O valor crítico a partir do qual ocorre a erosão é calculado através do produto entre uma tolerância, neste caso 0,2, e o tamanho característico dos elementos.

O gráfico de força em função do tempo obtido está representado na Figura 3.40.

:



Figura 3.40 Força vs tempo feature protuberâncias

Como se pode observar pelo gráfico, a força necessária para deformar completamente as features é de 187 N. O end time escolhido foi de 0,00085s e a velocidade aplicada de 1200 mm/s. Na Figura 3.41 está representado um pormenor da deformação das features.

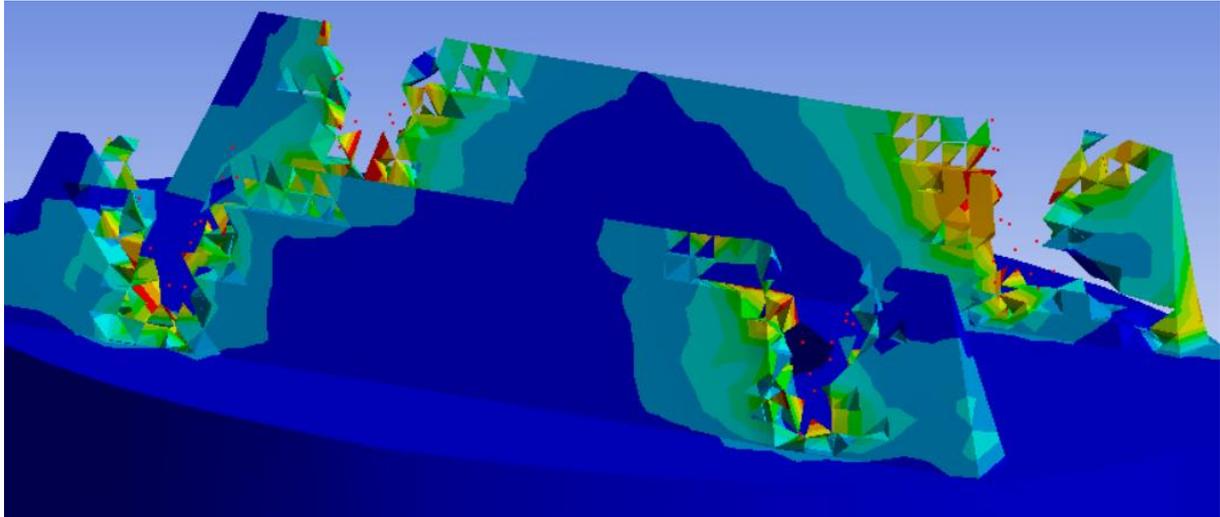


Figura 3.41 Deformação ocorrida no Carrier Frame

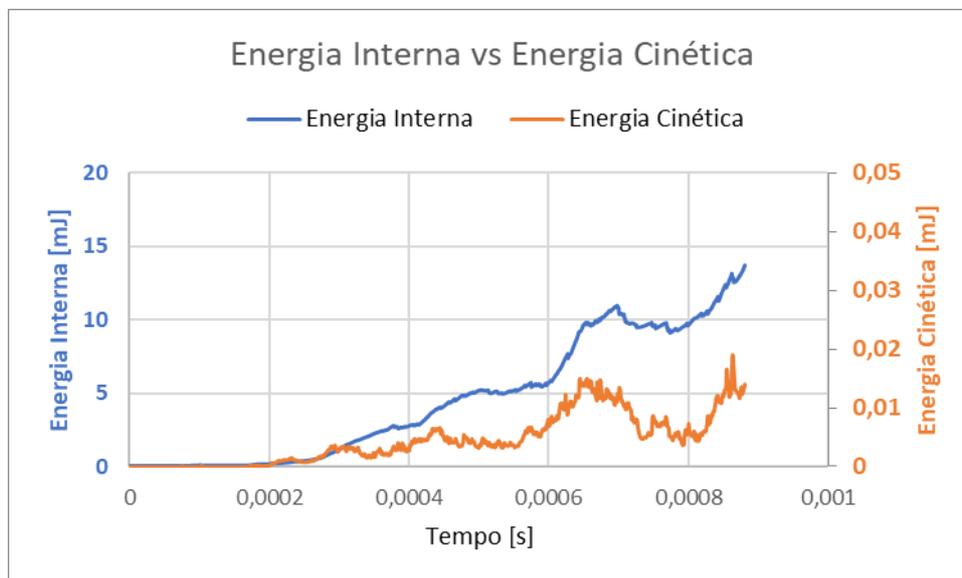


Figura 3.42 Energia interna vs energia cinética protuberâncias

Como se pode observar pelo gráfico da Figura 3.42, a energia cinética manteve-se durante a maior parte da simulação  $< 5\%$  da energia interna, pelo que também foi cumprida a condição de uma simulação *quasi-static* para este caso. Para o caso das protuberâncias, o *mass scaling* máximo efetuado foi de 100.

#### 3.4.2.5 Análise dos resultados

Em relação à força necessária à sua deformação, a *feature* deve cumprir não só com ser possível de deformar completamente com a força de aperto máxima produzida durante o aparafusamento, mas também com uma força que não cause uma alteração significativa às curvas de binário e força de aperto das peças, pois um aumento destes dois parâmetros

poderia levar a um aumento do BU mesmo com as features. Dito isto, no gráfico da Figura 3.43 é possível observar uma comparação entre a força de clamp produzida no aparafusamento das peças reais e a força necessária para esmagar as *features* em estudo. A força de aperto considerada para as peças reais consiste na resultante do seu aparafusamento com o *Tightening Torque* atualmente utilizado de 0,54 Nm.

Pelo gráfico pode-se ver que a *feature boss* ultrapassa a força máxima, a ribs necessita de aproximadamente 60% da força de aperto das peças e a protuberâncias necessita de um pouco mais de metade da força para serem deformadas. Por este facto, e por se considerar que as outras duas *features* eram mais interessantes de um ponto de vista do seu *design*, decidiu-se descartar a *feature boss* e continuar o estudo apenas com as outras duas possíveis *features*.

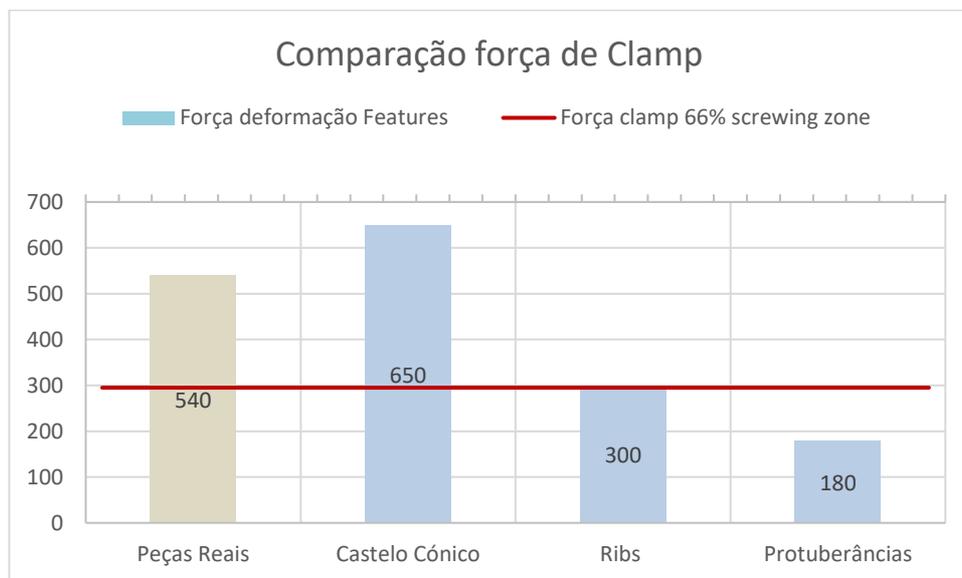


Figura 3.43 Comparação entre força de clamp das peças reais e resultados obtidos das simulações às features

### 3.4.3 Simulação do aparafusamento

A outra análise numérica efetuada foi ao efeito das *features* no aparafusamento das peças. Para este efeito, procedeu-se ao desenho de um modelo onde estivessem representados os castelos e os domes de ambas as peças. Este modelo deveria possuir os castelos de aparafusamento e ter uma geometria que possibilitasse a simulação do efeito do aparafusamento dos castelos empenados nos outros. Tal como as anteriores, estas simulações foram efetuadas em *Explicit Dynamics* e requerem um custo computacional elevado devido ao número de elementos, pelo que foram realizadas simulações usando um *mass scaling* dos

componentes mais elevado. Dado que os desvios mecânicos considerados foram de empeno do SC resultando numa gap de 1 mm e em empeno do SC resultando num overlap de 1 mm, que foram comparados com o modelo sem *warpage*, foi aparafusado o castelo de cada um destes 3 casos. Dito isto, de modo a obter-se uma visão mais completa dos efeitos das features, uma consideração do empeno do Carrier Frame, de ambas as peças, uma combinação de castelos empenados/não empenados e o aparafusamento de todos os castelos do modelo são necessários.

#### 3.4.3.1 Modelo e recolha de resultados

O MODELO ESCOLHIDO FOI APRESENTADO NO CAPÍTULO 2.3 E POSSUI, COMO DITO ANTERIORMENTE, 1 CAVIDADE NO CENTRO E OUTRA EM CADA EXTREMIDADE. O APARAFUSAMENTO DEU-SE NA CAVIDADE CENTRAL, QUE FOI TAMBÉM A QUE SOFREU EMPENO. PARA ESTE EFEITO, FOI MODELADO UM PARAFUSO SEMELHANTE AO PARAFUSO DELTA PT QUE É USADO NAS PEÇAS REAIS (VER ANEXO II – Desenho técnico Parafuso), com a mesma geometria de rosca apta para um aparafusamento com *thread-forming* de material. Na Figura 0.1 pode-se ver representado o parafuso bem como uma vista em corte do mesmo onde se vê a geometria da sua rosca.

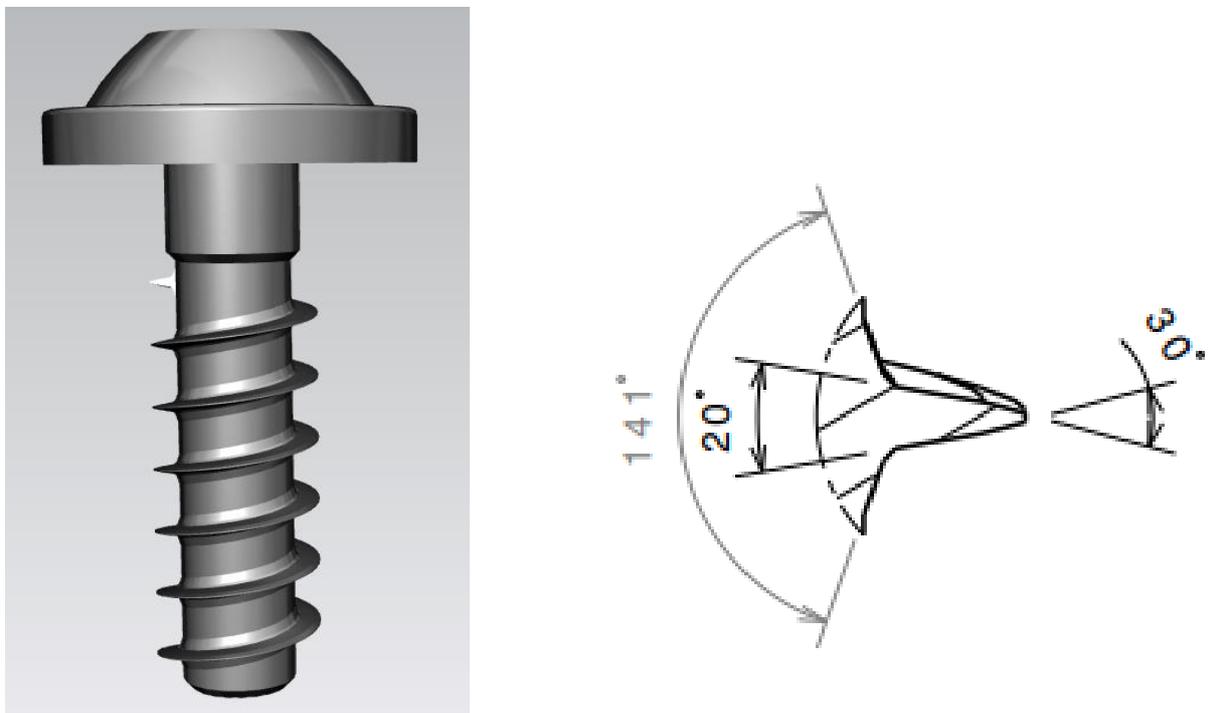


Figura 0.1 Parafuso usado nas simulações. (À esquerda) modelação do parafuso; (à direita) detalhe rosca parafuso

Quanto às suas dimensões gerais, este segue as dimensões do parafuso EJOT Delta PT com tipo de cabeça redonda e anilhada (WN5451), diâmetro de rosca 2,5 mm, comprimento 8,5 mm e passo 0,95 mm.

Para estas segundas simulações a *feature* do castelo cónico foi descartada, pelo que apenas serão simulados os aparafusamentos do modelo sem solução, com protuberâncias e com ribs. Devido à complexidade dos contactos existentes na abertura da rosca e à necessidade de remoção de material, foi de novo escolhido um método explícito para a resolução destes problemas. Na Figura 0.2 está representado o modelo que vai ser usado nas simulações, sendo neste as diferenças entre as várias simulações, a inclusão, ou não, de features, e o empeno do System Carrier.

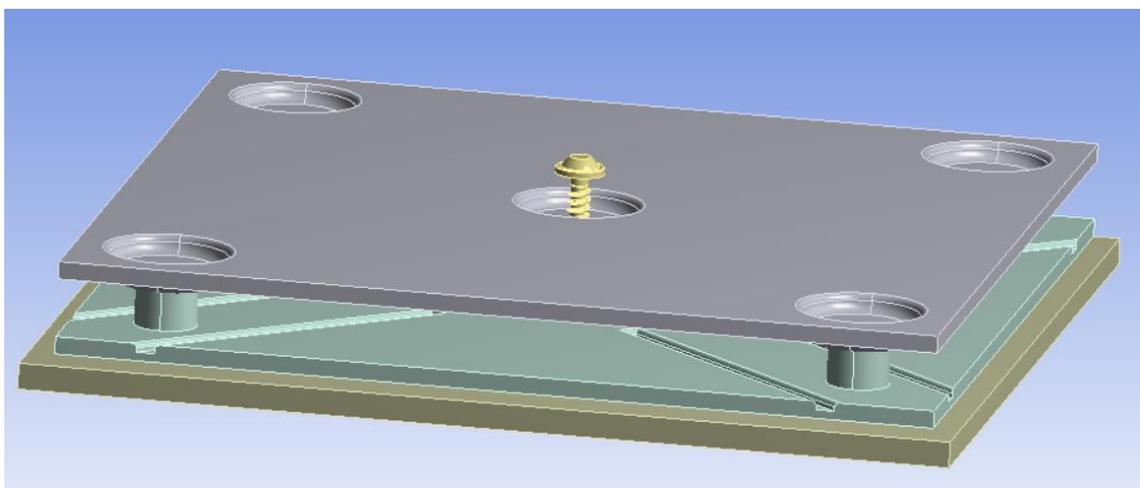


Figura 0.2 Modelo utilizado nas simulações do aparafusamento

Em relação à opção do *body interactions*, foram mantidas as mesmas definições que para a simulação anterior, a das protuberâncias, exceto que neste caso o tipo de contacto é “*frictional*”, com coeficiente de fricção de 0,03.

A posição inicial do parafuso no castelo está indicada na Figura 0.3, e o deslocamento do parafuso será aplicado por *remote displacement*, onde o seu movimento de translação e rotação serão restringidos nos eixos y e z, enquanto no eixo x será aplicada uma rotação e translação de modo que cada volta corresponda a um avanço conforme o passo do parafuso, de 0,95 mm.

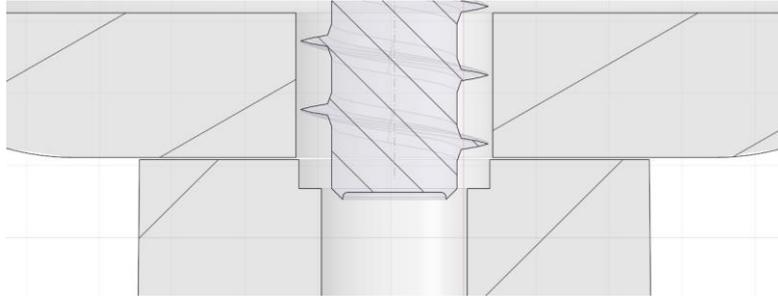


Figura 0.3 Posição inicial do parafuso

Tabela 12 Deslocamento aplicado ao parafuso

Remote Displacement	
X [mm]	= -5,47
Y [mm]	= 0
Z [mm]	= 0
RX [°]	= -2072,84
RY [°]	= 0
RZ [°]	= 0

A aplicação do deslocamento foi dada na face lateral da cabeça do parafuso, como se pode observar pela Figura 0.4, e foram dadas aproximadamente 6 voltas completas que corresponde a um curso do parafuso de 5,47 mm.

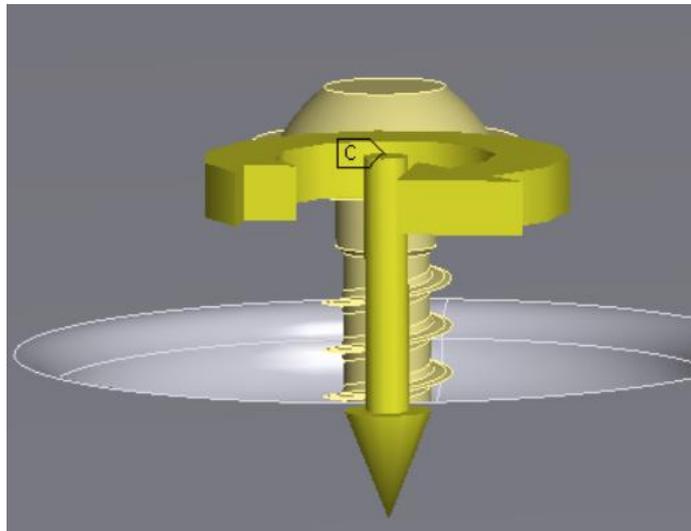


Figura 0.4 Condição de fronteira parafuso

Este deslocamento corresponde a um aperto de + 45° após as faces do *dome* do *System Carrier* e do castelo do *Carrier Frame* encostarem.

Dado que a deformação sofrida pelo parafuso é desprezável e para que a este se possa dar uma malha fina sem prejudicar o tempo de resolução da simulação, foi considerado que o parafuso possui comportamento rígido.

À parte do parafuso, também se acrescentou ao modelo inicial das duas peças uma placa metálica rígida de suporte que vai servir para fazer de apoio à peça a aparafusar, pelo que toda esta será definida como *fixed support*. Na Figura 0.5 estão representados a malha do parafuso e da placa de suporte:

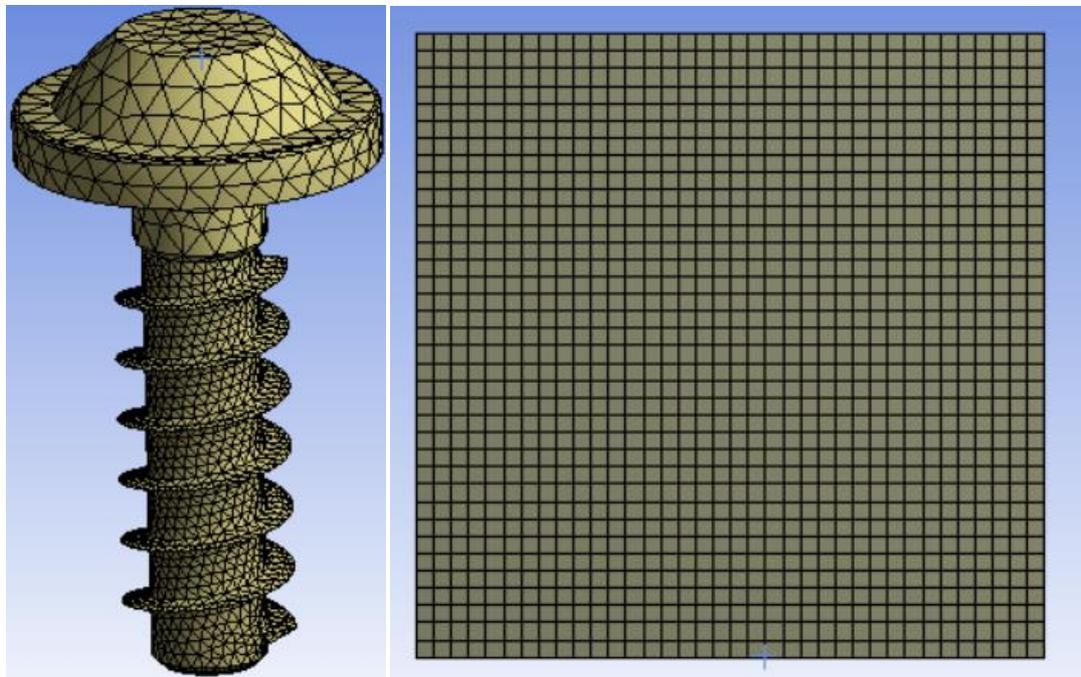


Figura 0.5 (À esquerda) malha do parafuso; (à direita) malha da placa de suporte

No final do aparafusamento, a junta terá o seguinte aspeto, representado na Figura 0.6:

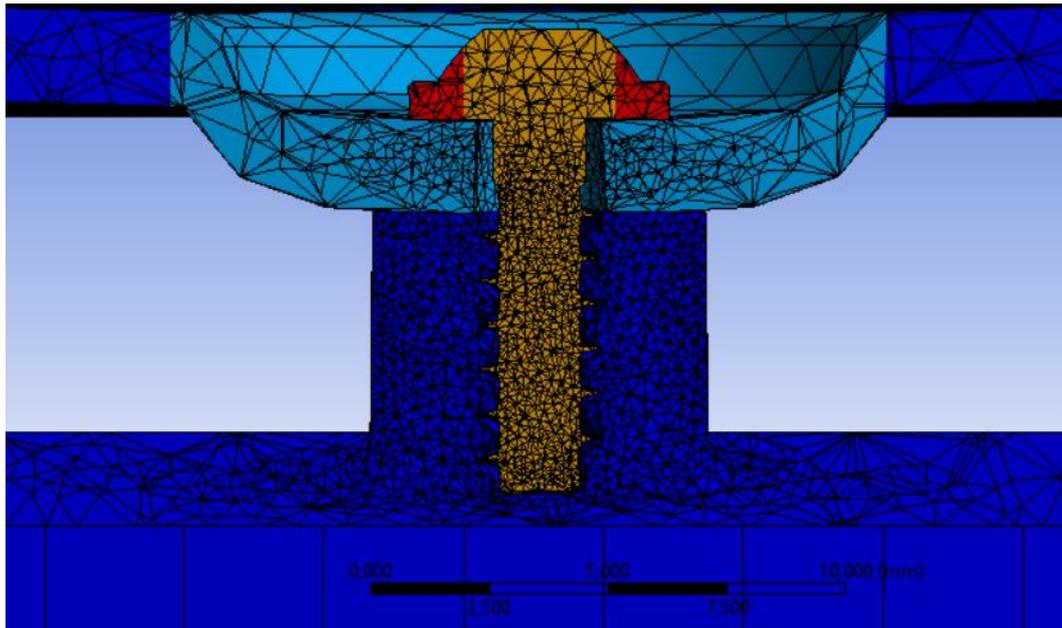


Figura 0.6 Aparência da junta após efetuada a simulação, a cores de deformação realizada.

