





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Cristiano Daniel Ferreira Carvalho

Simulação numérica e verificação  
experimental do comportamento  
elástoplástico de espumas metálicas

Tese de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor Nuno Peixinho

*Em memória dos meus avós*



## **AGRADECIMENTOS**

Professor Doutor Nuno Peixinho pela orientação, apoio e esclarecimentos prestados durante este projeto.

Professor Doutor José Meireles pelo apoio prestado e por todas as ideias e incentivos prestados para a realização deste projeto.

Sr Fernando Araújo, responsável pelo Laboratório de Ensaios de Materiais, no auxílio prestado na realização de ensaios práticos.

Engenheiro Paulo Pinto, do Laboratório de Materiais Funcionais, por todo o auxílio prestado quer na conceção das espumas metálicas quer na produção dos provetes utilizados nos ensaios de tração.

Aos meus pais, ao meu irmão e aos meus avós por todo o apoio prestado na realização deste projeto.

À Catarina Fernandes pelo apoio incondicional nos últimos dias da realização deste projeto.

Engenheiro João Tavares por toda a ajuda disponibilizada na realização desta dissertação, principalmente com o Ansys.

A todos os meus colegas de curso que tornaram a minha experiência de vida académica, uma das melhores experiências da minha vida, principalmente aos “*manos belhos*” (Miguel Meira, Gustavo Ferreira, Diogo Esteves, André Ferreira, Tiago Vilaça, Vítor Santos, Vítor Carneiro, João Areias, Ricardo Magalhães, Rui Costa, Joni Gomes, Manuel Lopes, Ricardo Lima, Rafael Esteves).

Agradeço ao famoso duplex do Gustavo Ferreira e do Miguel Meira pelos bons e inúmeros momentos passados neste apartamento.

Agradeço ao Vítor Santor e Vítor Carneiro que, além da amizade, foram preponderantes na realização deste projeto.

Ao casal Jorge Guimarães e Clara Cunha por toda amizade e por todo o apoio nos momentos mais difíceis!

A todos os meus amigos de Santo Tirso e das Caldas das Taipas por todo o apoio prestado e por todos os bons momentos vividos.

A todos os membros CPTUM por todo o apoio prestado e por serem uma das minhas novas famílias.

A todos aqueles que não foram mencionados mas que tiveram impacto direto ou indireto na concretização deste projeto.

Às “meninas” D. Sandra e D. Luísa, secretárias do Departamento de Engenharia Mecânica, por todas as informações prestadas acerca da disponibilidade dos professores e outro tipo de informações.

Ao Sr Joaquim Silva, a todos os amigos dos meus pais da melhor forma defendendo o meu ponto de vista e, também, por todo o apoio transmitido.

Ao Professor Doutor Luís Ferreira da Silva que, sem o seu apoio, a realização deste projeto não seria possível.

O autor agradece o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) que financiou a componente experimental através do projeto PTDC/EME-PME/115668/2009.

## **RESUMO**

Esta dissertação de mestrado analisa o comportamento elásto-plástico de espumas metálicas à compressão, através do estudo numérico e da verificação experimental. No estado da arte são apresentados vários processos de fabrico de espumas metálicas, são apresentadas algumas propriedades mecânicas e físicas das espumas metálicas e alguns estudos numéricos realizados a espumas deste tipo.

Foram realizados ensaios experimentais de tração a provetes com o mesmo material utilizado nas espumas, que possibilita delinear o perfil deste material através de uma curva tensão-extensão. Ensaiou-se, experimentalmente, os dois tipos de espumas metálicas utilizadas no estudo, com e sem parede, permitindo uma análise comparativa entre os resultados obtidos numericamente e os obtidos experimentalmente.

Para determinar o comportamento mecânico das espumas metálicas numericamente, foi utilizado o *software* de elementos finitos *Ansys Workbench*, na opção de estudos estruturais estáticos, permitindo definir a curva carga-deslocamento para cada espuma, analisar a rigidez e energia de deformação de cada espuma e comparar estes parâmetros com os obtidos nos ensaios experimentais.

Finalmente, é realizado, também, uma análise comparativa, para um tipo de espuma em estudo, entre dois programas: *Ansys Workbench* e *CosmosWorks*.





## **ABSTRACT**

This Master Thesis analysis the elastic-plastic behavior of metal foams in compression threw the numerical study and experimental validation. In the state of the art, it's presented several manufacturing processes of metal foams, their mechanical and physical properties and some numerical studies made to them.

Experimental traction tests were made to specimens manufactured in the same material used in the metallic foams with the intention of defining a tension-extension curve. It was tested the two types of metal foams used in the study, with and without wall, permitting a comparative analyses between the results obtained numerically and experimentally.

To determine the mechanical behavior of the foams in the numerical analysis, it was used the finite elements software *Ansys Workbench*, using the "Static Structural" option. This permitted to define the load-displacement curve to each, to analyze the rigidity and energy of deformation of foams and compare these parameters with those obtained from experimental tests.