De forma a obter as soluções pretendidas, foi monitorizada a face inferior do Carrier Frame através da deformação vertical e da tensão de Von Mises, que servirão como um indicador da maior ou menor tensão que seria transmitida ao *display* caso o cluster estivesse montado, como representado na Figura 0.7.

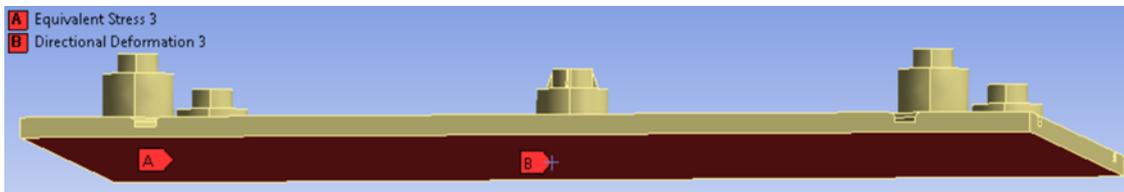


Figura 0.7 Face de recolha de resultados do CF

O tempo final da simulação escolhido para todos os casos foi de 0,0297 s. Nos subcapítulos seguintes serão apresentados os resultados para as simulações às duas *features*, que serão posteriormente comparados com os resultados obtidos para a simulação sem *features*. No subcapítulo 3.4.3.5 serão traçadas as comparações entre os vários modelos.

### 3.4.3.2 Simulação desvios mecânicos

Para que se pudesse perceber o efeito dos desvios dimensionais das peças empenadas no aparafusamento, foi necessário obter geometrias com esses desvios por via de simulação numérica. O empeno das peças foi simulado no Static Structural restringindo o movimento do System Carrier nas suas faces laterais e aplicando um deslocamento de 1 mm na face do

castelo central, no caso de uma simulação da gap, ou na face superior, no caso de uma overlap.

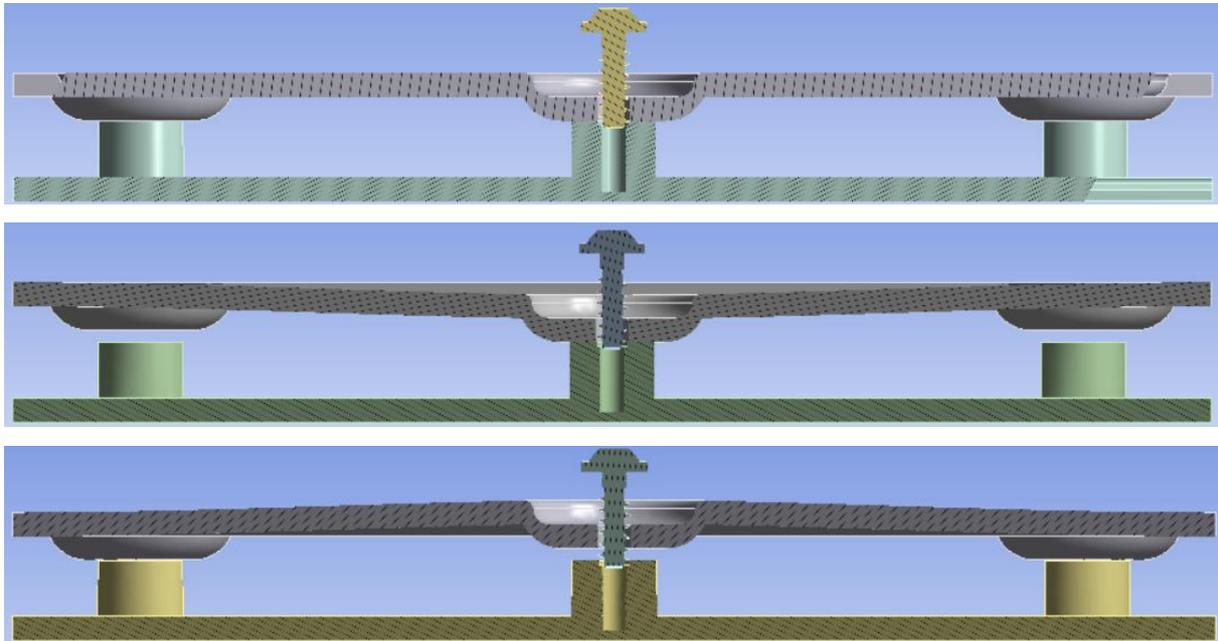


Figura 0.8 (No topo) Modelo sem empenos; (No centro) Modelo com overlap de 1 mm; (Em baixo) Modelo com Gap de 1 mm.

Depois de obtida a geometria, de modo que pudesse ser exportada e usada noutra simulação, ligou-se a solução do sistema a um componente Mechanical Model e depois a outro Geometry, de modo que fosse gerada a geometria com o empeno, e que ligando, a um novo sistema de análise, possa ser feita uma simulação com a geometria deformada, como ilustra a Figura 0.9.

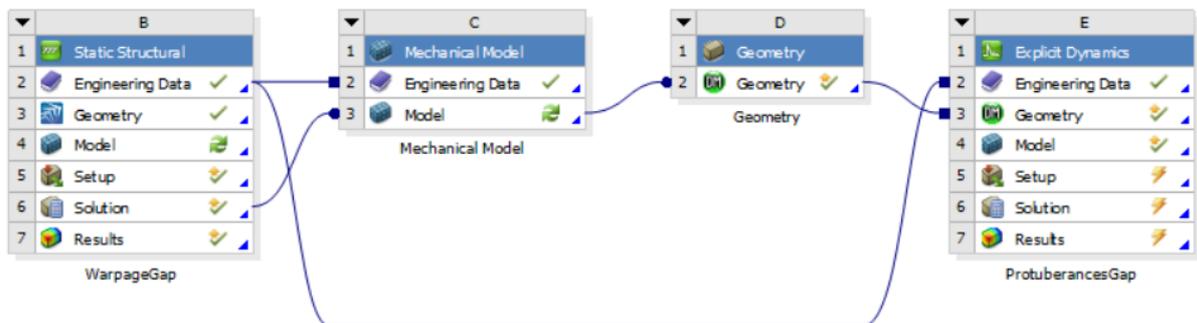


Figura 0.9 Esquema de sistemas de análise usado de modo a usar a geometria deformada nas simulações

### 3.4.3.3 Feature castelo com ribs

Estando os parâmetros da simulação apresentados no 3.4.3.1, neste subcapítulo será feita a apresentação dos resultados para a feature ribs, para os 3 casos de empeno acima indicados. Da simulação efetuada às ribs foram obtidos os resultados mostrados na Figura 0.10 para a deformação máxima na direção x da placa inferior do Carrier Frame:

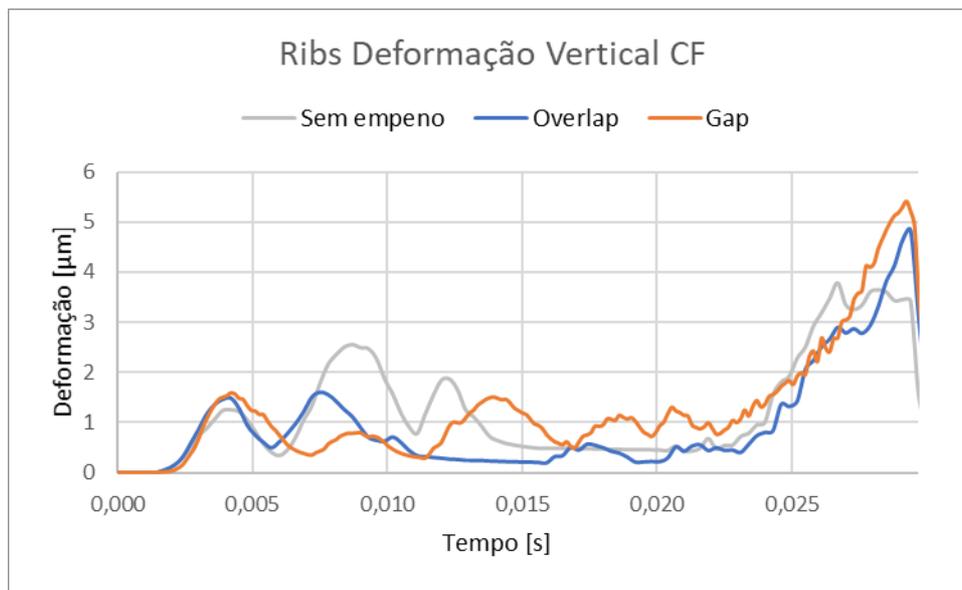


Figura 0.10 Deformação do CF feature Ribs para os casos considerados

Como se pode ver pelo gráfico, começa a haver deformação a partir do momento em que inicia a abertura da rosca pelo parafuso e esta, numa primeira instância, varia de forma aproximadamente cíclica e à medida que o parafuso vai deformando o furo do CF. Assim que se dá o encosto das partes a deformação estabiliza. Verifica-se, depois, para o caso Gap, um ligeiro aumento no momento em que o parafuso encosta ao SC (0,0186s). Finalmente, verifica-se que existe uma grande alteração da deformação quando o cabeça do parafuso encosta no System Carrier e começa a empurrar as duas peças uma contra a outra (~0,023 s) e verifica-se uma descida brusca da deformação no momento em que a *feature* é totalmente deformada e as duas peças se tocam (~0,0293 s).

Em relação à tensão gerada nessa face durante o aparafusamento, os resultados encontram-se na Figura 0.11:

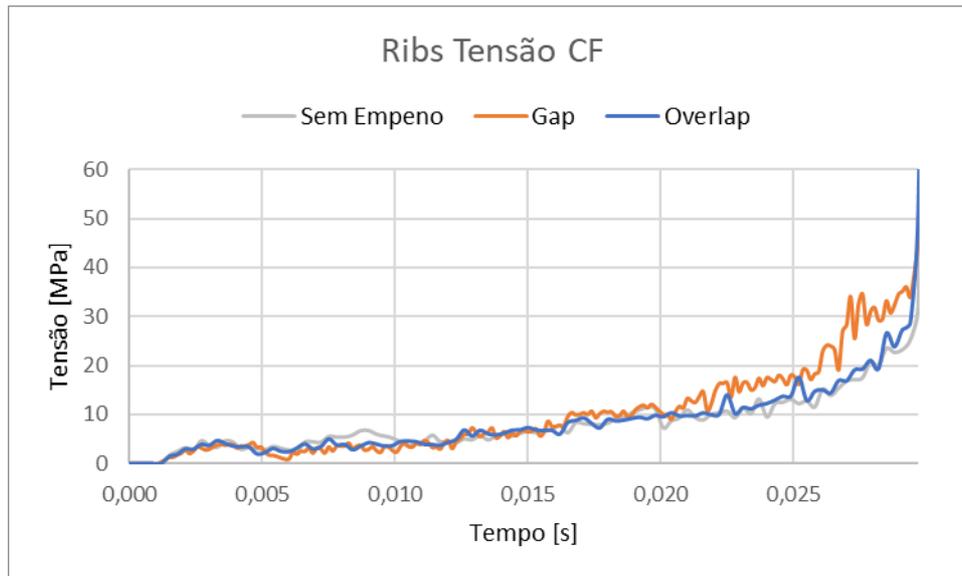


Figura 0.11 Tensão no CF feature Ribs para os casos considerados

No geral, continua a existir um aumento do declive quando se dá o encosto da cabeça do parafuso para as features *ribs* que é mais acentuado no caso onde existe empeno do castelo central. Quando as duas peças encostam totalmente, aumenta o seu valor na ordem das dezenas. Mas o fundamental é que houve uma diferença significativa entre os 3 casos, e os valores mais altos foram atingidos no caso Gap. Isto será por não haver contacto inicialmente entre o CF e o SC e, por isso, aumentar a tensão no CF por tração do parafuso, como se experiencia no caso real de aparafusamento.

### 3.4.3.4 Feature protuberâncias

Os resultados para a deformação máxima na direção x são mostrados na Figura 0.12:

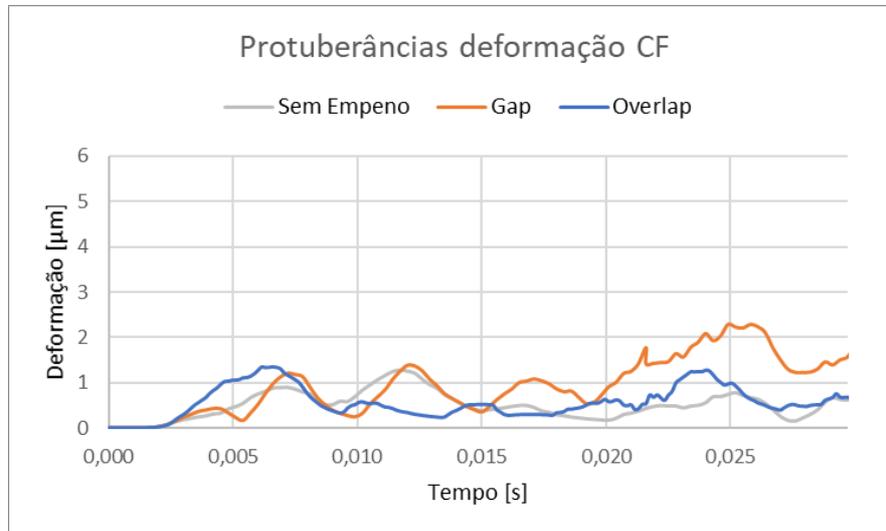


Figura 0.12 Deformação do CF feature Protuberâncias para os casos considerados

No caso da *feature* protuberâncias observa-se uma subida da deformação quando estas começam a ser esmagadas ( $\sim 0,023$  s), no entanto não chegando a valores de deformação tão altos como no caso *ribs*, e a uma descida acentuada quando já se deformaram 1 mm ( $\sim 0,026$  s), momento em que as cristas tocam no dome e castelo das peças.

Para os valores de tensão, estes encontram-se na Figura 0.13:

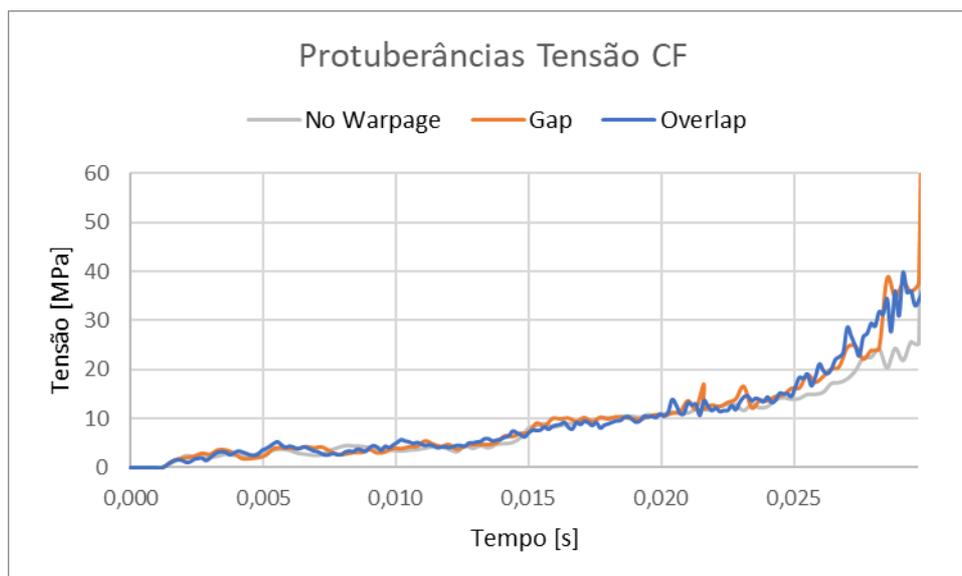


Figura 0.13 Tensão no CF feature Protuberâncias para os casos considerados

Pode-se observar pelo gráfico uma grande uniformidade dos resultados, indicando que esta solução amortece melhor a deformação do SC até que os dois castelos se toquem.

### 3.4.3.5 Análise de resultados

Comparando os valores da deformação das duas features com os das peças sem features, obtemos:

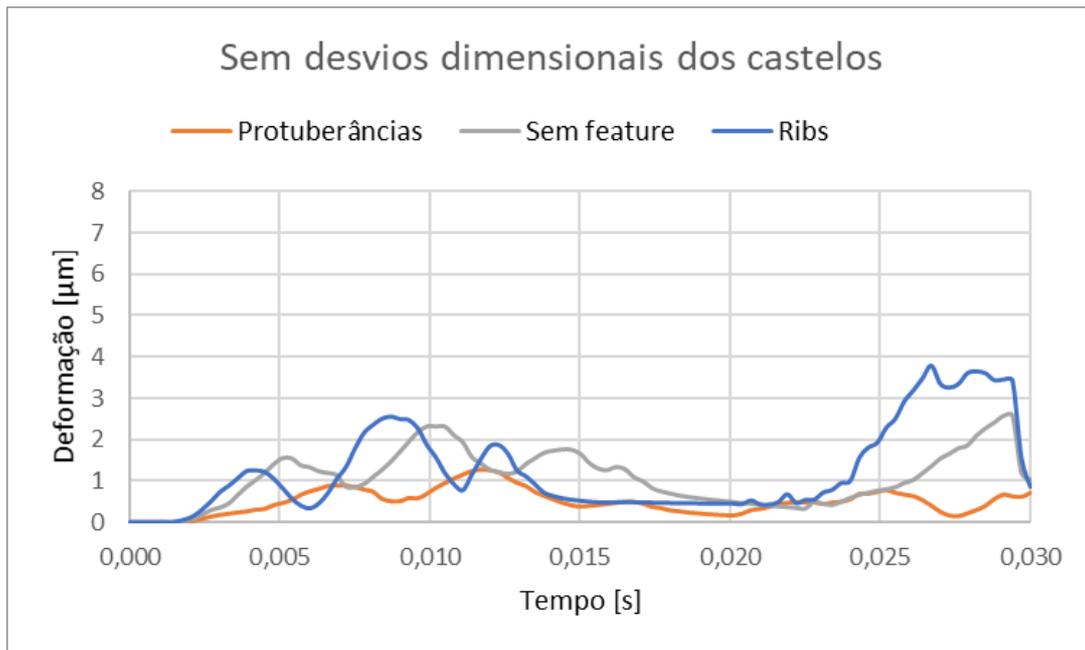


Figura 0.14 Comparação valores deformação – sem empeno

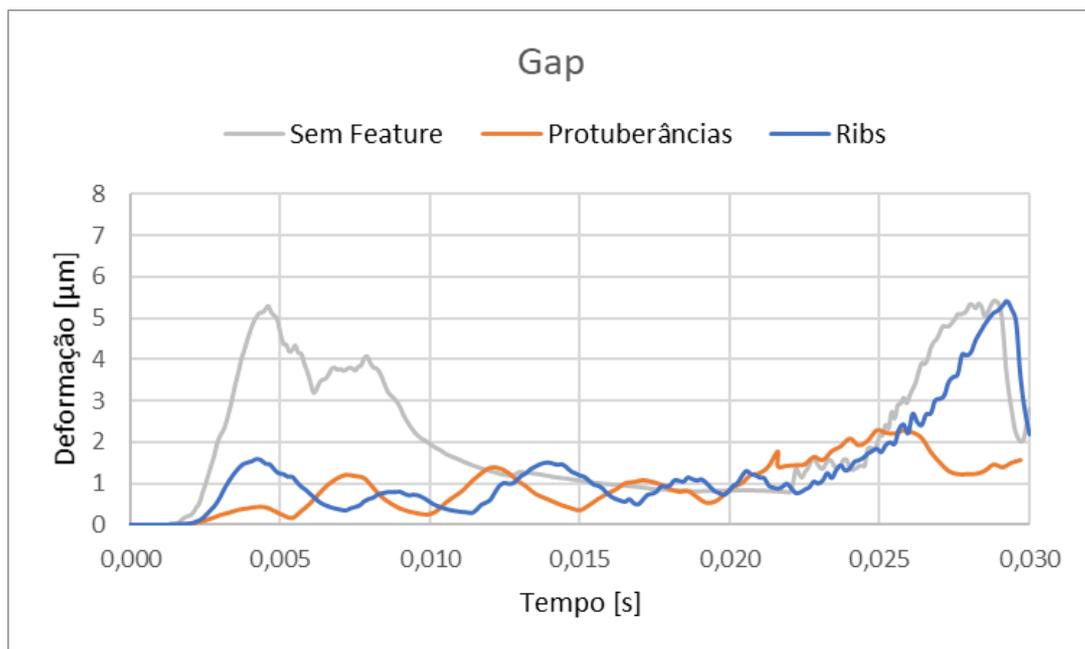


Figura 0.15 Comparação valores deformação – Gap

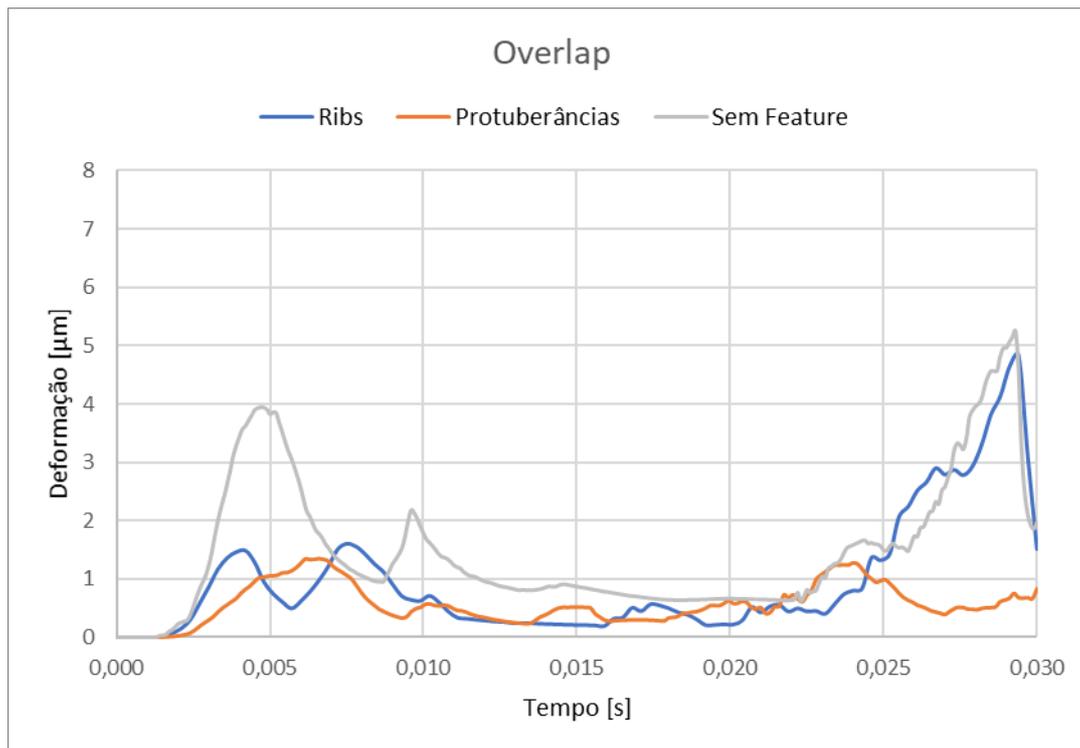
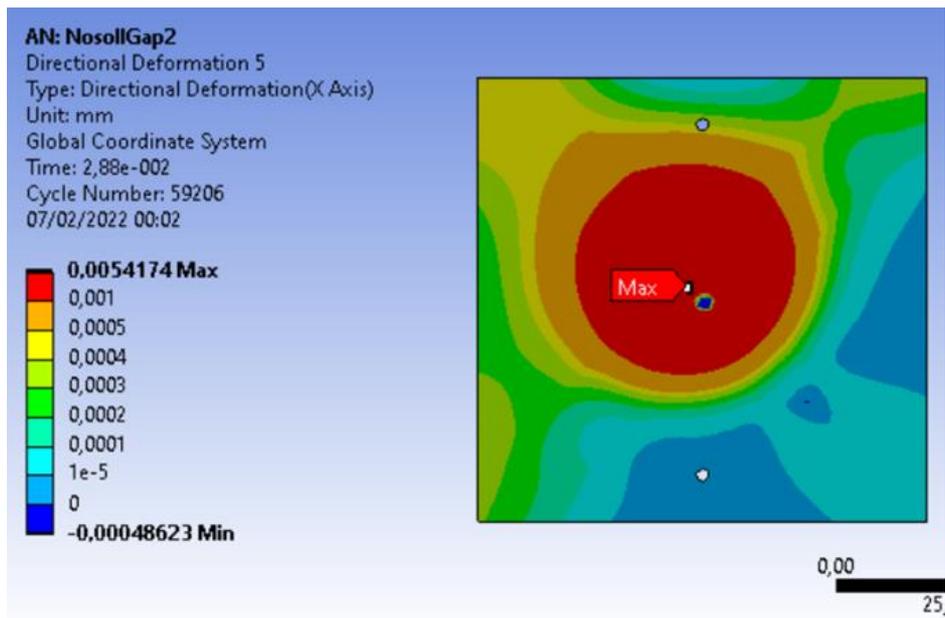


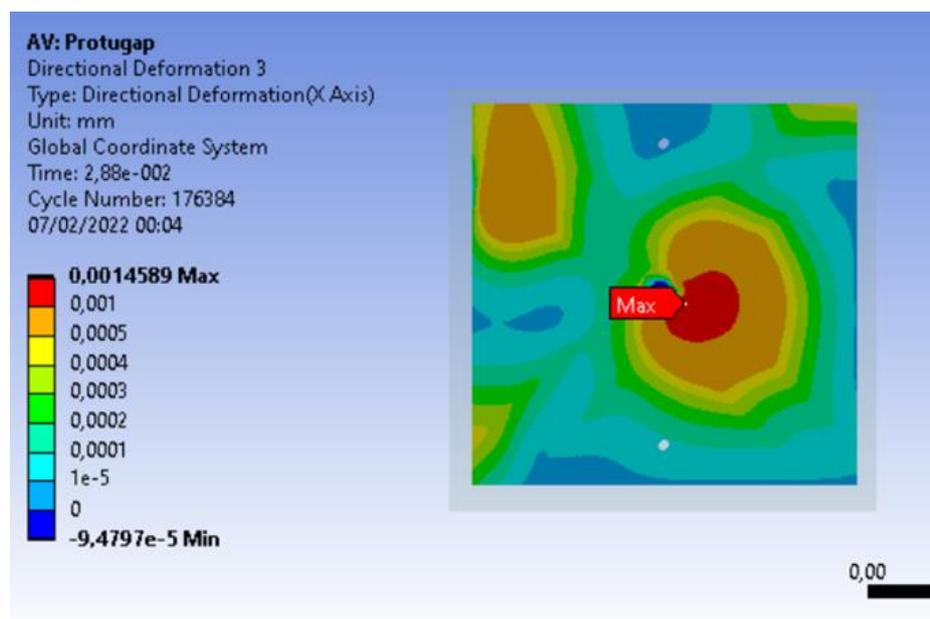
Figura 0.16 Comparação valores deformação – Overlap

Analisando os gráficos representados na Figura 0.14, Figura 0.15, Figura 0.16, como é esperado, no aparafusamento com as *features* o ponto de encosto da cabeça do parafuso dar-se-ia mais cedo e por isso a gap seria ultrapassada numa fase mais inicial do aparafusamento. Isto leva a que o aumento do declive da deformação se dê também mais cedo e, como se pode ver pela Figura 0.16 no caso da feature protuberâncias, não gera uma deformação tão elevada. Após haver o contacto com as *features* (~0,023 s), o resto do aparafusamento passa a ser suportado pelos prismas nas duas faces, isto é, a deformação que ocorreria na base do *Carrier Frame* e conseqüentemente no *display* é usada nas *features*. Isto demonstra que a incorporação das *features* nas peças reais levaria à redução da percentagem de tensão propagada à zona de contacto do CF com o *display*, o que teria um efeito altamente benéfico no BU.

Nos casos onde as peças sofreram empeno, pode-se observar que o CF sofre uma maior deformação no caso onde não existe feature. A Figura 0.17 e Figura 0.18 ilustram a deformação da peça na direção  $x$ , perpendicular à face inferior do CF representada nas figuras, comparando os casos sem feature e com a feature das protuberâncias quando existe um gap de 1 mm entre as duas peças:



*Figura 0.17 Deformação na face do CF sem Feature caso Gap*



*Figura 0.18 Deformação Gap Feature Protuberâncias*

Como se pode ver pelas figuras, a presença das protuberâncias leva a uma redução de cerca de 73% na deformação máxima na base do CF.

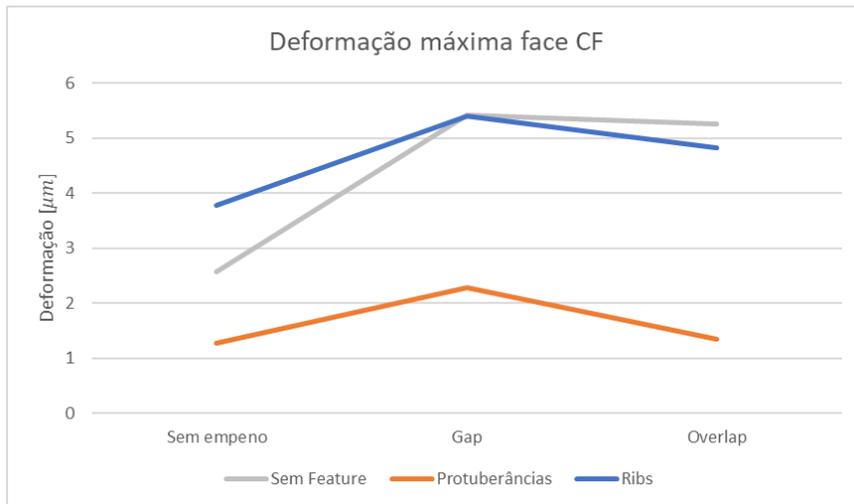


Figura 0.19 Comparação valores de deformação máxima

Comparando também os valores da tensão obtidos para os vários casos, apresentados nas figuras Figura 0.20, Figura 0.21 e Figura 0.22:

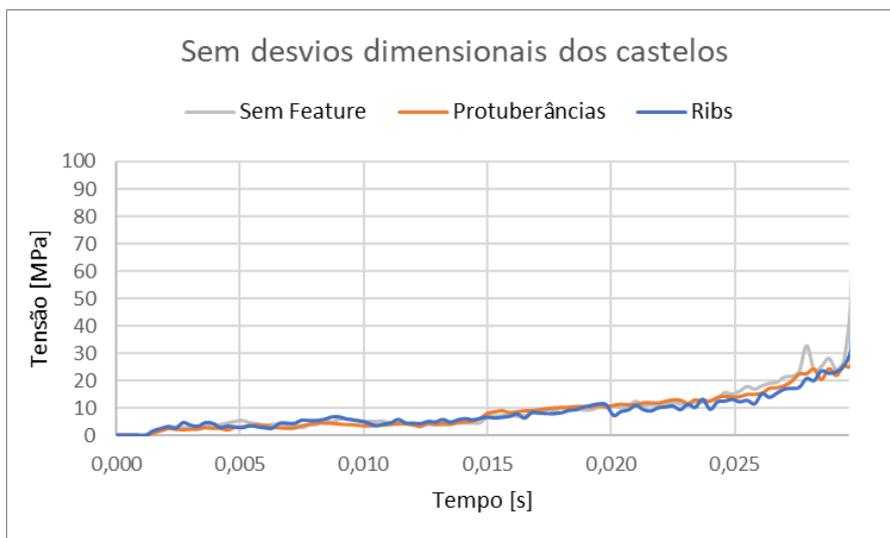


Figura 0.20 Comparação valores tensão- Sem Empeno

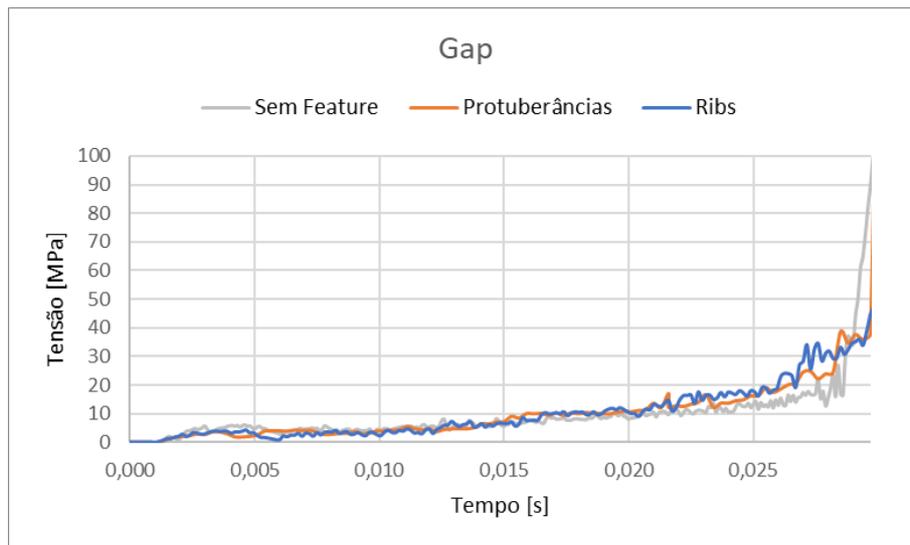


Figura 0.21 Comparação valores tensão- Gap

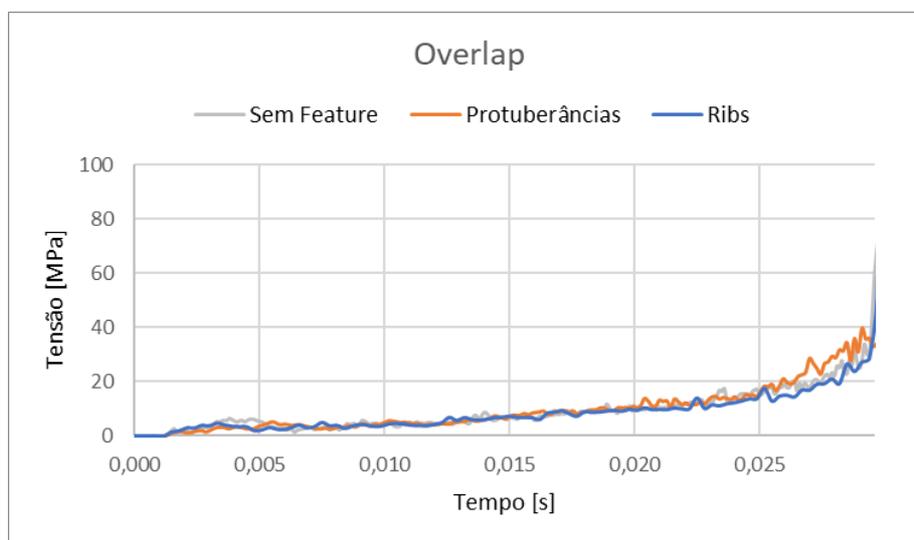


Figura 0.22 Comparação valores tensão- Overlap

Assim como no caso do perfil de deformação, no caso da tensão, quando as duas peças começam a ser empurradas uma contra a outra pelo parafuso observa-se um aumento mais acentuado da tensão. Nos casos sem empenos não existe praticamente diferença nos valores de tensão. No caso sem feature este encosto é mais tardio e, como é possível constatar pela Figura 0.21 e Figura 0.22, gera um aumento mais acentuado, e que começa mais cedo, da tensão nos casos de desvio dimensional. É de destacar o caso Gap sem *feature*, Figura 0.21, onde se torna bastante evidente o aumento da solicitação no CF na fase final do

aparafusamento, correspondente à aproximação dos dois castelos das duas peças pelo parafuso.

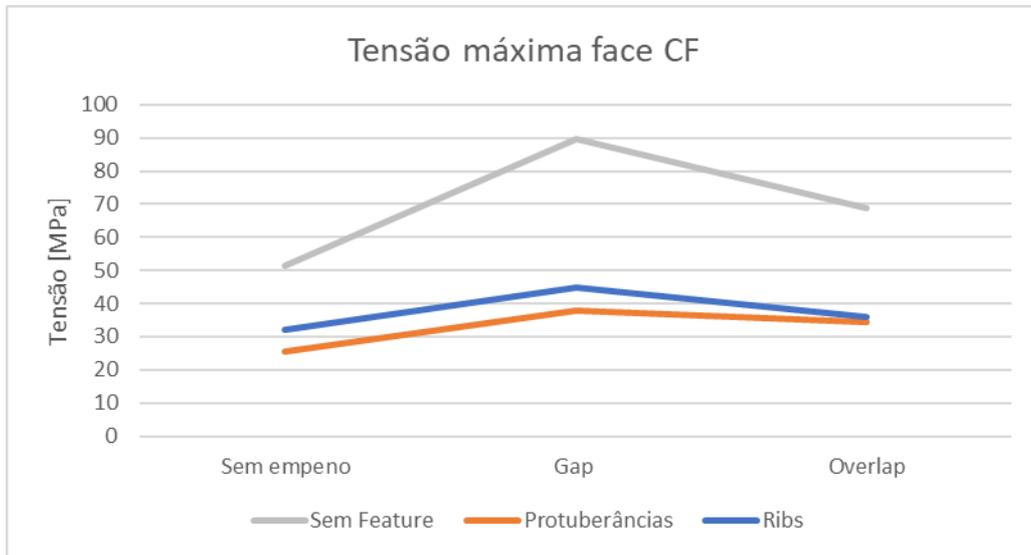


Figura 0.23 Comparação valores tensão máxima

Na Figura 0.23, está representada a comparação da tensão máxima para as simulações efetuadas. As *features* permitem uma redução da tensão na face inferior do CF e, como se pode observar também, não geram um aumento significativo da tensão no caso sem empeno, apesar de levarem a um ligeiro aumento da tensão no resto da face do CF. Como se pode comprovar pela Figura 0.24 e Figura 0.25, a tensão média na base do CF no caso das protuberâncias é menor, bem como a tensão máxima que se situa em aproximadamente 42% da tensão do caso sem *Feature*. Assim, verifica-se que a força necessária à deformação das *features* é suficiente para contrariar a transmissão das forças de aperto à face inferior do CF, visto que a sua atuação da força de aperto passa a ser residual.

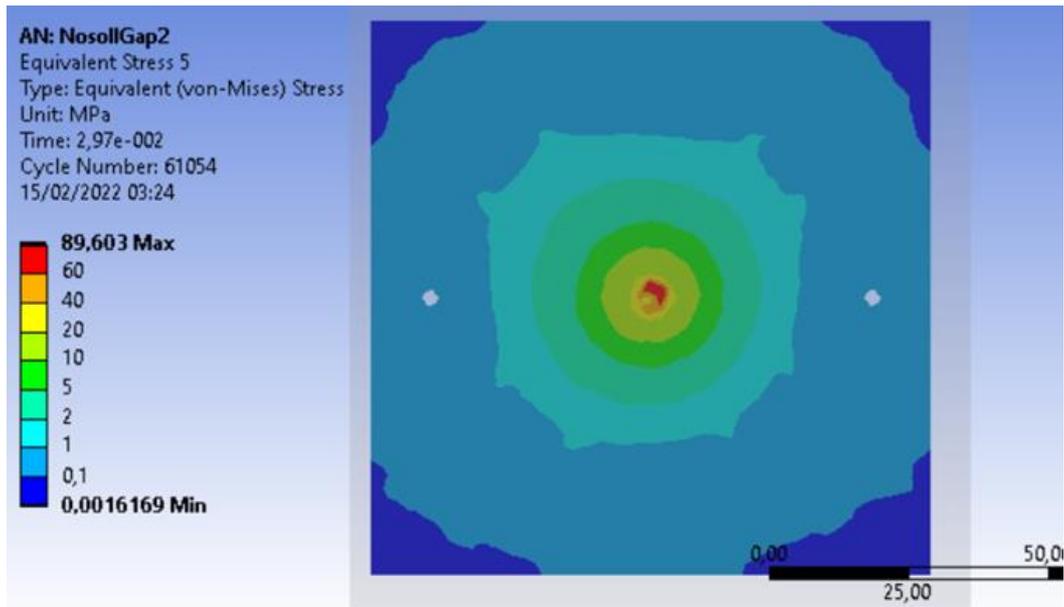


Figura 0.24 Tensão face CF sem feature e Gap 1 mm

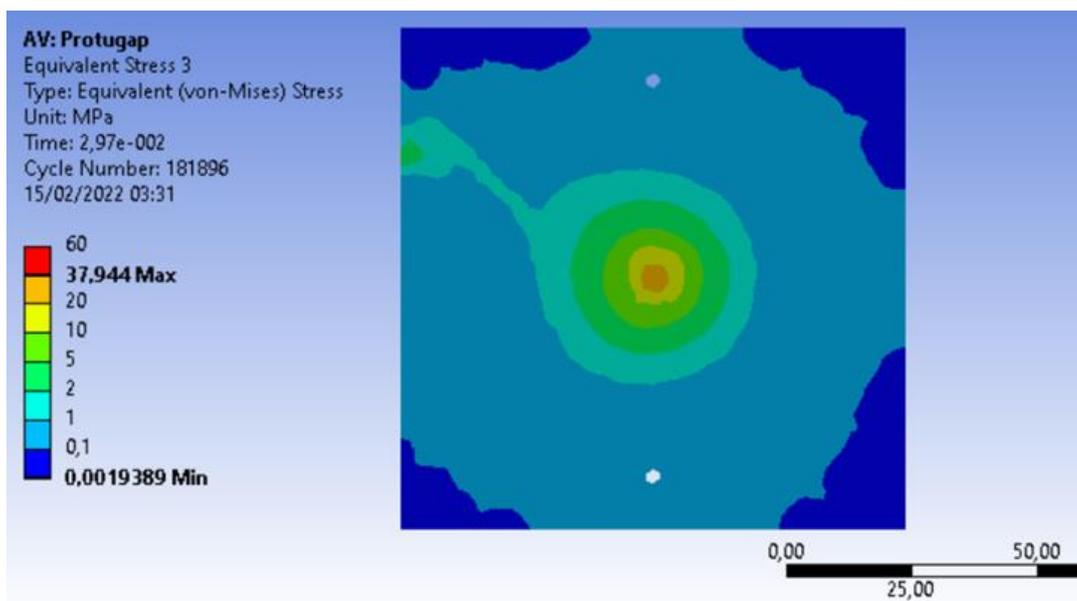


Figura 0.25 Tensão feature protuberâncias e Gap 1 mm

### 3.5 Sumário

Neste capítulo foi mostrado o método utilizado para a resolução das várias simulações, considerações feitas em relação a materiais, geometria envolvida, apresentação e análise de resultados. No que toca às simulações da deformação local, obtiveram-se resultados que demonstram que duas das *features* estudadas necessitam de uma força para serem

deformadas que se ajusta à força de clamp pretendida de 300 N no aparafusamento dos componentes. Como foi dito anteriormente, as vantagens disto são:

- Alteração da curva de aparafusamento o suficiente para criar uma zona de declive, Figura 3.5, que permita saber quando as peças estão em contacto (Seating Torque);
- A deformação das *features* não leva a um aumento substancial da força de aperto.
- Redução do offset-torque aplicado e assim da força de aperto exercida.

É possível concluir também que existe uma diferença entre o aparafusamento sem *feature* e com *features* ao nível da tensão e deformação que são propagadas ao CF. O aumento da altura dos castelos pela *feature* leva a que a gap seja superada mais cedo e o seu efeito não é sentido nas tensões e deformações no *display*, e o aparafusamento na altura da deformação das *features* oferece um aumento da deformação e tensão mais controlado. Da análise conceptual e numérica efetuada às *features*, pôde-se concluir que as protuberâncias são o conceito mais vantajoso para ser tornado protótipo, não só pelos resultados satisfatórios obtidos numericamente, mas também por ser um conceito que não depende em tão larga medida da tolerância entre as peças como os outros dois, que dependem da tolerância entre o furo no SC e o cone do castelo, são de mais fácil aplicação nos componentes e poderiam ser produzidos com diferentes alturas, recorrendo a posições no molde, para compensar empenos recorrentes de alguma cavidade de aparafusamento.

## 4 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Foi desenvolvido um protótipo das peças para que estas fossem aparafusadas. Neste capítulo serão discutidos os materiais com que esse protótipo foi fabricado, o seu modelo e a estrutura de suporte que permitiu que este fosse aparafusado.

### 4.1 Materiais Escolhidos para o Protótipo

Devido ao método de fabrico das peças originais, moldação por injeção, não foi possível dispor de um molde para fabricar os protótipos por este método. Por isso, foi escolhido um método de fabrico aditivo para a obtenção das peças, pela sua rapidez de produção e facilidade de preparação. Dado que os materiais das peças originais possuem uma grande percentagem de fibra de vidro, estes são bastante rígidos, frágeis e apresentam módulos de elasticidade elevados, na ordem dos 10-20 GPa. Como não é possível chegar a estes valores pela tecnologia de fabrico aditivo, procurou-se usar materiais que tivessem uma relação entre módulos de flexão e compressão parecidos aos dos materiais reais com uma deformação à rotura também semelhante. Após uma pesquisa, encontrou-se o Policarbonato (PC) e o ABS, ambos de uso frequente em impressão 3D e que cumpriam os critérios atrás especificados. (Propriedades dos materiais no ANEXO III – Propriedades Materiais).

Existiram, no entanto, problemas em relação à precisão necessária à produção das peças que obrigaram a que estas fossem produzidas por SLS, ou sinterização a laser seletiva, mais adequada ao fabrico de protótipos funcionais com melhores propriedades mecânicas. Por conseguinte, as peças foram produzidas em PA2200 ou poliamida 12, que possui uma boa resistência mecânica e rigidez, boa resistência química e serve muitas vezes para substituição de peças fabricadas por moldação por injeção [95].

Algumas das suas propriedades estão representadas na Tabela 13:

*Tabela 13 Propriedades material PA2200*

Densidade [Kg/m <sup>3</sup> ]	930
Módulo de Flexão [MPa]	1500
Tensão de rotura à flexão [MPa]	58
Módulo de compressão [MPa]	1300
Tensão de rotura à compressão [Mpa]	60

Apesar da tecnologia escolhida para o fabrico das peças ser uma excelente tecnologia para protótipos funcionais, não foi possível obter peças com a geometria da *feature* pretendida. Em vez de possuírem uma forma triangular, como demonstra a Figura 3.38, estas foram produzidas com forma de prisma quadrangular. Foi feita a sua medição e, apesar da mudança de geometria, possuíam a mesma altura de 1 mm e 0,5 mm de lado.