Finally, it is also performed a comparative analysis for a foam type under consideration, between two programs: *Ansys Workbench* and *CosmosWorks*.



## **PALAVRAS-CHAVE**

Análise estática não-linear

Análise elástico-plástica

Deformação elástica

Deformação plástica

Ansys

Ansys Workbench

Espumas Metálicas

Alumínio

Verificação Experimental

Simulação Numérica

## **KEYWORDS**

Non-linear Static Analysis

Elastic-Plastic

Elastic Deformation

Plastic Deformation

Ansys

Ansys Workbench

Metallic Foams

Aluminium

Experimental Verification

Numerical Simulation



## ÍNDICE

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
Abstract.....	v
Palavras-chave .....	vii
Keywords .....	vii
Índice de figuras.....	xi
Índice de tabelas .....	xvii
Nomenclatura.....	xix
1. Introdução.....	1
2. Estado da arte .....	5
2.1. Processos de fabrico .....	6
2.1.1. A partir de fundição .....	8
2.1.1.1. Expansão direta de metais .....	8
2.1.1.2. Solidificação eutética de sólido-gás.....	8
2.1.1.3. Formação da espuma metálica através de um pó compacto.....	9
2.1.1.4. Investment Casting .....	9
2.1.2. A partir de pós metálicos .....	10
2.1.2.1. Sinterização de esferas ocas .....	10
2.1.2.2. Aprisionamento de gás .....	11
2.1.2.3. Espumas a partir de suspensões.....	11
2.1.2.4. Reação por sinterização .....	12
2.1.3. A partir de partículas ionizadas .....	12
2.2. Propriedades .....	12
2.2.1. Densidade .....	13
2.2.2. Módulo de Elasticidade .....	14
2.2.2.1. Células abertas.....	15
2.2.2.2. Células fechadas .....	15
2.2.3. Térmicas .....	16
2.2.4. Acústicas.....	16
2.2.5. Elétricas .....	16
2.3. Comportamento mecânico .....	17
2.3.1. Compressão .....	17
2.3.2. Tração.....	18
2.3.3. Resistência ao impacto .....	19
2.3.4. Carregamento multiaxial .....	19
2.3.5. Anisotropia .....	20
2.4. Aplicações .....	20
2.5. Espumas de células uniforme e de células <i>dual-size</i> .....	21
2.6. Modelos constitutivos .....	22
2.6.1. Deshpande e Fleck .....	23
2.6.2. Miller.....	24
2.6.3. Schreyer para espumas de alumínio .....	25
2.6.4. Ehlers.....	26
2.6.5. Wang.....	26
2.6.6. Disponíveis no programa de cálculo Ansys .....	27
2.7. Estudos numéricos .....	30

2.7.1.	Exemplos de estudos numéricos .....	30
2.7.2.	Diferentes abordagens de simulações numéricas .....	35
3.	Análise experimental .....	37
3.1.	Tipo de espumas .....	37
3.2.	Processo de fabrico das espumas .....	38
3.3.	Determinação das propriedades do material .....	39
3.3.1.	Ensaio de tração .....	39
3.3.2.	Ensaio realizado .....	41
3.3.3.	Propriedades químicas do alumínio.....	47
3.4.	Curva a utilizar nos programas de elementos finitos.....	48
3.5.	Ensaio de compressão às espumas em estudo .....	50
3.6.	Rigidez.....	56
3.7.	Energia de deformação .....	59
3.8.	Discussão de resultados.....	61
4.	Simulação numérica .....	65
4.1.	Formulação teórica apresentada no Ansys .....	65
4.1.1.	Estruturas com geometria não-linear .....	65
4.1.2.	Não-linearidade do material .....	69
4.1.3.	Crítérios de convergência.....	73
4.1.4.	Discretização de elementos de malha .....	75
4.1.4.1.	SOLID186 .....	75
4.1.4.2.	SOLID187 .....	76
4.2.	Validação do Ansys .....	76
4.2.1.	Descrição do problema .....	76
4.2.2.	Cálculo analítico .....	79
4.2.3.	Cálculo numérico.....	80
4.2.4.	Discussão de resultados .....	86
4.3.	Implementação .....	86
4.3.1.	Curva do material .....	87
4.3.2.	Geometria .....	88
4.3.3.	Malha.....	88
4.3.4.	Condições de fronteira .....	90
4.3.5.	Obtenção de resultados .....	91
4.3.6.	Exposição e discussão de resultados.....	92
4.3.6.1.	Comportamento elásto-plástico das espumas.....	94
4.3.6.2.	Rigidez .....	99
4.3.6.3.	Energia de deformação .....	100
5.	Conclusões e desenvolvimentos futuros .....	101
6.	Bibliografia .....	105
A.	Anexos .....	107