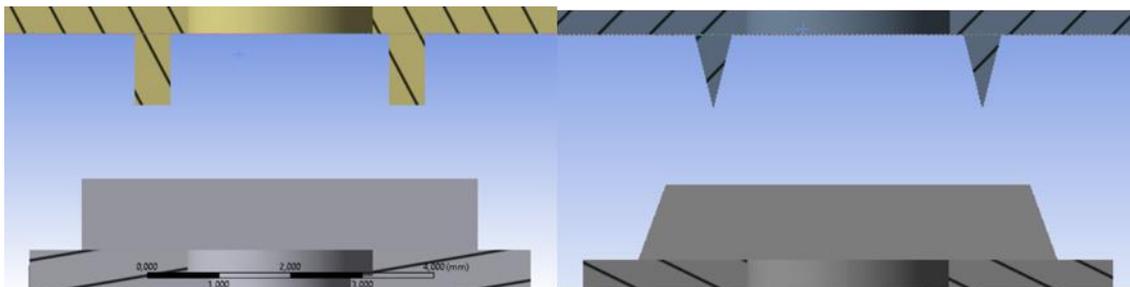


Figura 4.1 (À Esquerda) Geometria peças impressas; (À Direita) Geometria peças modeladas Figura 3.38

## 4.2 Modelo Protótipo

Como se pôde concluir pela análise de resultados das simulações numéricas, descritas no subcapítulo 3.4.3, a *feature* protuberâncias foi a que melhor pode absorver o efeito do empeno do System Carrier, pelo que foram a escolhida para incorporar nos protótipos.

Os protótipos são constituídos por 2 casos de estudo. O objetivo será prever como a posição do aparafusamento, as protuberâncias e o apoio dos outros castelos afetam o perfil da curva de aparafusamento, as forças de aperto exercidas e as deformações existentes na face inferior do Carrier Frame. Posto isto, os casos considerados são os seguintes:

- Peças sem features e gap de 1 mm entre o castelo central do SC e do CF;
- Peças com features e gap de 1 mm entre o castelo central do SC e do CF.

## 4.3 Ferramenta de Ensaio Experimental

De modo a servir de suporte para permitir o aparafusamento e criar uma forma de fazer medições com os comparadores na peça, foi desenhada uma estrutura de suporte para o aparafusamento, cuja modelação está representada na Figura 4.2:

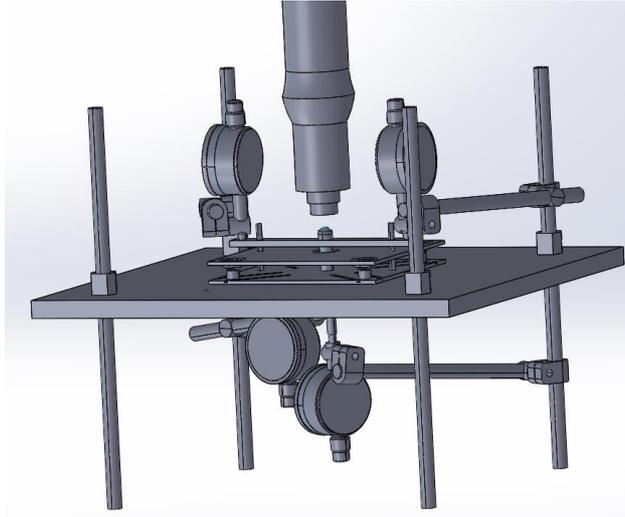


Figura 4.2 Modelo CAD da estrutura de suporte com representação dos comparadores montados e da aparafusadora

As hastes laterais foram desenhadas de modo a possibilitarem, com o auxílio de um sistema de *clamp* do comparador, a sua colocação em qualquer uma das 5 cavidades das peças. A placa de suporte possui 5 orifícios onde se encontram os castelos do Carrier Frame de modo que a ponta do comparador possa estar em contacto com a peça, como é possível observar pela Figura 4.3.

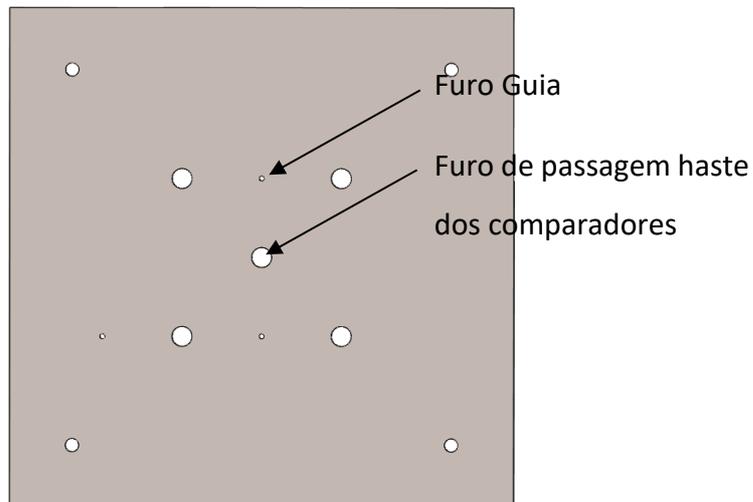


Figura 4.3 Placa de suporte utilizada

Possui também, outros 3 orifícios que servem para colocar a guia nas posições aparafusamento central e aparafusamento lateral. Esta guia serve para assegurar o movimento vertical de uma placa metálica que permite que os comparadores meçam a deformação na cavidade central do lado do SC. Para medir a força de aperto foi usada uma célula de carga que está colocada como representado na Figura 4.4.

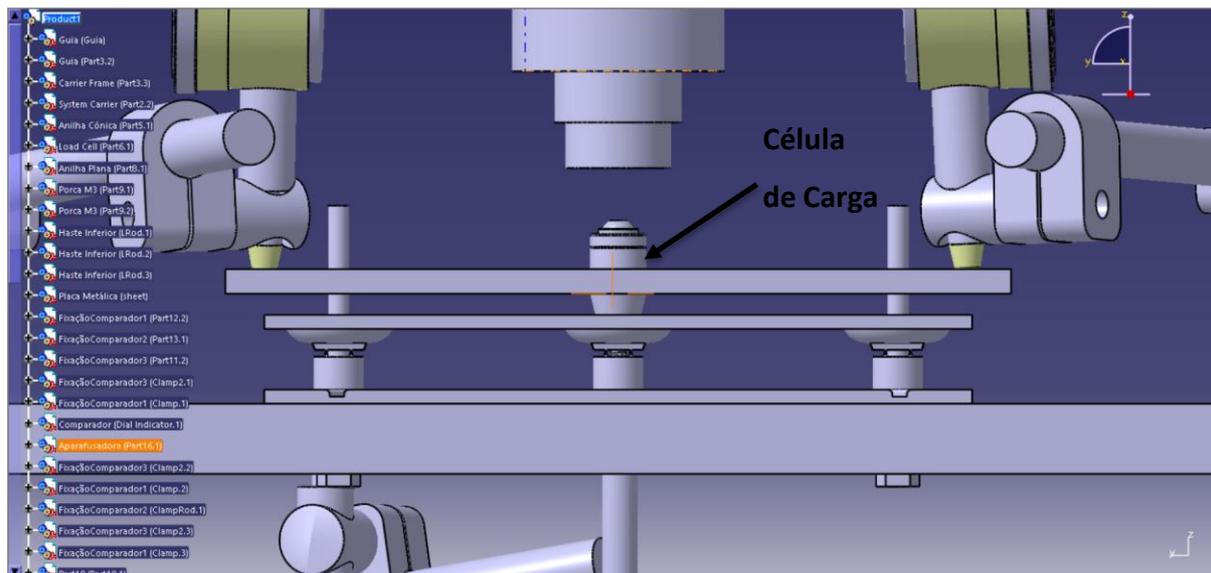


Figura 4.4 Vista em detalha da montagem do protótipo para efetuar os aparafusamentos

Encontra-se entre esta uma anilha metálica da parte de cima, em contacto com a cabeça do parafuso, e outra anilha na parte de baixo, em contacto com a placa metálica. Entre a placa metálica e a peça existe ainda uma anilha cônica para que o diâmetro de contacto com a peça seja o da cabeça do parafuso. O desenho individual de cada componente, bem como o desenho em conjunto da ferramenta, podem ser visualizados no ANEXO IV – Desenhos Técnicos Ferramenta Ensaio Experimental.

## 4.4 Ensaio Experimental

Neste subcapítulo será tratada a fase de testes ao protótipo, o procedimento do aparafusamento, parâmetros de aparafusamento, variáveis que foram medidas, forma de medição e, por fim, análise de resultados.

### 4.4.1 Protocolo de Ensaios

Os testes realizados aos protótipos tiveram como finalidade avaliar o efeito das features na curva de aparafusamento das peças, na força de aperto produzida e na deformação provocada na face inferior do Carrier Frame. Para esse efeito, foram usados os seguintes equipamentos/ferramentas:

- Uma aparafusadora da marca Atlas Copco do modelo ETF MT 80 400 A que permite aparafusar com binários entre 8 N.cm e 80 N.cm
- O software Tool Talks MT, para o controlo da aparafusadora através do PC.
- Uma célula de carga Kistler SLimLine 9130B que possibilita a medição de forças entre 0 e 3 KN juntamente com um amplificador de carga ICAM 5073A que converte a carga numa tensão elétrica de baixa impedância e possui uma entrada para um cabo RS-232C que permite a interface com o PC
- O software Manuware, que serve para gerir as medições e canais utilizados pela célula de carga.
- 3 comparadores da marca Mitutoyo e modelo 2046F, com graduação de 0,01 mm, capacidade de 10 mm e precisão de 13  $\mu\text{m}$ .
- 3 suportes para comparadores e 1 rodapé.

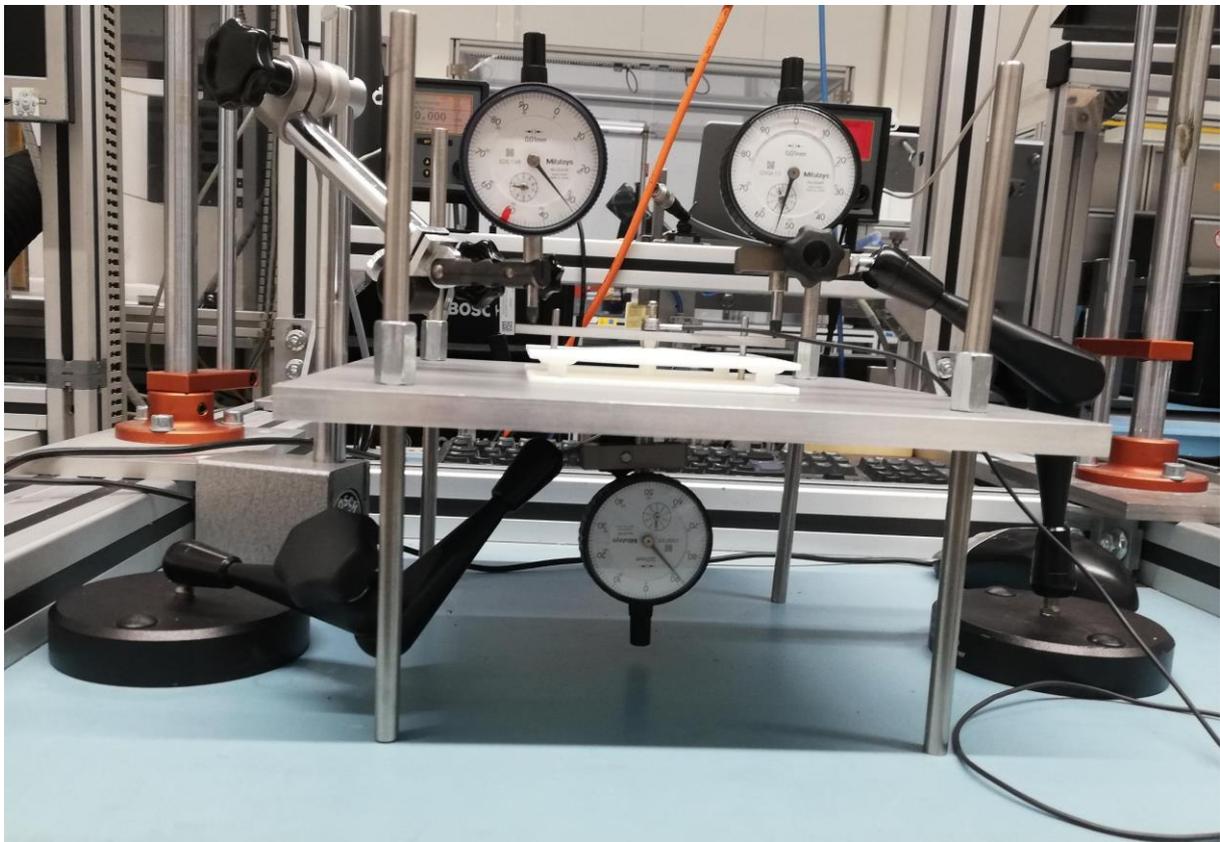
### 4.4.2 Parâmetros de aparafusamento

Dado que os materiais utilizados para os protótipos foram distintos dos das peças reais, decidiu-se não usar os parâmetros reais de aparafusamento por evitar a possibilidade de colapso das peças. Para estimar outros parâmetros, foi usado uma aplicação da EJOT chamada EJOT DELTA Calc que permite, a partir das dimensões da junta, furo e materiais, calcular um *Seating Torque* e um *Clamping Torque* (ANEXO V – Recomendações Aparafusamento). Foi calculado um binário de “assentamento” de 0.21 Nm e um binário de aperto de 0,42 Nm. Tendo em conta também os materiais, foi usada uma velocidade de 300 rpm para o aparafusamento, em vez da velocidade normalmente utilizada de 500 rpm. No ANEXO VI –

Parâmetros de Aparafusamento podem ser vistos os parâmetros de aparafusamento no programa Tool Talks MT.

#### 4.4.3 Medição

Antes de serem efetuados os testes, foram verificadas as dimensões das peças, nomeadamente se os desvios dimensionais dos castelos que estão a ser estudados cumpriam com o pedido efetuado. Após essa primeira preparação, procedeu-se à montagem do suporte e à colocação da primeira peça a ser testada, que no final ficou com o aspeto mostrado na Figura 4.5:



*Figura 4.5 Foto do protótipo montado*

Como se pode verificar pela figura, o objetivo seria medir os deslocamentos na face superior a partir dos comparadores no topo apoiados sobre a placa metálica, enquanto o separador debaixo do suporte mediria a deformação causada pelo aparafusamento no CF, neste caso por baixo do castelo central. No entanto, devido a uma pega que a aparafusadora utilizada possuía, não permitiu foi possível colocar um dos comparadores laterais quando se efetuou o aparafusamento, o que impediu a sua utilização.

#### 4.5 Análise de Resultados

Como foi referido no subcapítulo anterior, os resultados foram medidos recorrendo a comparadores, célula de carga e à aparafusadora. Observando os gráficos da figura Figura 4.6 e Figura 4.7 para os ensaios sem feature e com feature, pode-se verificar que a introdução das protuberâncias leva à suavização do declive da curva binário-ângulo do aparafusamento. Isto deve-se à adição da nova zona onde existe a deformação da *feature*.

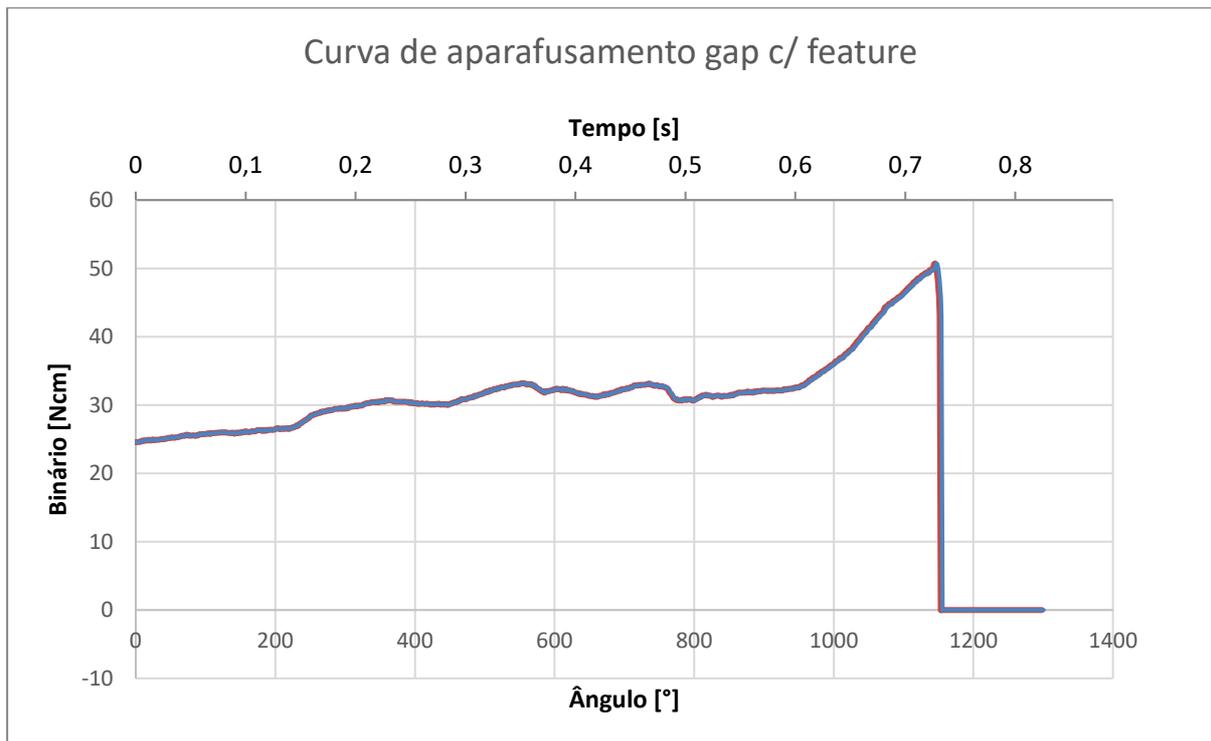


Figura 4.6 Curva de aparafusamento para o caso com feature e gap de 1 mm.

Como se esperava deste tipo de aparafusamento, o binário vai subindo com o ângulo à medida que a rosca está a ser aberta até pouco antes da zona de encosto da cabeça do parafuso com a *near plate*, o *System Carrier*, onde depois começa o aperto das duas placas da junta.

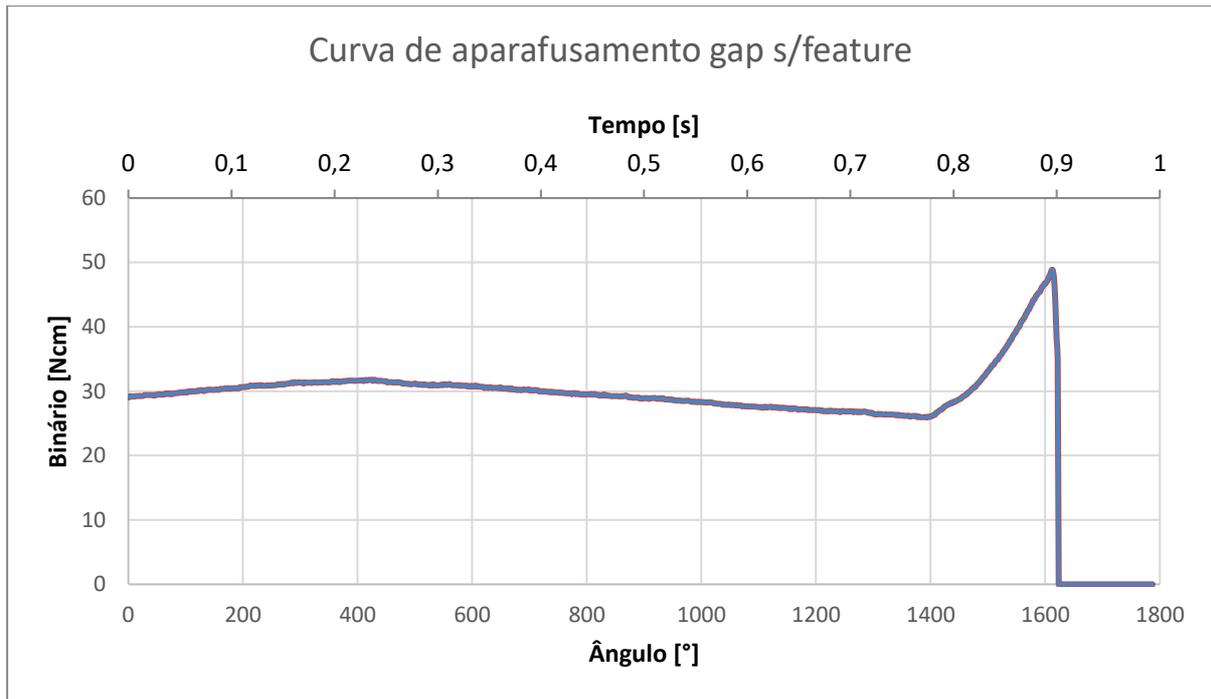


Figura 4.7 Curva de aparafusamento para o caso sem feature e gap de 1 mm

Na Figura 4.8 está representado o enquadramento dos dois gráficos na zona de aperto. O ponto onde se inicia o aperto corresponde e será acompanhado por uma subida do binário até que as faces das peças encostam e prossegue o aperto continuando a subida acentuada do binário e com um aumento da força de aperto. Pode observar-se que a curva de aparafusamento das features apresenta maior declive. Isto deve-se ao facto de, no seu aparafusamento, para além da deformada do *System Carrier*, também se estão a deformar os prismas, o que causa também um perfil menos acentuado. Esta característica do aparafusamento com as *features* é vantajosa pois permite que, ao ser o aparafusamento controlado por um algoritmo de aparafusamento com controlo de binário, seria possível obter uma indicação mais precisa de quando as peças estão em contacto e que a deteção do ponto de encosto da cabeça do parafuso seja facilitada e possa ser aplicado um *offset torque* mais baixo às peças e reduzindo assim a força de aperto em jogo. Atualmente, no aparafusamento de juntas com folga não é possível prever pelo algoritmo quando as peças entram realmente em contacto, pelo brusco aumento de binário que ocorre quando as peças começam a ser movidas pelo parafuso. Isto leva a que se tenha de aplicar um *offset torque* mais alto do que o recomendado para que seja garantido o contacto entre as peças no final do aparafusamento. Naturalmente, a utilização de um binário mais elevado leva ao aumento da força de aperto das peças e da propagação de tensões ao *display*.

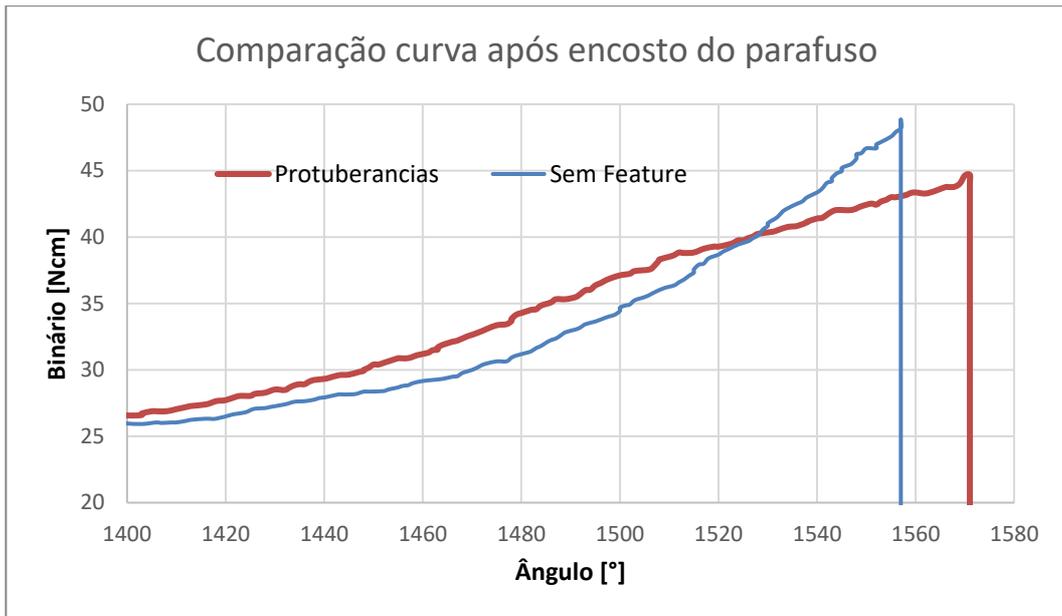


Figura 4.8 Comparação da zona de aperto para os dois casos

Em relação à força de aperto, os resultados obtidos foram guardados em fotografia tiradas aos gráficos no software Manuware, dado que não existia a opção de exportar os resultados, e posteriormente recorreu-se a um paquímetro para medir os pontos e converter de distância para tempo e posteriormente de tempo para ângulo, conhecendo a velocidade de rotação do parafuso. Os gráficos originais podem ser visualizados em ANEXO VII – Fotografias Parte Experimental.

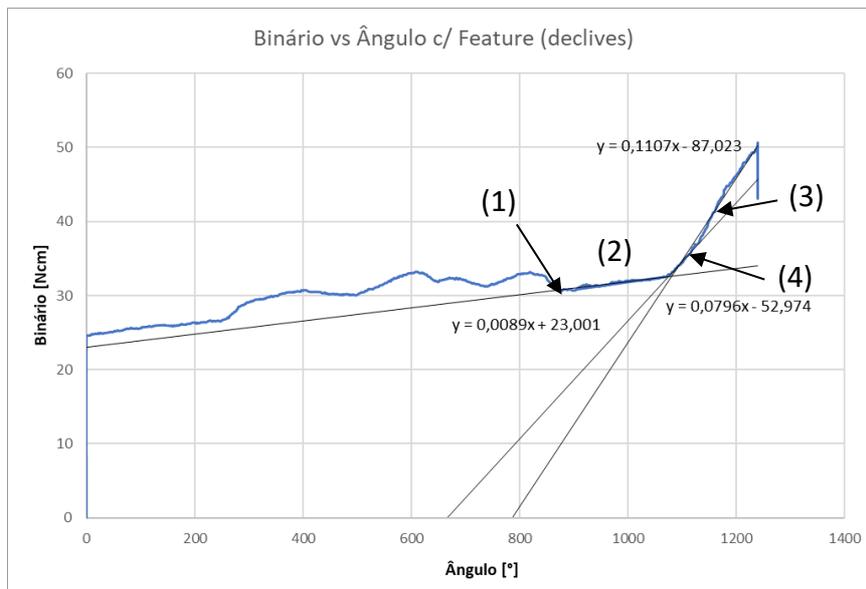


Figura 4.9 Declive Curva Binário c/Feature

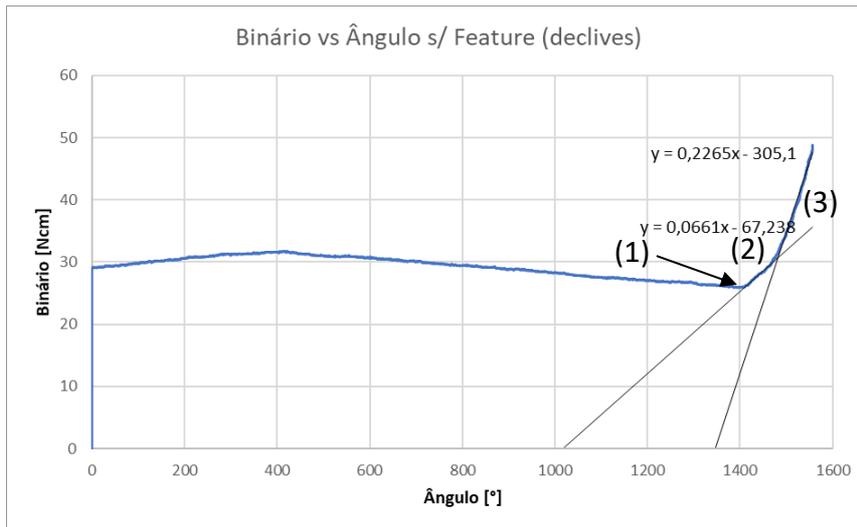


Figura 4.10 Declive Curva Binário s/Feature

Analisando a Figura 4.9 e Figura 4.10, é possível distinguir as várias zonas do aparafusamento, sendo que no caso sem feature existem (1) encosto da cabeça do parafuso (2) deformação elástica da peça apertada (3) aperto das duas peças. No caso com *feature*, entre a segunda e a terceira zona existe outra (4) que corresponde à deformação dos prismas, que neste caso não leva ao aumento da força de aperto.

Na Figura 4.12, será possível ver um dos efeitos pretendidos pela inclusão das *features* nas peças, que criam zona de subida suave da força de aperto. Uma detecção do snag-point pelo algoritmo de aparafusamento a aproximadamente 580° do mesmo gráfico permitiria reduzir na força de aperto aplicada, com a garantia que as peças serão corretamente apertadas pelo encosto desde o princípio das *features*.

Concretizando a possível solução o seu efeito e sendo possível reduzir o offset torque, mesmo que o ângulo de aperto fosse apenas reduzido ligeiramente, isso levaria a uma grande redução da força de aperto, como se pode comprovar pelos declives das curvas da força de aperto, Figura 4.11 e Figura 4.12. Uma preocupação com a redução da força de aperto é o auto desaperto do parafuso devido ao relaxamento dos materiais, no entanto espera-se que a geometria das *features* quando deformadas plasticamente e com o seu relaxamento ajudem a travar o efeito da perda de *clamping force* e dificultem o desaperto.

Força de aperto vs Curva binário s/ feature

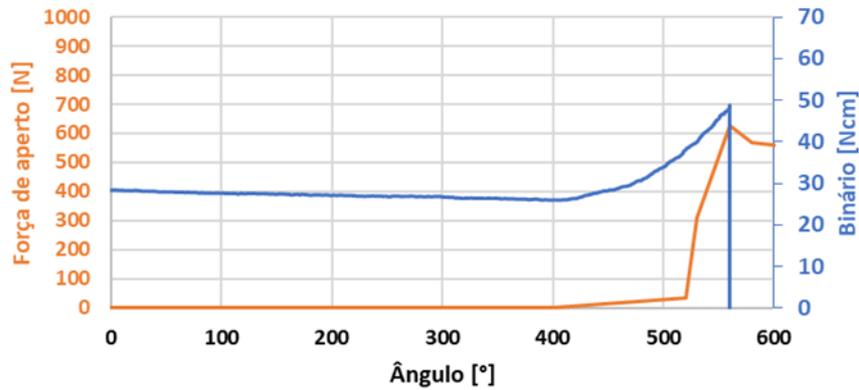


Figura 4.11 Força de aperto vs binário caso sem feature

Força de aperto vs Curva binário c/ feature

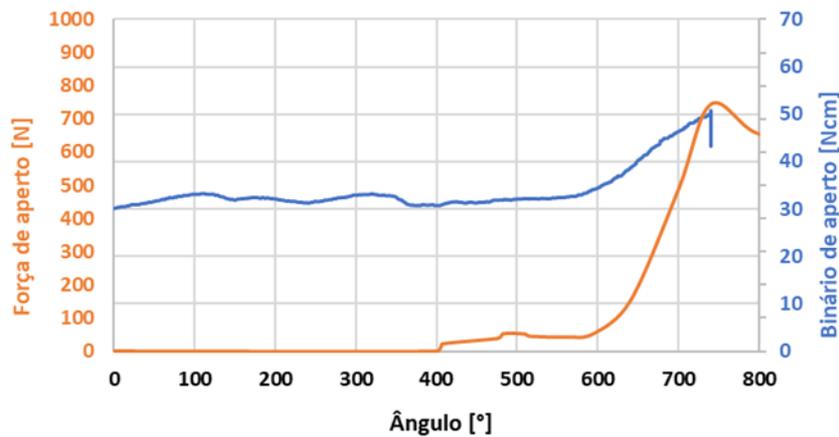


Figura 4.12 Força de aperto vs binário caso com feature

Os resultados obtidos pela célula de carga puderam também ser comparados com os obtidos a partir da simulação. Neste caso, quis-se validar o modelo numérico comparando a força de aperto do aparafusamento das peças com a “Contact Force” obtida em Ansys do parafuso. Para isso, repetiram-se as simulações para os mesmos parâmetros, com a exceção de terem sido alterados os materiais para que coincidisse com o dos testes, o PA2200, cujas propriedades utilizadas se encontram no ANEXO III – Propriedades Materiais e ainda desprezando a abertura da rosca pelo parafuso, até à conclusão do aparafusamento. Na Figura 4.13 e Figura 4.15 estão representados os gráficos obtidos para a força de aperto das simulações e a sua comparação com os resultados obtidos experimentalmente.

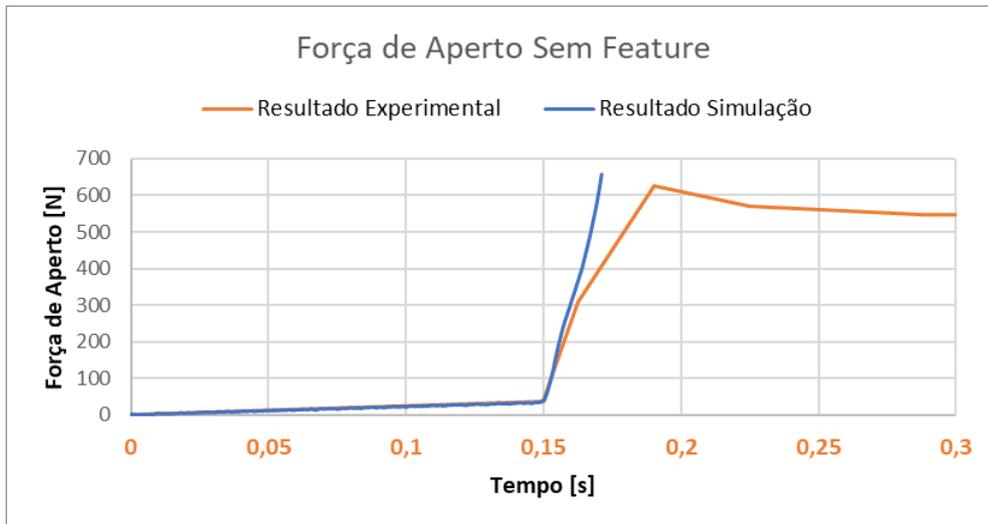


Figura 4.13 Comparação c/ força de aperto modelo numérico caso s/ feature

Como se pode comprovar pela Figura 4.14, no caso sem feature os valores obtidos são praticamente os mesmos e a forma das curvas também coincidem.

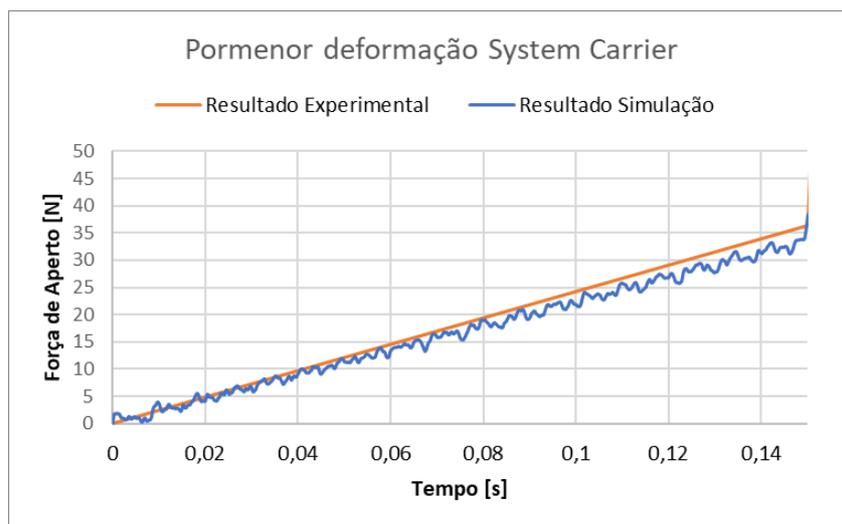


Figura 4.14 Comparação deformação System Carrier s/feature simulação vs resultados experimentais

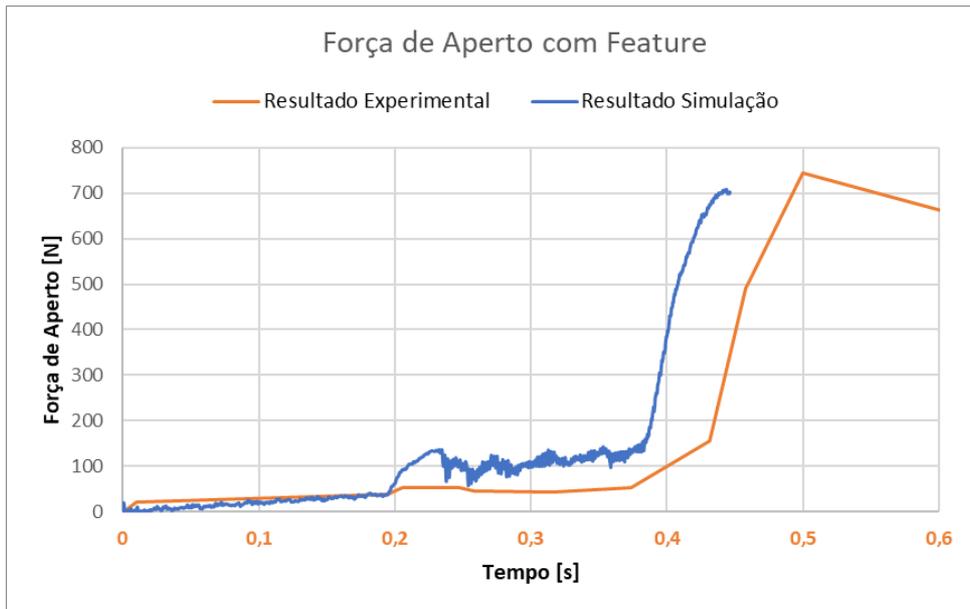


Figura 4.15 Comparação c/ força de aperto modelo numérico caso c/ feature

No outro caso, Figura 4.15, a força necessária para a deformação das *features* é superior nos resultados obtidos numericamente, no entanto, a sua forma é semelhante, como se pode concluir pelo gráfico da Figura 4.16 onde está representada a zona de deformação das *features* dos Resultados Teste e dos Resultados Simulação, tendo sido nestes últimos somada a diferença de valor entre os dois gráficos, de -64,69 N.

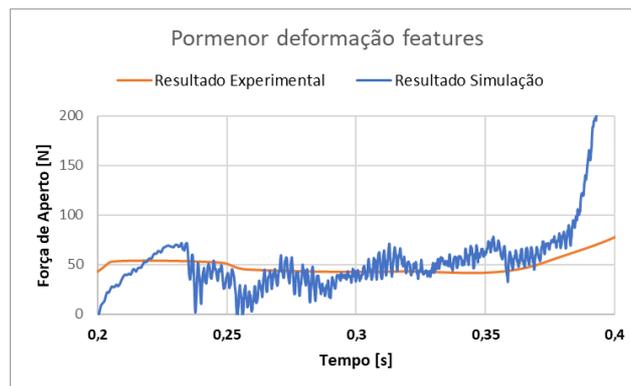


Figura 4.16 Pormenores força de aperto simulação features vs resultados experimentais deformação features

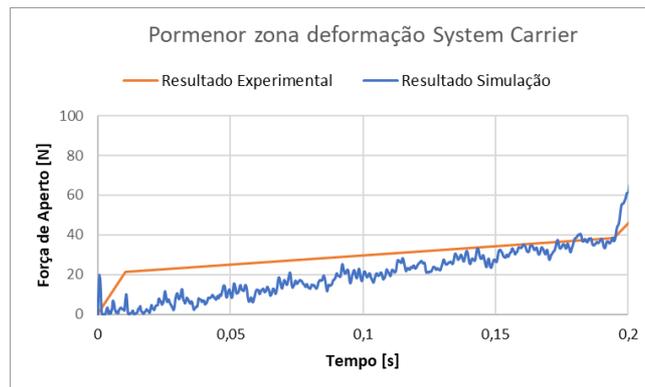


Figura 4.17 Pormenores força de aperto simulação features vs resultados experimentais deformação SC

Esta diferença pode dever-se a parâmetros de fabricação das peças por SLS, como por exemplo, a orientação dos modelos em relação à plataforma de construção, parâmetros do laser, temperatura da área de construção e tempo de arrefecimento [98]. Dito isto, conclui-se que os resultados do modelo numérico, embora comparar apenas dois casos seja insuficiente, mostram-se promissores.

## 5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

O principal objetivo da presente dissertação consistia no desenvolvimento de soluções construtivas que pudessem melhorar o Black Uniformity nos *displays* do *cluster* em estudo. Das conclusões, pôde-se descartar a *feature* do castelo cónico devido à força necessária à sua deformação ser demasiado elevada e induzir valores de tensão demasiado altos; verificar uma redução em ambas as *features* das tensões e deformações formadas de 20 e 40%, respetivamente, o que permitiu, juntamente com os dados obtidos das simulações locais, concluir que a *feature* das protuberâncias foi a que melhor atuou. Terminada esta parte, passou-se à replicação física do que foi estudado numericamente. Realizados os testes, foram depois apresentados e discutidos os resultados dos mesmos. A partir destes, apesar de não se poder chegar a uma conclusão geral devido a apenas ter sido efetuado 1 teste por caso, concluiu-se que a alteração da curva de aparafusamento que a *feature* produz permitiria prever com mais precisão quando as peças entram em contacto pela mudança de declives e, por isso, aplicar um offset-torque menor.

Esta questão da influência na curva de aparafusamento foi uma das questões que se queriam ver respondida com este projeto e a maneira como foi pensada alinha-se com os resultados obtidos. Dito isto, juntando os resultados obtidos numericamente com os obtidos experimentalmente, é possível prever que a introdução das *features* nos castelos e *domes* do *System Carrier* e *Carrier Frame* terá um impacto positivo no *Black Uniformity*. Apesar de tudo, não foi possível realizar diretamente a sua medição neste projeto, mas apenas simular de uma forma indireta o seu impacto, pelo que, entre outras coisas, é uma questão que terá de ser respondida num trabalho futuro.

Incluindo o ponto anterior, como propostas de trabalho futuro consideram-se importantes as seguintes atividades que permitirão uma melhor avaliação da eficácia da *feature* e do impacto no BU:

- Utilização do modelo numérico desenvolvido e validado serve para realizar simulações a possíveis alterações à *feature* (altura, largura, etc) de modo a chegar à geometria com os resultados mais satisfatórios.
- Aplicação do modelo numérico ao modelo das peças da produção (SC e CF).

- Realização de ensaios mais extensivos de aparafusamento a peças com os materiais das peças da produção, considerando mais casos de empeno/cominação de empenos e o efeito do aparafusamento de vários castelos.
- Fabrico de um novo molde para o *Carrier Frame* e o *System Carrier* que inclua a *feature* escolhida e efetuar a medição do BU comparando com peças sem *feature*.
- Estudo da Implementação da *feature* a outros *clusters* com problemas de BU e avaliar assim o seu efeito em disposição e geometria de castelos e materiais diferentes.
- Avaliar a influência da *feature* na retenção da força de *clamp* e força *pull-out*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]–<https://www.bosch.pt/a-nossa-empresa/a-nossa-historia/> Consultado a 05/08/2021
- [2]-Robert Bosch His life and work - <https://d-nb.info/105599288X/34-> Consultado a 05/08/2021
- [3]-<https://www.bosch.pt/a-nossa-empresa/o-grupo-bosch-no-mundo/> Consultado em 05/08/2021
- [4]-<https://www.bosch.pt/a-nossa-empresa/bosch-today/> Consultado em 05/08/2021
- [3] -<https://www.bosch.pt/a-nossa-empresa/bosch-em-portugal/> Consultado em 05/08/2021
- [6]-<https://www.bosch.pt/a-nossa-empresa/bosch-em-portugal/braga/> Consultado em 05/08/2021
- [7] - Chang J., Hwang S., Wen C., “The development of a training expert System For TFT-LCD Defects Inspection”, The International Journal of Industrial Engineering, pg.41-42, 2019
- [8] – Chen H., Fang L., Lee L., Wen C., Cheng S., Wang S., “LOG filter-based inspection of Cluster Mura and Vertical-Band Mura on liquid crystal displays”, Machine Vision Applications in Industrial Inspection XIII, pg.257-258, 2005
- [9] - W.K. Pratt, S. S. Sawkar and K. O’Reilly, “Automatic blemish detection in liquid crystal flat panel displays”, IS&T/SPIE Symposium on Electronic Imaging: Science and Technology, 1998
- [10] - Watson, A.B., “The Standard Spatial Observer: A new tool for display metrology”, pg.2-3, Information Display 23(1), 2007
- [11] - <https://www.automate.org/tech-papers/using-imaging-colorimeters-to-correct-oled-microled-and-other-emissive-displays-for-improved-production-efficiency-and-yields> Consultado em 27/06/2021
- [12][https://www.photonics.com/Articles/Imaging\\_Colorimetry\\_Accuracy\\_in\\_Display\\_and/a3215](https://www.photonics.com/Articles/Imaging_Colorimetry_Accuracy_in_Display_and/a3215) Consultado em 27/06/2021
- [13] – Downen P., “A Closer Look at Flat-Panel-Display Measurement Standards and Trends”, FPD measurement standards, pg.20, 2006
- [14] - <https://www.roda-computer.com/technology/mura-effect/> Consultado em 27/06/2021
- [15] – Alves P., “Shrinkage and Warpage Behaviour on Injection Moulding Parts”, Projeto de Dissertação, Universidade do Minho, 2008
- [16] – Cumbicus W., Estrems M., Arizmendi M., Jimenéz A., “Joining polymer parts with self-tapping screws: an improvement of the screw thread geometry”, International Journal of Material Forming, 2020
- [17] – Stéphan P., Mathurin F., Guillot J., “Experimental study of forming and tightening processes with thread forming screws”, University of Toulouse, pg.767, 2011

- [18] - S. Ralph, "Engineering Fundamentals of Threaded Fastener Design and Analysis", PCB Load & Torque, USA, pg.15
- [19] –Cumbicus W., Estrems M., Arizmendi M., Jiménez A., "Joining polymer parts with self-tapping screws: an improvement of the screw thread geometry", 2021
- [20] - "Engineered Threaded Fasteners for Plastics", Stanley Engineered Fastening, 2015
- [21] - Matos P., "Aparafusamento de Peças Plásticas na Produção em Série na Preh Portugal", Projeto de Dissertação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011
- [22] - Pinto A., "Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos", FEUP, Projeto de doutoramento, 2007
- [23] - <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/automotive-adhesive-market-36961165.html> - Consultado em 20/08/2021
- [24] - A. V. Pocius, "Adhesion and Adhesives Technology", 2nd ed. An Introduction, 1997
- [25]-<https://www.assemblymag.com/articles/85099-adhesives-and-automobiles> Consultado em 20/08/2021
- [26] - da Silva, L.F.M.. e Magalhães, A. e Moura, M. "Juntas Adesivas Estruturais" (1ª Edição); Publindústria, 2007.
- [27] – Sousa, C. "Comparação de técnicas analíticas e numéricas para previsão de resistência de juntas adesivas de sobreposição simples", ISEP, 2016
- [28] – Galińska A. "Mechanical Joining of Fibre Reinforced Polymer Composites to Metals—A Review. Part I: Bolted Joining", Warsaw University of Technology, 2020
- [29]-<https://www.assemblymag.com/articles/94431-advances-in-self-piercing-riveting> Consultado em 21/08/2021
- [30] – Worrall, C. Kellar, E. Vacogne C., "Joining of fibre-reinforced polymer composites", National Composites Centre, 2020
- [31] - Faraz, A.; Biermann, D.; Weinert, K., "Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates", Int. J. Mach. Tools Manuf. 2009
- [32] -<https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/composite-holemaking-challenges/> Consultado em 26/08/2021
- [33] - [https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-3-642-20617-7\\_6486](https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-3-642-20617-7_6486) Consultado em 26/08/2021
- [34] – Schmitt, R. "Viscoelastic relaxation in bolted thermoplastic composite joints", University of Nebraska, 1994

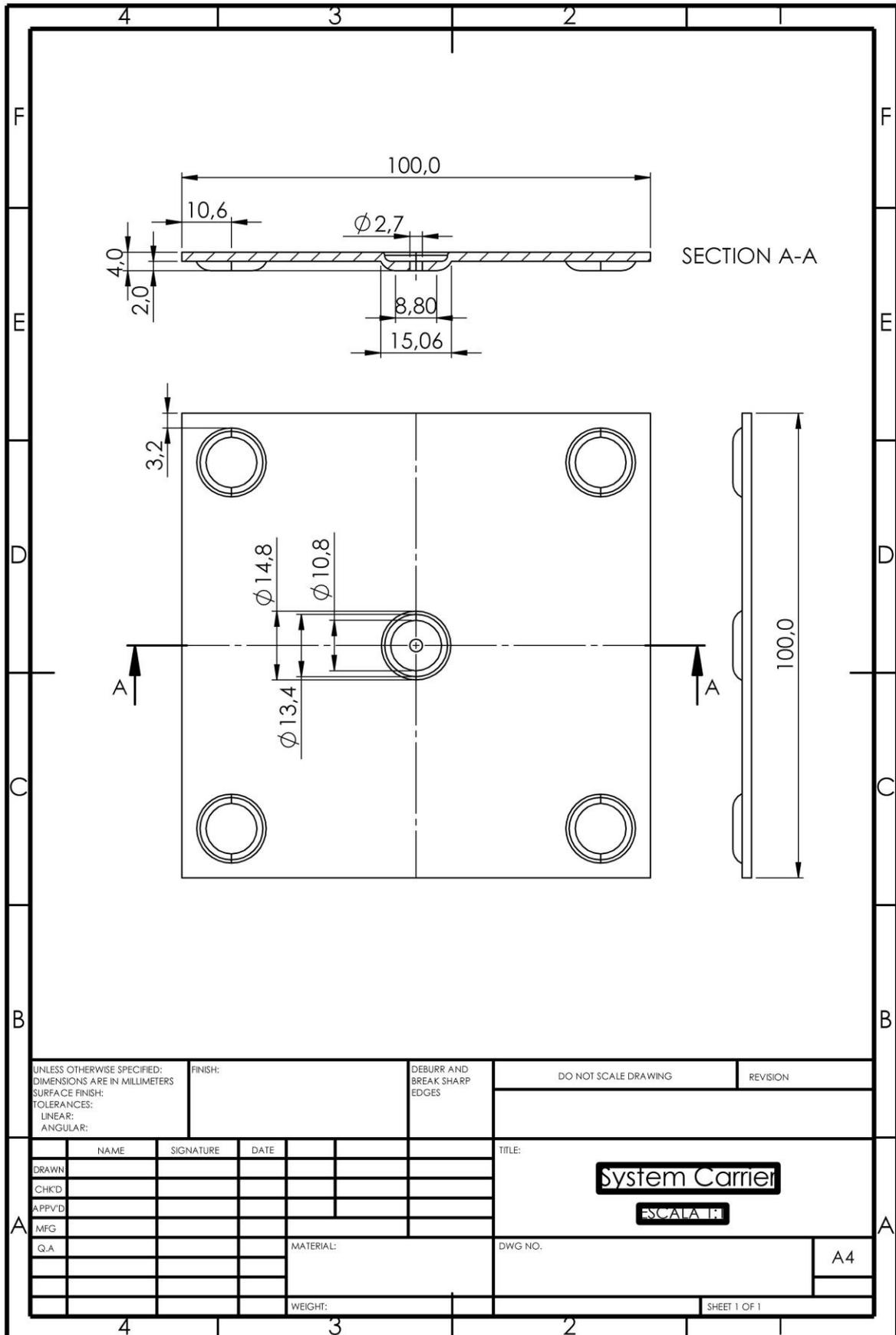
- [35] – Jensen, A. Lilleborge, J. Thorvaldsen, T. Torkildsen H. Farsund, Ø. Pran, K., “Creep measurements of steel bolted and pretensioned gfrp composite joint using fibre optic strain sensors”, 15TH EUROPEAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS, 2012
- [36] – Khomenko, A. Koricho, E. Haq, M., Cloud G., “Short-Term Preload Relaxation in Composite Bolted Joints Monitored with Reusable Optical Sensors”, Joining Technologies for Composites and Dissimilar Materials, Volume 10, 2016
- [37] - Standard Test Method for Creep Relaxation of Laminated Composite Gasket Materials – ASTM F1276-99 (2003)
- [38] – Thoppul, S. Finegan, J. Gibson, R., “Mechanics of mechanically fastened joints in polymer–matrixcomposite structures – A review”, Wayne State University, 2008
- [39] – Jadee, K. Othman, A., “Fiber Reinforced Composite Structure with Bolted Joint – A Review”, Key Engineering Materials, 2011
- [40] – Chung, D., “Composite Materials – Science and applications”, Springer, 2010
- [41] -Ravichandran, M. Balasubramanian, M. Chairman, C. Pritima, D. Dhinakaran, V, Stalin B. “Recent developments in Polymer Matrix Composites – A review”, Material Science and Engineering, 2020
- [42] – Santos, R. “Fabrico de Componentes Compósitos Aeronáuticos através de Processos Out-of-Autoclave”, FEUP, Dissertação de Mestrado, 2017
- [43] – Azenha, J. Gomes, M. Silva, P. Pontes, A. “High Strength Injection Molded Thermoplastic Composites” Universidade do Minho, 2018
- [44] - Ryton® PPS Processing Guide, Solvay
- [45] - <https://thermoplasticcomposites.de/en/processing/> - Consultado em 23/08/2021
- [46] - Erden S, Sever K, Seki Y, et al. “Enhancement of the mechanical properties of glass/polyester composites via matrix modification glass/polyester composite siloxane matrix modification”, Fibers Polym, 2010
- [47] – Sathishkumar T., Satheeshkumar S. and Naveen J., “Glass fiber-reinforced polymer composites – a review”, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2014
- [48] – Carvalho J., “Durabilidade de ligações coladas com adesivos epoxídico e de poliuretano entre perfis de prfv”, ISP, Dissertação de Mestrado, 2013
- [49] – Alhasmy, A., “Fabrication of Aluminium Matrix Composites (AMCs) by Squeeze Casting Technique Using Carbon Fiber as Reinforcement”, Master of Applied Science, 2012

- [50] Tanguy M, Bourmaud A, Beaugrand J, Gaudry T, Baley C. "Influence of microstructure and constituents properties on the performance of composite" *Compos B Eng* 2018
- [51] - H. Sadabadi, M. Ghasemi, "Effects of Some Injection Molding Process Parameters on Fiber Orientation Tensor of Short Glass Fiber Polystyrene Composites (SGF/PS)", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2007
- [53] - S. Mortazavian and A. Fatemi, "Effects of fiber orientation and anisotropy on tensile strength and elastic modulus of short fiber reinforced polymer composites", University of Toledo, 2014
- [54] - Chung ST, Kwon TH, "Numerical simulation of fiber orientation in injection molding of short-fiber-reinforced thermoplastics", *Polym Eng Sci*, 1995
- [55] - Han K-H, Im Y-T. "Numerical simulation of three-dimensional fiber orientation in short-fiber-reinforced injection-molded parts", *J Mater Process Technol*, 2002
- [56] - Jackson WC, Advani SG, Tucker CL. "Predicting the orientation of short fibers in thin compression moldings", *J Compos Mater*, 1986
- [57] – Zhong Y., Liu P., Pei Q., Sorkin V., Comillus A., Su Z., Guo T., Thitsartarn W., Lin T., He C., Zhang Y., "Elastic properties of injection molded glass fiber reinforced thermoplastic composites, *Composite Structures*, 2020
- [58] - Tucker CL, Liang E. "Stiffness predictions for unidirectional short-fiber composites: review and evaluation", *Compos Sci Technol*, 1999
- [59] – Kelly A., Zweben C., Chou T., "Fiber reinforcements and general theory of composites", 2000
- [60] – Singiresu S., "The Finite Element Method in Engineering", Butterworth-Heinemann, 2011
- [61] – Azevedo A., "MÉTODOS DOS ELEMENTOS FINITOS", FEUP, 2003
- [62] – Liu G.R., Quek S.S. "The finite element Method – A practical Course", Butterworth-Heinemann, 2003
- [63] - <http://homes.civil.aau.dk/shl/ansysc/fem-nonlinear-introduction.pdf> Consultado em 03/09/2021
- [64] – Madenci E., Guven I., "The finite element method and applications in engineering using Ansys", Springer, 2006
- [65] – Peksen M. "Multiphysics Modelling of Structural Components and Materials", 2018
- [66] - <https://yasincapar.com/nonlinearities-in-fem/> Consultado em 04/09/2021

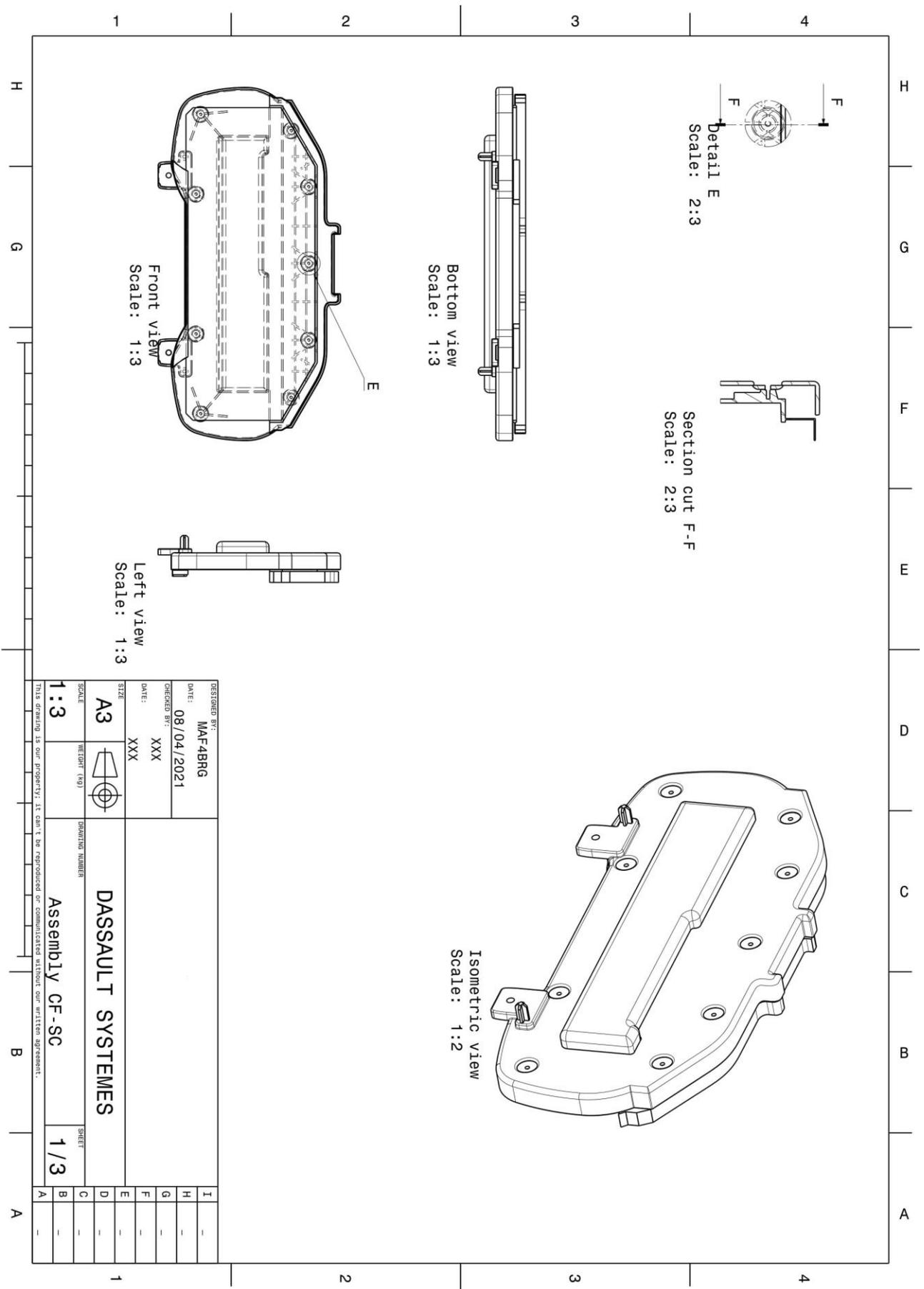
- [67] - Bobet A., Fakhimi A., Johnson S., Yeung M. ,“ Numerical Models in Discontinuous Media: Review of Advances for Rock Mechanics Applications”, 2009
- [68] - Clegg D. W., Collyer A. A. “Mechanical properties of reinforced thermoplastics”, Elsevier Applied Science Publishers , 1986
- [69] – Kim N., “Chapter 5: Finite Element Analysis of Contact Problem”, Herbert Wertheim College of Engineering
- [70]- 13.174. CONTA174 - 3-D 8-Node Surface-to-Surface Contact, Department of Applied Mechanics, Budapest university of technology and economics
- [71] – Leckness K., “Novel finite element method to predict blast wave Transmission through human ear”, Master’s thesis, University of Oklahoma, 2016
- [72] – “Lecture 3 -Ansys Mechanical: Introduction to contact”
- [73] – Enayatpour E., “Ansys Mechanical Basic Structure nonlinearities”, Ansys 2019 R3, 2020
- [74] – ANSYS ContactTechnology Guide, 2004
- [75][https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans\\_help\\_v182/ans\\_elem/Hlp\\_E\\_CONTA174.html](https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_CONTA174.html) Consultado em 10/09/2021
- [76] – “Workbench - MechanicalStructural Nonlinearities”, Chapter 3 – Introduction to Contact, 2009, Ansys
- [77]-<https://dianafea.com/manuals/d102/Theory/Theorych54.html> Consultado em 10/09/2021
- [78] - [kc.scia.net/Help/kik/calculation/nonlinear\\_analysis/newton\\_raphson\\_method.htm](http://kc.scia.net/Help/kik/calculation/nonlinear_analysis/newton_raphson_method.htm)
- [79]-<https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEANLRefMap/simaanl-c-nonlineareqns.html> Consultado em 10/09/2021
- [80] - [https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans\\_help\\_v182/ans\\_cmd/Hlp\\_C\\_NROPT.html](https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_cmd/Hlp_C_NROPT.html) Consultado em 10/09/2021
- [81] – “Explicit Dynamics”, Ansys Brochure
- [82] – “Module 02: Introduction to Explicit Dynamics”, Ansys
- [83] – Sun J., S., Lee K., H., Lee H. P. “Comparison of implicit and explicit methods for dynamic problems”, Journal of Materials Processing Technology, 2000
- [84] – Balakrishnan K., Sharma A., Ali R. “Comparison of explicit and implicit finite element methods and its effectiveness for droptest of Electronic control unit”, 11<sup>th</sup> international symposium on plasticity and impact mechanics, 2016
- [85] – Bathe K. “Finite Element Procedures”, Massachusetts Institute of Technology, 2016

- [86] – Wilson E., “Dynamic analysis using mode superposition”, Dynamic and Static Analysis
- [87] – Rostami S., Shojaee S., Saffari H. “An explicit time integration method for structural dynamics using cubic B-spline polynomial functions”, Scientia Iranica, 2013
- [88] - <https://www.dynasupport.com/tutorial/ls-dyna-users-guide/time-integration>  
Consultado em 20/09/2021
- [89] – Salabas A., “Fluid model for charged particle transport in capacitively coupled radio-frequency discharges”, Dissertação de doutoramento, ISP, 2003
- [90] - <http://200.17.228.88/disciplinas/TM738/I5-quasi-static.pdf> Consultado em 20/09/2021
- [91] – Gislason M., Stansfield B., Nash D. “Strathprints Institutional Repository”, University of Strathclyde Glasgow, 2010
- [92] - Daniel I., “Yield and Failure Criteria for Composite Materials under Static and Dynamic Loading”, Northwestern University, 2016
- [93] – Li S., “The Maximum Stress Failure Criterion and the Maximum Strain Failure Criterion: Their Unification and Rationalization”, University of Nottingham, 2020
- [94] – Camanho P., “Failure criteria for fibre-reinforced polymer composites”, FEUP, 2002
- [95] - <https://vexmatech.com/pa-2200.html> Consultado em 03/10/2021
- [96] - <https://simutechgroup.com/performing-ekill-element-death-in-ansys-workbench-mechanical-model/> Consultado em 20/08/2021
- [97] - BOSCH Group Internal Document
- [98] – Kozior T., Kundera C., “Mechanical properties of models prepared by SLS technology”, AIP Conference Proceedings, 2017
- [99] – Shin D., Kim Y., Jeon E., “Approximation of Non-Linear Stress–Strain Curve for GFRP Tensile Specimens by Inverse Method”, 2019
- [100] <https://www.campusplastics.com/campus/pt/datasheet/CELANEX%C2%AE+2302+GV130/Celanese/163/b515b4d4> Consultado em 21/08/2021
- [101] – Abaqus, “Lecture 5 - Quasi-Static Analysis”, ABAQUS/Explicit: Advanced Topics
- [102] – Courant R., “Variational Methods for the Solution of Problems of Equilibrium and Vibrations”, American Mathematical Society, 1943
- [103] – Clough RW., “The Finite Element Method in Plane Stress Analysis”, 2nd ASCE Conference on Electronic Comput

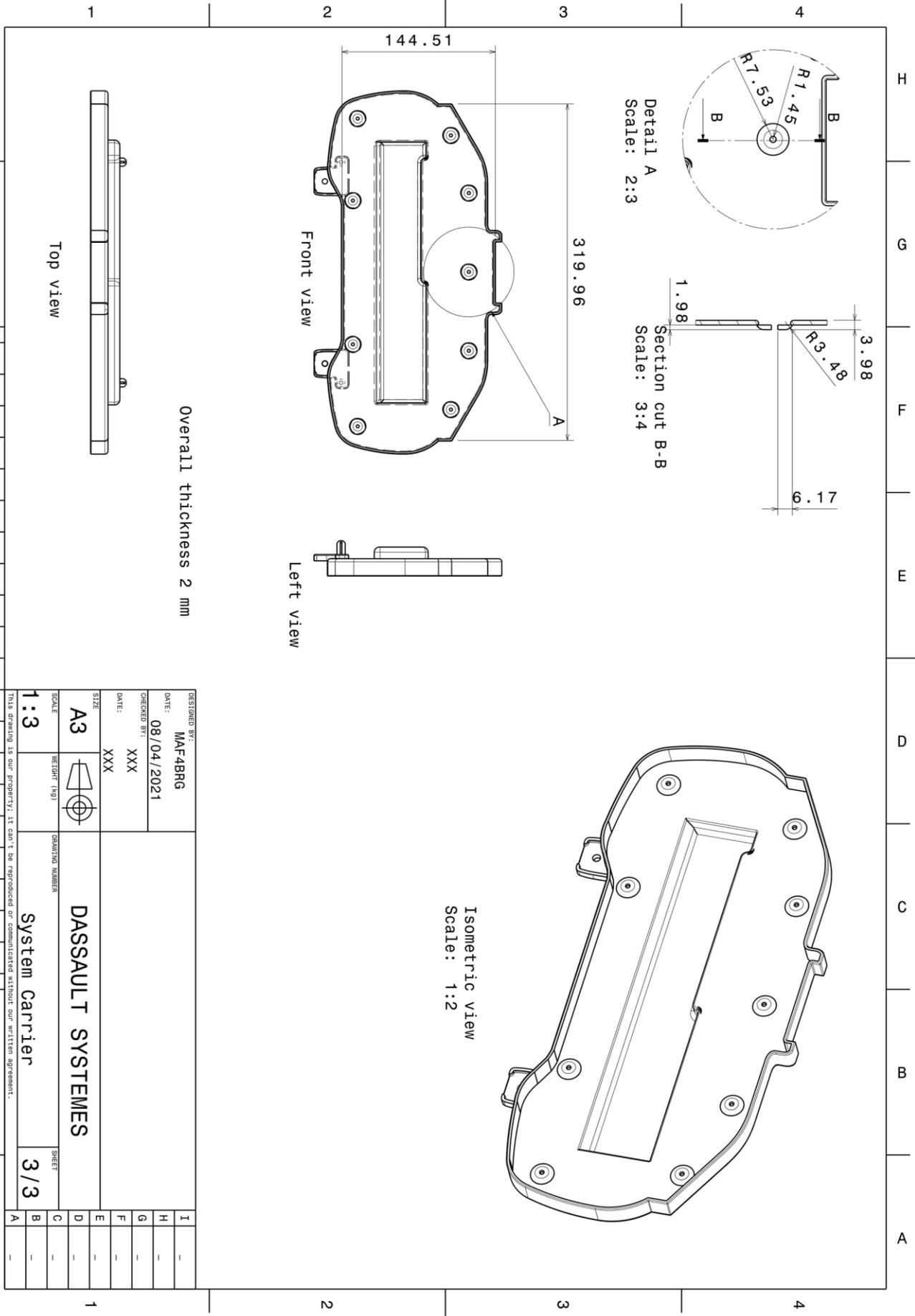
# ANEXO I – DESENHO TÉCNICO PEÇAS



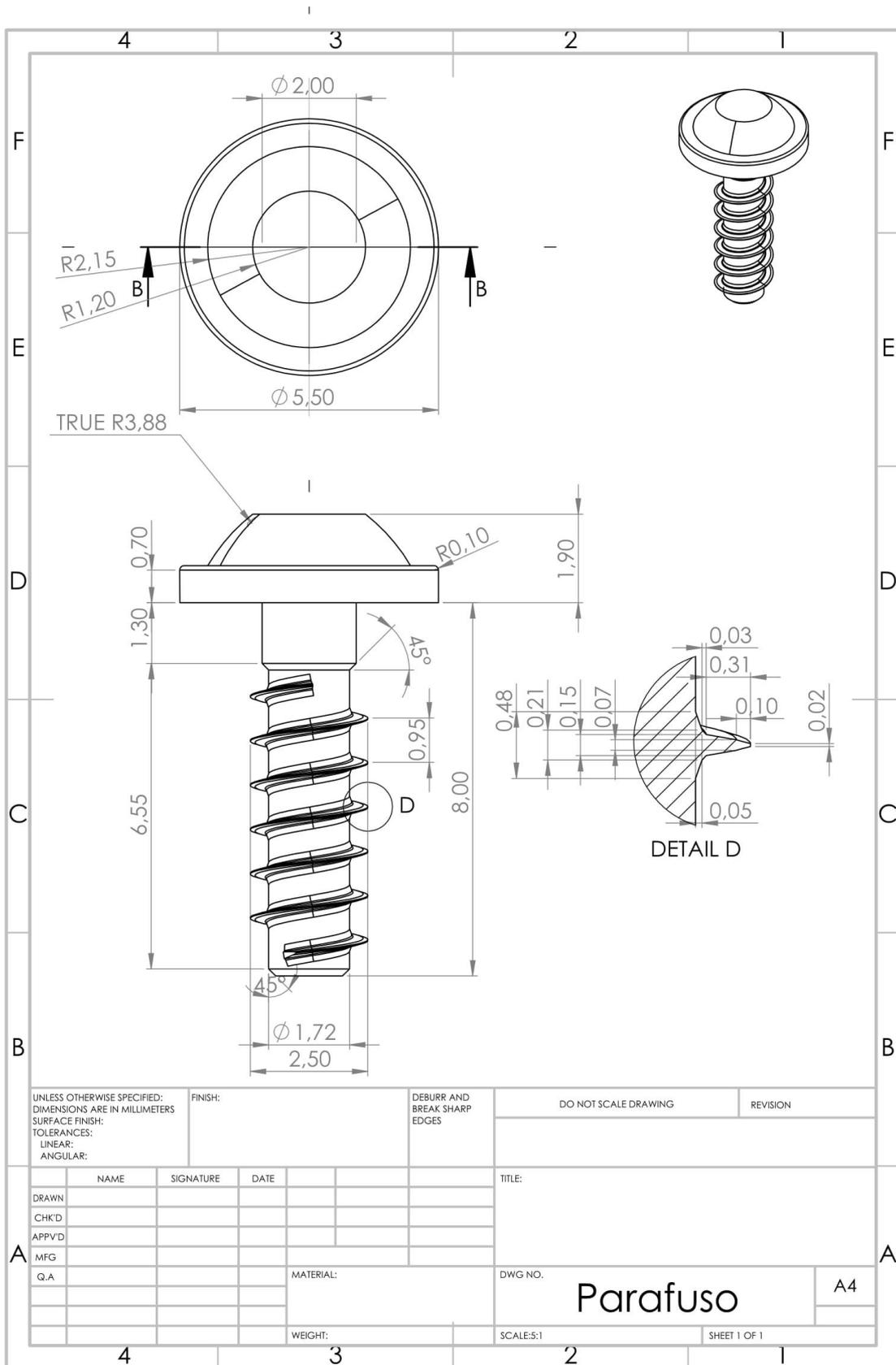








# ANEXO II – DESENHO TÉCNICO PARAFUSO



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN				TITLE:		
CHK'D				DWG NO. <b>Parafuso</b> <span style="float: right;">A4</span>		
APP'V'D						
MFG						
Q.A						
MATERIAL:				SCALE: 1		
WEIGHT:				SHEET 1 OF 1		

## ANEXO III – PROPRIEDADES MATERIAIS



### ABS

ABS is a widely used engineering thermoplastic with high durability and fine feature detail. Printed ABS has up to 80% of the strength of injection-molded ABS, making it highly suitable for functional applications. This material is opaque and available in several color options. Applications include snap-fits, end-use components, jigs and fixtures, concept modeling, and testing for form, fit and function.

MEASUREMENT	VALUE	STANDARD
Density	1.05 g/cm <sup>3</sup>	@ 25°C
Tensile Strength	22 MPa	ASTM D638M
Tensile Modulus	1627 MPa	ASTM D638M
Flexural Strength	41 MPa	ASTM D638M
Flexural Modulus	1834 MPa	ASTM D790M
Notched Izod Impact	107 J/m	ASTM D790M
Unnotched Izod Impact	214 J/m	ASTM D256A
Heat Deflection Temperature	90 °C 76 °C	ASTM D648 @ 0.45 MPa @ 1.81 MPa
Elongation at Break	6%	

Actual values may vary with build condition

For more information on this material, please visit [mtls.me/abs](https://mtls.me/abs).



## Polycarbonate (PC)

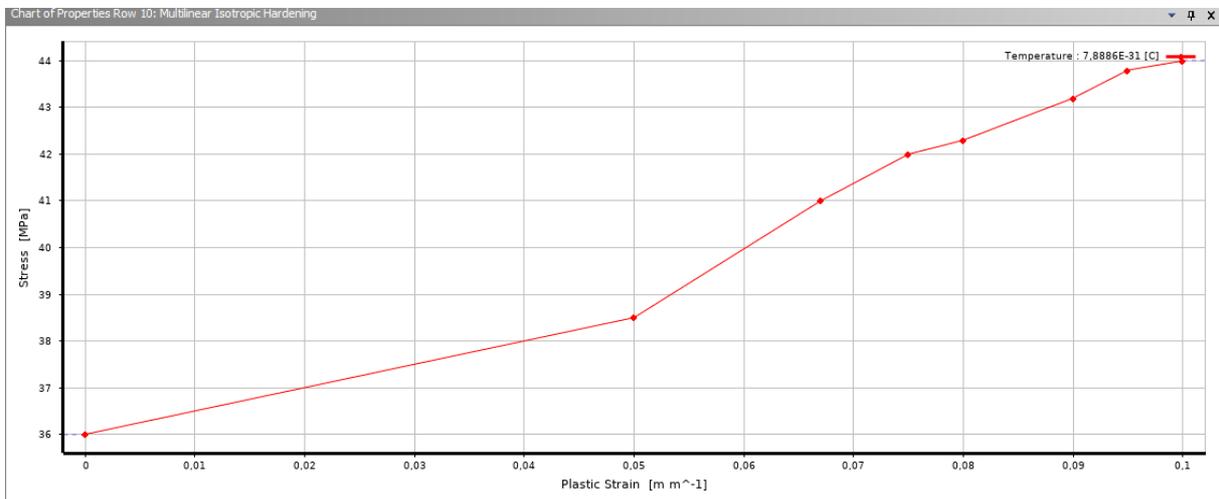
Polycarbonates (PC) are among the most widely used industrial thermoplastics owing to the material's excellent impact strength and temperature resistance. The mechanical properties of PC make this material ideal for demanding engineering environments or applications requiring high flexural strength and tensile strength.

MEASUREMENT	VALUE	STANDARD
Density	1.2 g/cm <sup>3</sup>	
Tensile Strength	68 MPa	ASTM D638
Tensile Modulus	2280 MPa	ASTM D638
Flexural Strength	104 MPa	ASTM D790
Flexural Modulus	2234 MPa	ASTM D790
Notched Izod Impact	53 J/m	ASTM D256
Unnotched Izod Impact	320 J/m	ASTM D256
Heat Deflection Temperature	138 °C 127 °C	ASTM D648 @ 0.45 MPa @ 1.81 MPa
Elongation at Break	4.8%	
Flame Retardancy	HB 1.5 mm	UL94

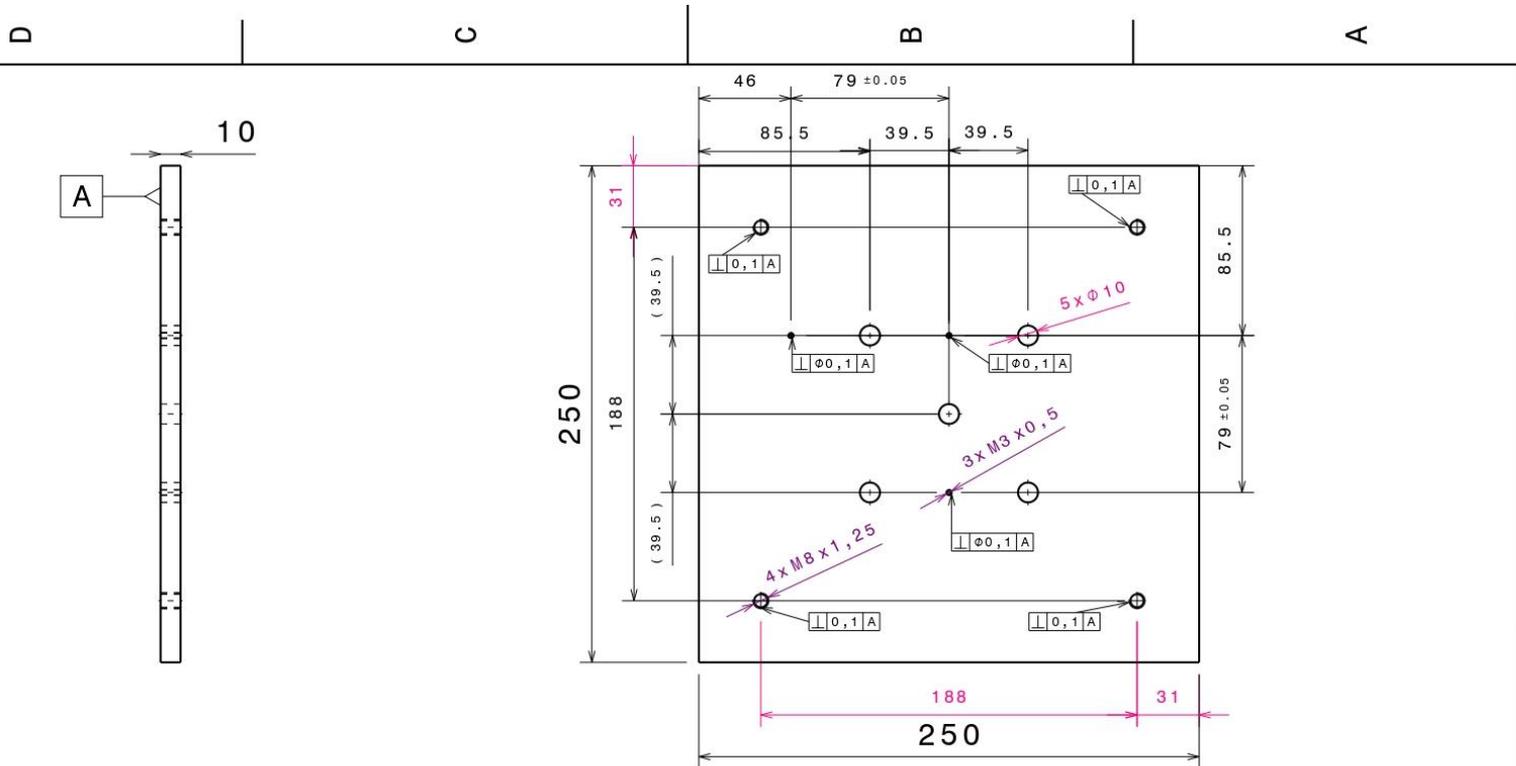
Actual values may vary with build condition

For more information on this material, please visit [mtls.me/pc](https://mtls.me/pc).

Properties of Outline Row 4: PA12				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	950	kg m <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/>
4	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>
5	Derive from	Young's ...		
6	Young's Modulus	1200	MPa	<input type="checkbox"/>
7	Poisson's Ratio	0,39		<input type="checkbox"/>
8	Bulk Modulus	1,8182E+09	Pa	<input type="checkbox"/>
9	Shear Modulus	4,3165E+08	Pa	<input type="checkbox"/>
10	Multilinear Isotropic Hardening	Tabular		<input type="checkbox"/>



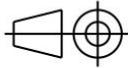
# ANEXO IV – DESENHOS TÉCNICOS FERRAMENTA ENSAIO EXPERIMENTAL

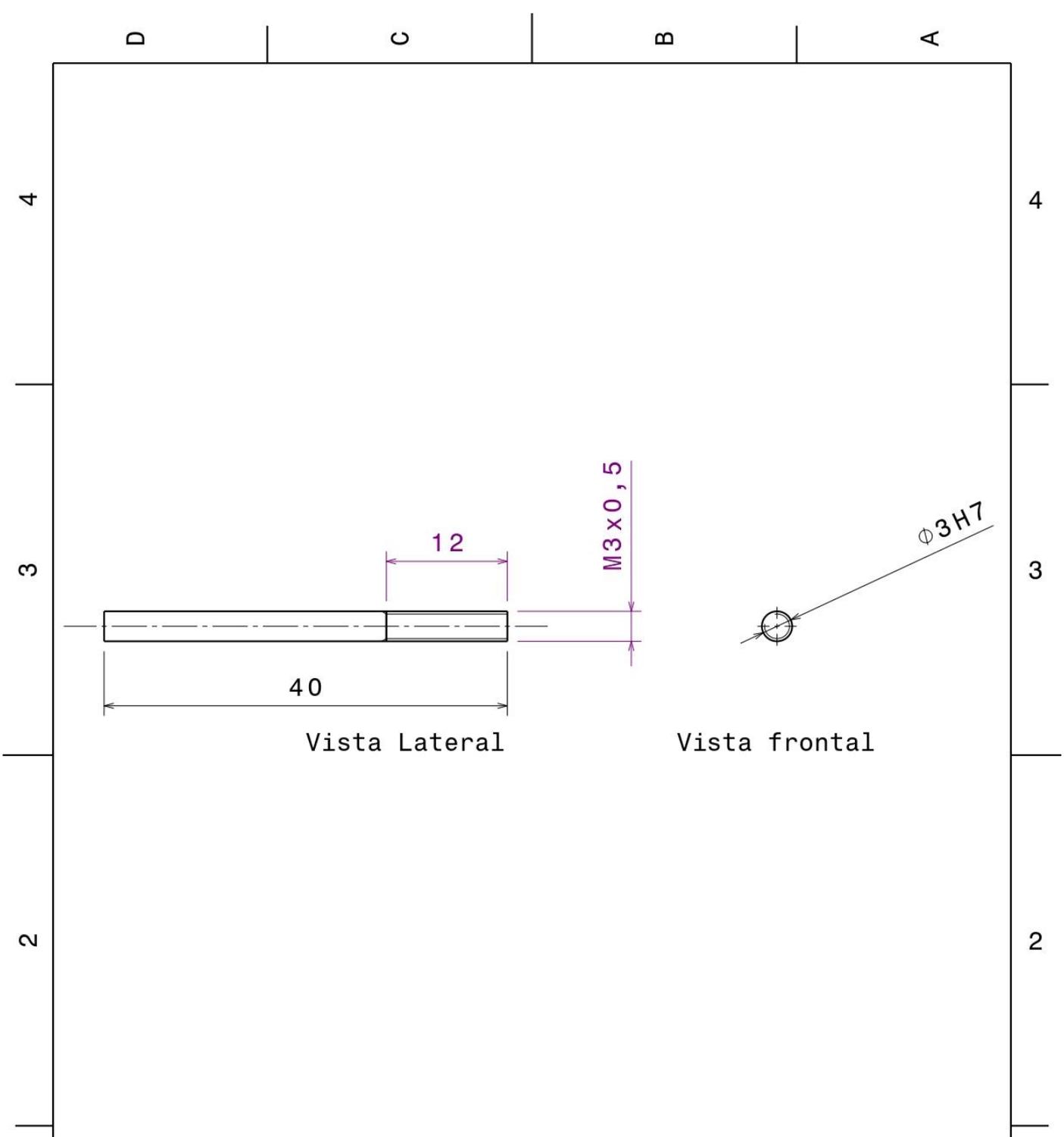


Boleados r1

Estado da Superfície:

N12

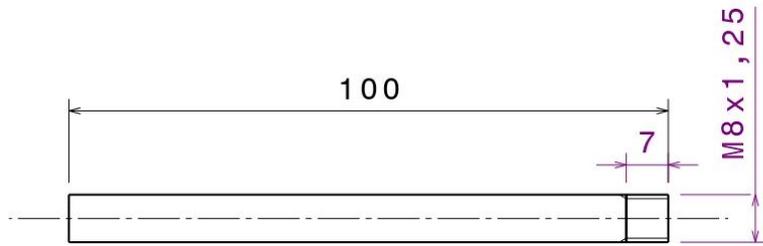
DESIGNED BY: <b>MAF4BRG</b>				I	-
DATE:				H	-
CHECKED BY: <b>XXX</b>				G	-
DATE: <b>XXX</b>				F	-
SIZE <b>A4</b>		 <b>DASSAULT SYSTEMES</b>		E	-
SCALE	WEIGHT (kg)			D	-
DRAWING NUMBER		<b>Suporte</b>		C	-
				B	-
		SHEET		A	-
		<b>1/1</b>			
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.					



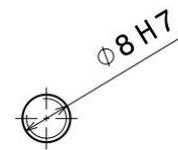
DESIGNED BY: <b>MAF4BRG</b>		<b>DASSAULT SYSTEMES</b>		I	-
DATE:				H	-
CHECKED BY: <b>XXX</b>				G	-
DATE: <b>XXX</b>		F	-	E	-
SIZE <b>A4</b>		<b>Guia</b>		D	-
SCALE	WEIGHT (kg)			C	-
DRAWING NUMBER		SHEET		B	-
		<b>1 / 1</b>		A	-

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

D | C | B | A



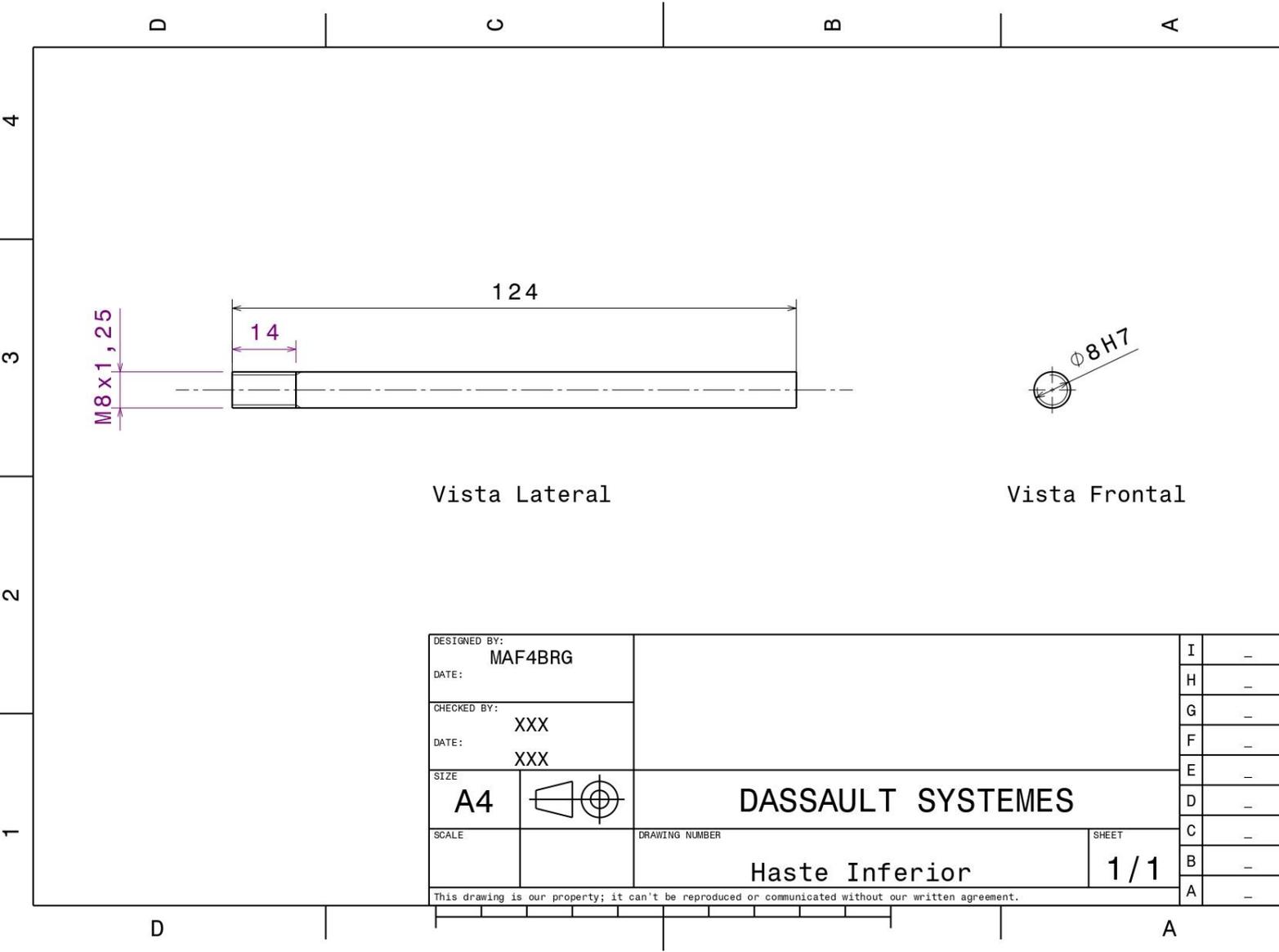
Vista Lateral



Vista Frontal

DESIGNED BY: <b>MAF4BRG</b>				I	-
DATE: <b>28/07/2021</b>				H	-
CHECKED BY: <b>XXX</b>				G	-
DATE: <b>XXX</b>				F	-
SIZE <b>A4</b>		<b>DASSAULT SYSTEMES</b>		E	-
SCALE	WEIGHT (kg)			D	-
		DRAWING NUMBER	SHEET	C	-
		<b>Haste Superior</b>	<b>1 / 1</b>	B	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.				A	-

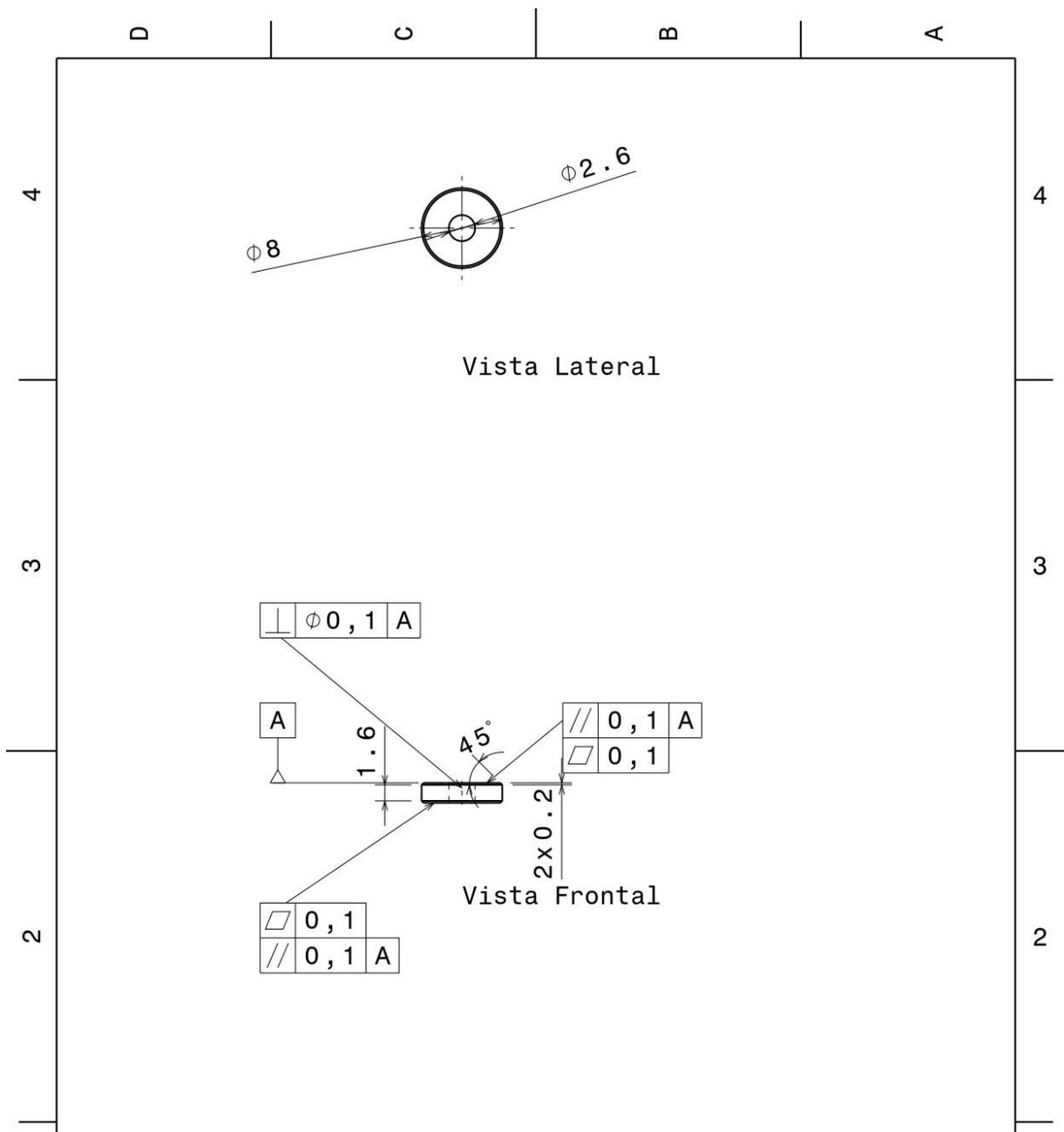
D | A



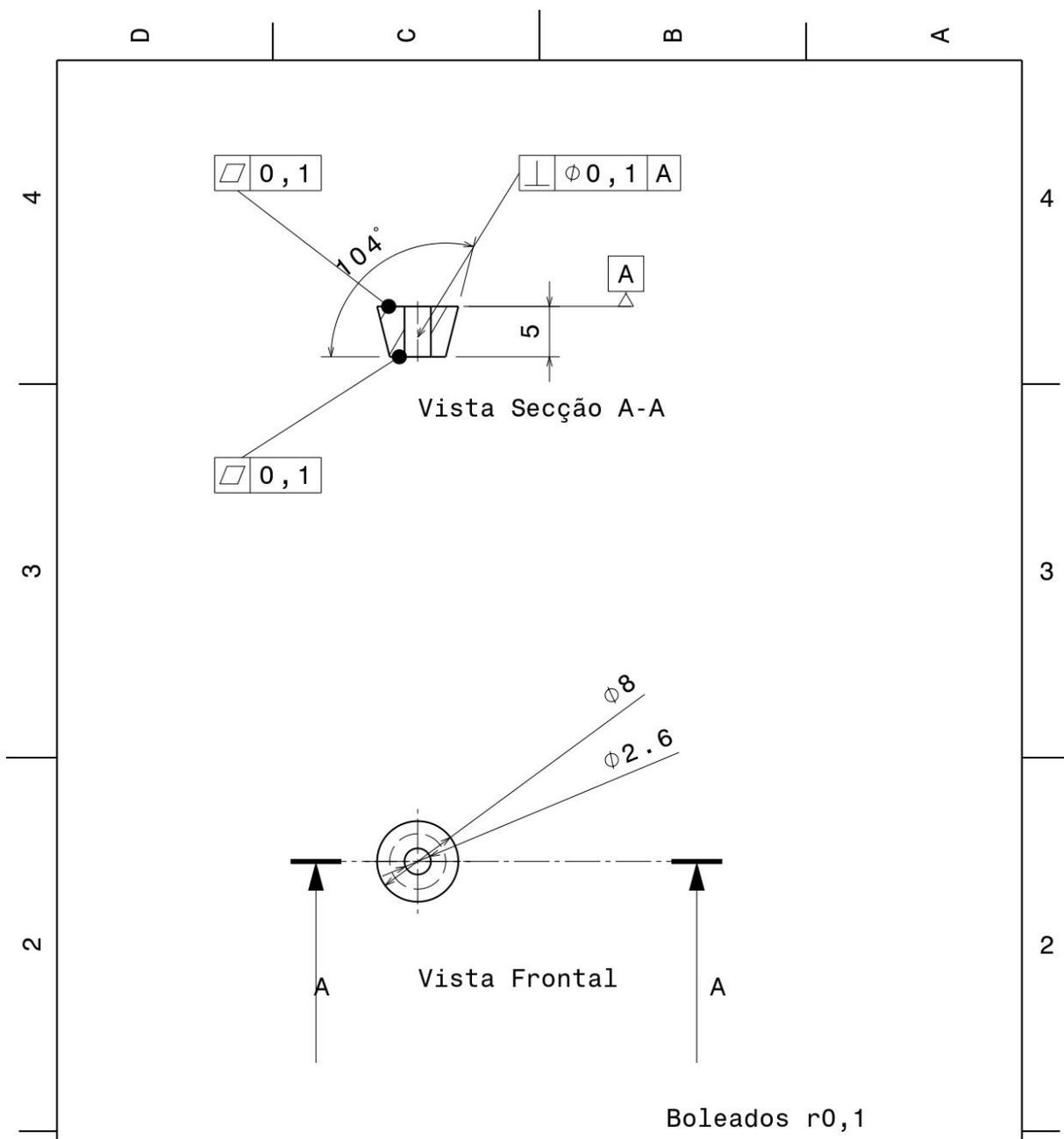
Vista Lateral

Vista Frontal

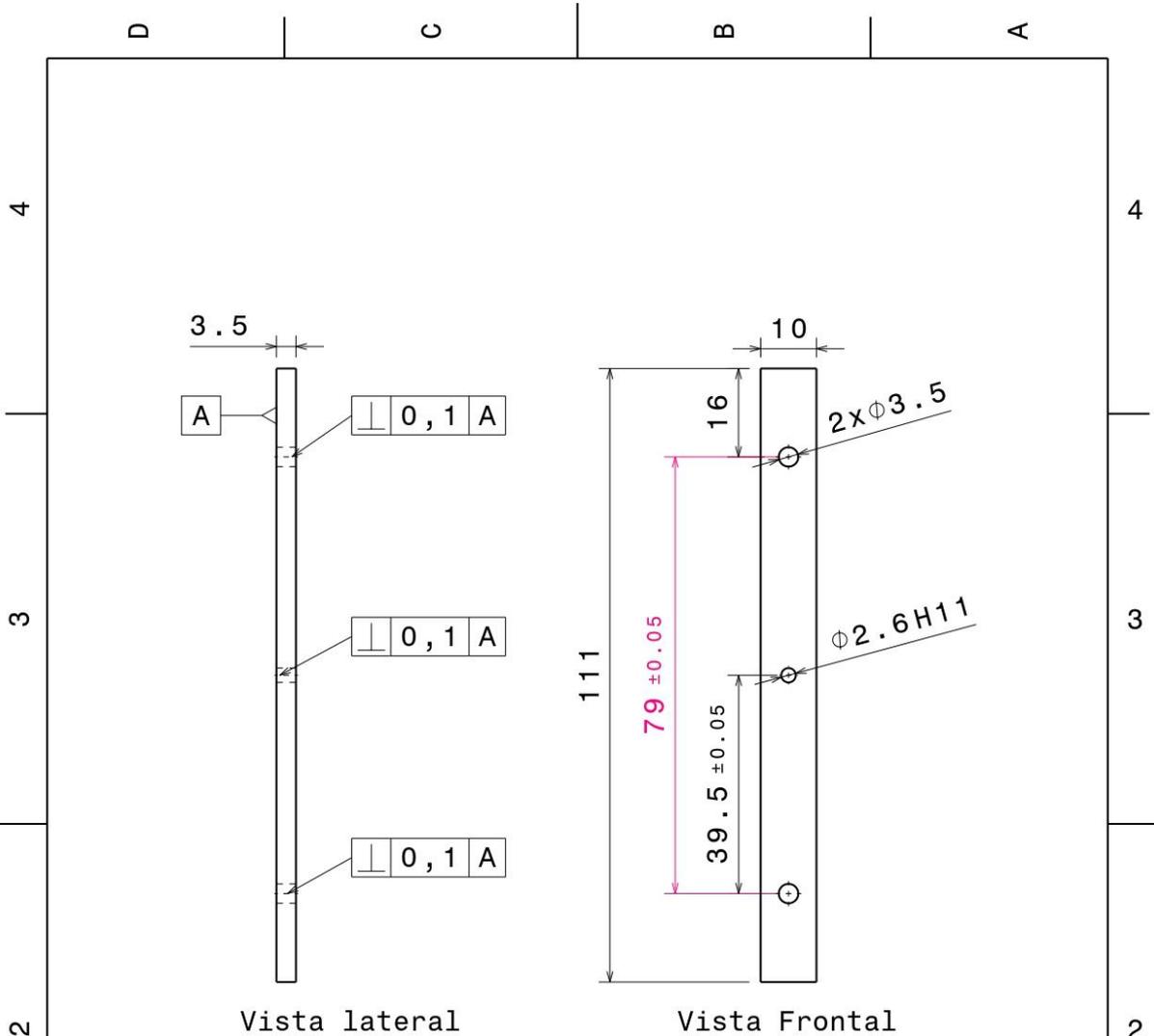
DESIGNED BY: <b>MAF4BRG</b>			I	-
DATE:			H	-
CHECKED BY: <b>XXX</b>			G	-
DATE: <b>XXX</b>			F	-
SIZE <b>A4</b>		<b>DASSAULT SYSTEMES</b>	E	-
SCALE			D	-
	DRAWING NUMBER		C	-
	<b>Haste Inferior</b>	SHEET <b>1/1</b>	B	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.			A	-



DESIGNED BY: <b>MAF4BRG</b>				I	-
DATE: <b>29/07/2021</b>				H	-
CHECKED BY: <b>XXX</b>				G	-
DATE: <b>XXX</b>				F	-
SIZE <b>A4</b>		<b>DASSAULT SYSTEMES</b>		E	-
SCALE	WEIGHT (kg)			D	-
DRAWING NUMBER		SHEET		C	-
		<b>Washer Top</b>		B	-
		<b>1/1</b>		A	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.					



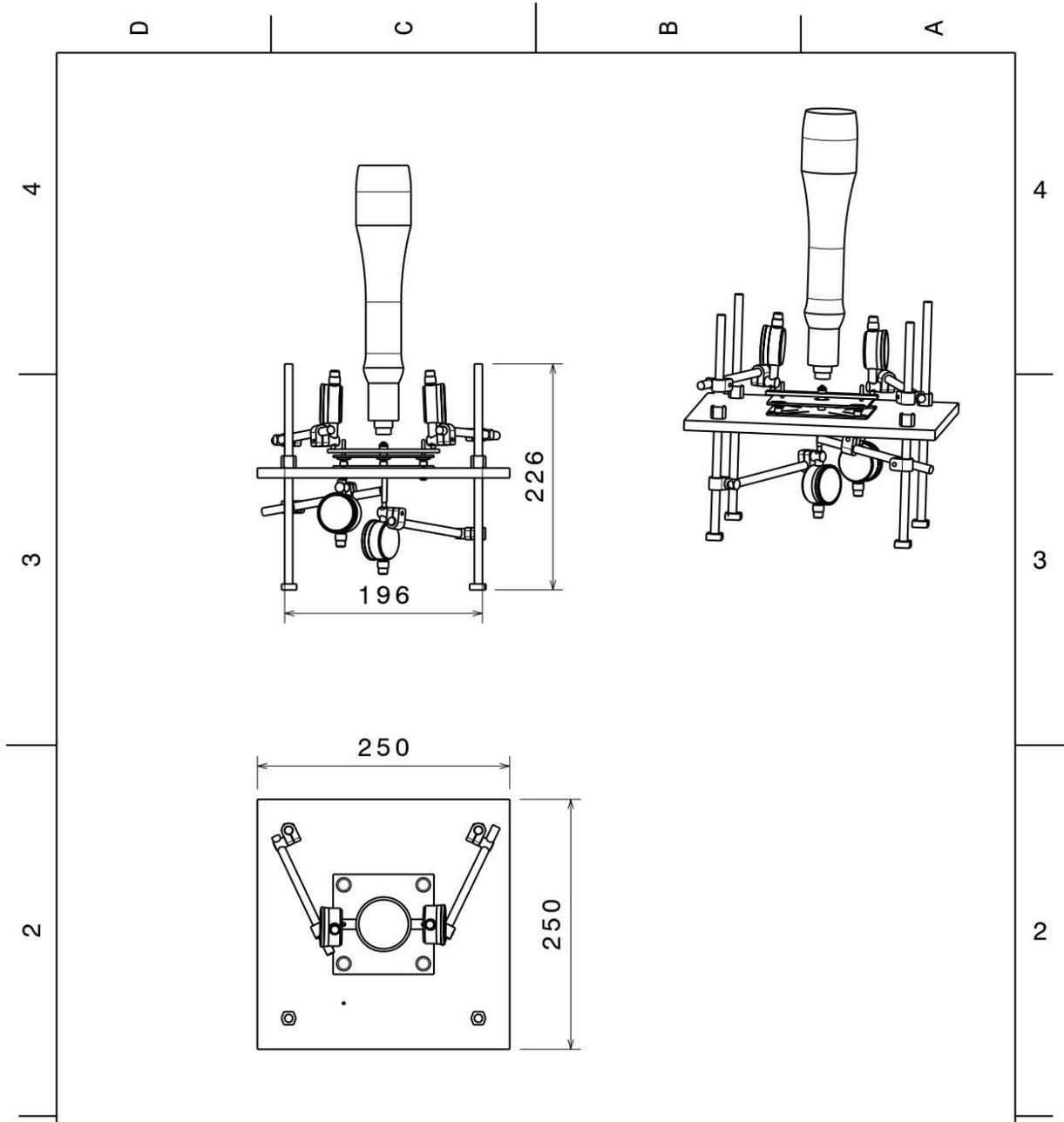
DESIGNED BY: <b>MAF4BRG</b>		I	-
DATE: <b>29/07/2021</b>		H	-
CHECKED BY: <b>XXX</b>		G	-
DATE: <b>XXX</b>		F	-
SIZE <b>A4</b>		E	-
<b>DASSAULT SYSTEMES</b>		D	-
		C	-
SCALE	WEIGHT (kg)	DRAWING NUMBER	SHEET
		<b>Washer Bottom</b>	<b>1/1</b>
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.			

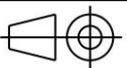


Estado de Superficie: N12 Boleados r0,2

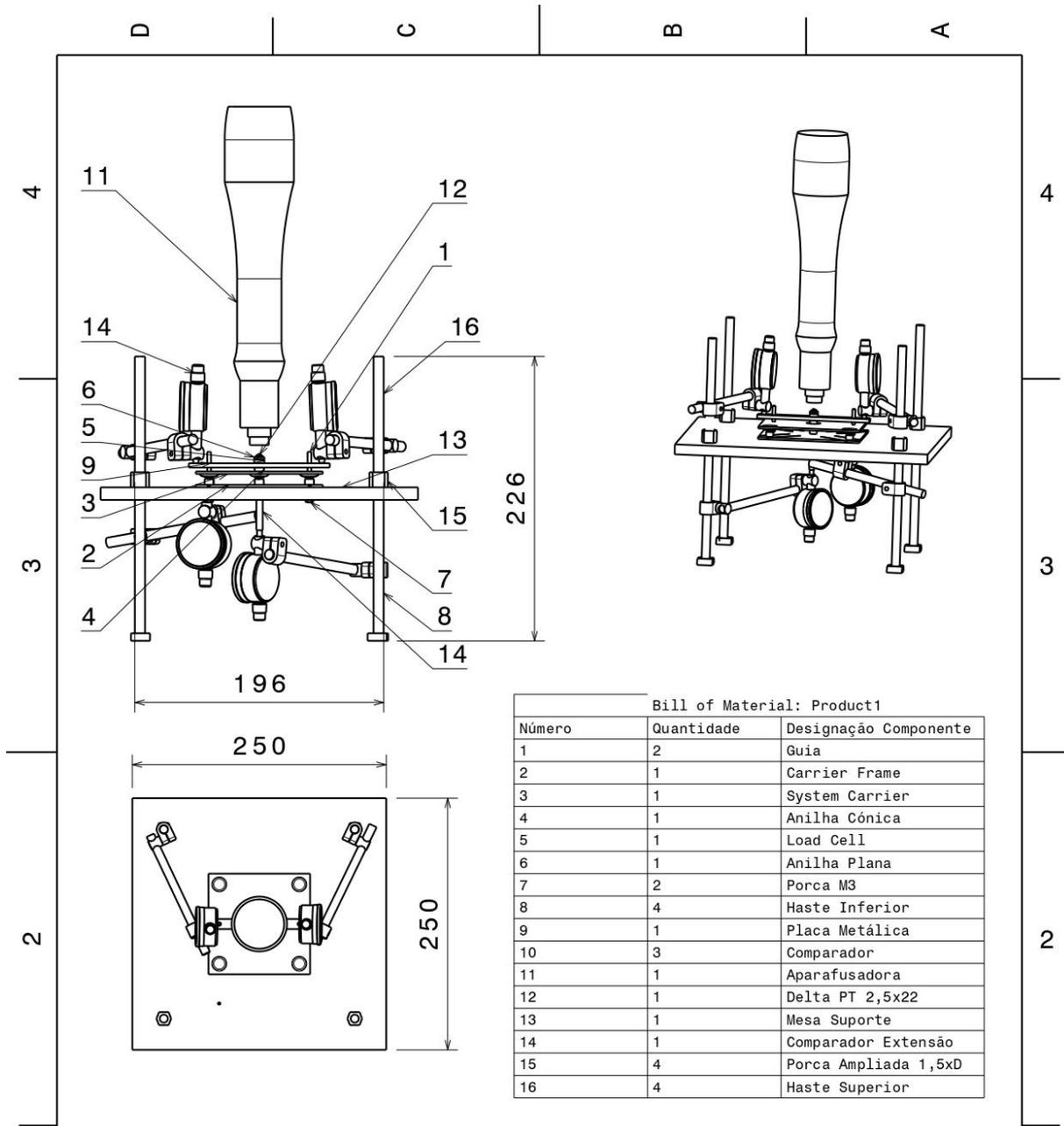
DESIGNED BY: MAF4BRG			I	-
DATE:			H	-
CHECKED BY: XXX			G	-
DATE: XXX			F	-
SIZE A4		DASSAULT SYSTEMES	E	-
SCALE	WEIGHT (kg)		D	-
	DRAWING NUMBER	Placa Metálica	C	-
			B	-
			A	-

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.



DESIGNED BY: <b>MAF4BRG</b>				I	-
DATE: <b>03/08/2021</b>				H	-
CHECKED BY: <b>XXX</b>				G	-
DATE: <b>XXX</b>				F	-
SIZE <b>A4</b>				E	-
		<b>Bosch Car Multimedia S.A</b>		D	-
SCALE	WEIGHT (kg)	DRAWING NUMBER	SHEET	C	-
		<b>Jig</b>		B	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.				A	-

D A



DESIGNED BY: <b>MAF4BRG</b>		I	-
DATE: <b>03/08/2021</b>		H	-
CHECKED BY: <b>XXX</b>		G	-
DATE: <b>XXX</b>		F	-
SIZE <b>A4</b>		E	-
<b>Bosch Car Multimedia S.A</b>		D	-
SCALE	WEIGHT (kg)	C	-
DRAWING NUMBER		B	-
<b>Jig</b>		A	-
SHEET			

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

## ANEXO V – RECOMENDAÇÕES APARAFUSAMENTO

### DELTA CALC light [v1.0]



Project name	1634310629
Creation date	15.10.2021
Editor	Francisco Marinho

#### Settings

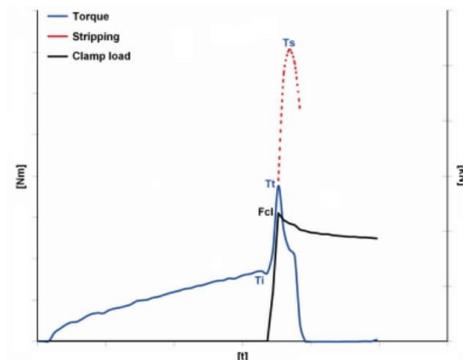
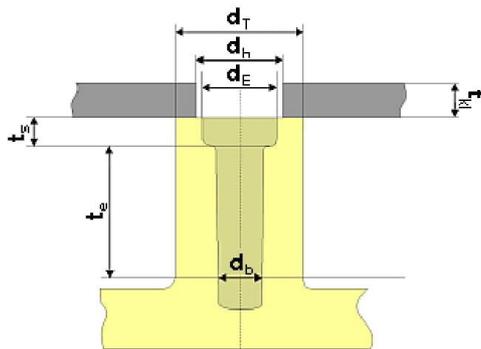
Shortcut	Long text	Unit	Value
	Head style [recess]		WN 5452 - pan head [TORX / TORX PLUS]
dk	Head diameter	mm	4.4
d1	Screw diameter	mm	2.5
	Boss material		PA12 [EOSINT P/ PA2200 (sintered)]
db	Hole diameter	mm	2
dT	External boss diameter	mm	7
ts	Counter-bore depth	mm	0.8
dE	Counter-bore diameter	mm	2.63
te	Installation depth	mm	5.36
	Clamping part material		PA12 [EOSINT P/ PA2200 (sintered)]
tkl	Clamp thickness	mm	2.84
dh	Through hole diameter	mm	2.63

#### Results

Shortcut	Long text	Unit	Value
Ti	Installation torque	Nm	0.21
Tt	Tightening torque	Nm	0.42
Ts	Stripping torque	Nm	0.64
Fcl	Clamp load at Tt	kN	0.46
Fcl_max	Clamp load at Ts	kN	0.93
	First failure mode		Screw head penetrates the clamping part

#### Recommendations

Tightening torque (Tt)	0.42 Nm
Screw	DELTA PT WN 5452 25x9



Note: The calculated values are valid only for galvanized EJOT DELTA PT® screws made of through hardened steel in accordance with the EJOT work standard at a screwdriver speed of 500 rpm ( $\pm 20\%$ ) and should be confirmed by practical experiments on series components. All information is provided without warranty and any liability is excluded. For more detailed predictions (e.g. other screws surfaces, special parts, relaxation, axial operating load, etc.), use our free calculation inquiry.

## ANEXO VI – PARÂMETROS DE APARAFUSAMENTO

EXPAND ALL ADD DELETE

**1. Step 1: Seating control step**

Step type Seating control step

---

**Step config**

Speed  50 - 750 rpm

Final tightening method  Torque  Angle

Clamp torque  0,000 - 80,00 cNm

Seating angle displacement  0 - 10800 °

Gradient trigger point  0,000 - 2000,000

Vacuum enabled  Disabled  Enabled

---

**Limits**

Min. torque  0,000 - 50,00 cNm

Max. torque  21,00 - 88,00 cNm

Min. angle  0 - 10800 °

Max. angle  0 - 10800 ° (0⇒∞)

---

**Clamp**

Min. clamp torque  0,000 - 21,00 cNm

Max. clamp torque  21,00 - 88,00 cNm

Min. clamp angle  0 - 10800 °

Max. clamp angle  0 - 10800 ° (0⇒∞)

---

**Time**

Step start delay  0,00 - 5,00 s

Min. step time  0,00 - 25,00 s

Max. step time  0,00 - 25,00 s (0⇒∞)

CHANGE TOOL TYPE TEST ACTIVATE

**2. Step 2: Torque step**

Step type Torque step

---

**Step config**

Speed  68 - 370 rpm

Target torque  20,00 - 80,00 cNm

Direction  CW  CCW

Vacuum enabled  Disabled  Enabled

---

**Limits**

Min. torque  0,000 - 42,00 cNm

Max. torque  42,00 - 88,00 cNm

Rescinding torque limit  0,000 - 80,00 cNm

Max. torque  21,00 - 88,00 cNm

Max. step time  0,00 - 25,00 s (0⇒∞)

---

Min. angle  0 - 10800 °

Max. angle  0 - 10800 ° (0⇒∞)

---

**Time**

Step start delay  0,00 - 5,00 s

Min. step time  0,00 - 25,00 s

Max. step time  0,00 - 25,00 s (0⇒∞)

---

**Triggers**

Tightening angle trigger  0,000 - 80,00 cNm

Min. tightening angle  0 - 10800 °

Max. tightening angle  0 - 10800 ° (0⇒∞)

## ANEXO VII – FOTOGRAFIAS PARTE EXPERIMENTAL