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Espuma de alumínio de células: a) uniformes e b) <i>dual-size</i> .....	2
Figura 2.1 – Exemplo de uma espuma metálica de estrutura celular fechada [6].....	5
Figura 2.2 – Exemplo de uma espuma metálica de estrutura celular aberta [7] .....	5
Figura 2.3 – Diferença de algumas propriedades das espumas metálicas comparadas com outros tipos de materiais [9].....	6
Figura 2.4 – Processos de fabrico mais importantes de espumas metálicas [10].....	7
Figura 2.5 – Variação da densidade relativa e do tamanho da célula da espuma para diferentes processos de fabrico [9] .....	7
Figura 2.6 – Método de expansão direta através da injeção de gás [10] .....	8
Figura 2.7 – Exemplo de aplicação de uma espuma metálica produzida pelo método Gasar [10].....	9
Figura 2.8 – Painel leve em sandwich de espuma de alumínio e aço [6].....	9
Figura 2.9 – Representação esquemática do processo de fundição por cera perdida [12] .....	10
Figura 2.10 – Exemplo de uma espuma metálica obtida por sinterização de esferas ocas [13] .....	11
Figura 2.11 – Técnica de aprisionamento de gás [10].....	11
Figura 2.12 – Bronze poroso sinterizado feito através de partículas com cerca de 100 $\mu$ m de diâmetro [10].....	12
Figura 2.13 – Exemplo de uma microestrutura (100 $\mu$ m) de uma espuma metálica obtida por PVD [14] .....	12
Figura 2.14 – Representação dos volumes da estrutura de um material celular [9].....	13
Figura 2.15 – Relação entre o módulo de elasticidade e a densidade para diferentes tipos de espumas metálicas [9] .....	14
Figura 2.16 – Estrutura celular aberta segundo <i>Ashby e Gibson</i> [9] .....	15
Figura 2.17 – Estrutura celular fechada [9].....	15
Figura 2.18 – Curva típica tensão-extensão de uma espuma metálica à compressão [9].....	17
Figura 2.19 – Curva típica tensão-extensão de uma espuma metálica à tração [9].....	18
Figura 2.20 – Exemplo de uma espuma à compressão com carregamento dinâmico [15] .....	19
Figura 2.21 – Relação entre o tipo de porosidade da espuma e o tipo de aplicação [6].....	21
Figura 2.22 – Estrutura compactada com arranjo de ligações numa estrutura uniforme de célula aberta [16].....	21
Figura 2.23 – Estrutura compactada com arranjo de ligações numa estrutura <i>dual-size</i> de célula aberta [16].....	22
Figura 2.24 – Influência do fator $\alpha$ na superfície de cedência [17].....	24
Figura 2.25 – Influência dos vários parâmetros no modelo [18] .....	27
Figura 2.26 – a) Início do crescimento dos vazios; b) novos vazios formados na deformação plástica [19].....	28
Figura 2.27 – Modelação geométrica da coluna preenchida de espuma metálica [20] .....	31
Figura 2.28 – Padrão de deformação da interface parede-espuma: a) Simulação numérica; b) Experimental [20] .....	31
Figura 2.29 – Resposta da força de compressão [20] .....	31
Figura 2.30 – Micrografia da estrutura da espuma de alumínio [15].....	32
Figura 2.31 – Malha de elementos finitos do modelo da espuma metálica de células abertas [15].....	32
Figura 2.32 – Curva tensão-deformação do modelo à compressão [15].....	33
Figura 2.33 – Geometria da coluna: a)Secção transversal da coluna <i>top-hat</i> ; b) Secção transversal da coluna <i>double-hat</i> ; c) Ponto de soldadura numa coluna <i>double-hat</i> [21].....	33

Figura 2.34 – Diagrama das três zonas existentes na espuma metálica numa solicitação ao impacto [21].....	33
Figura 2.35 – Efeito da interação do carregamento do conjunto espuma metálica e coluna [21] .....	34
Figura 2.36 – Modelo de elementos finitos do martelo de impacto e da espuma de alumínio [22] .....	34
Figura 2.37 – Variação da fração de energia elástica em função da velocidade de impacto [22] .....	35
Figura 2.38 – Variação da reação da força em função do tempo e do deslocamento para uma densidade da espuma de 600 kg/m <sup>3</sup> [22].....	35
Figura 3.1 – Modelo da espuma de alumínio de células uniformes: a)real; b)CAD.....	37
Figura 3.2 – Modelo da espuma de alumínio de células <i>dual-size</i> : a)real; b)CAD.....	37
Figura 3.3 – Etapas da fundição por cera perdida das espumas metálicas utilizadas neste estudo.....	38
Figura 3.4 – Comportamento típico de um provete num ensaio de tração [23] .....	39
Figura 3.5 – Curva típica tensão-deformação de um material [24].....	40
Figura 3.6 – Provetes de alumínio utilizados na primeira tentativa .....	41
Figura 3.7 – Curvas tensão-deformação para os três provetes da primeira tentativa.....	41
Figura 3.8 – Provetes de alumínio maquinados.....	42
Figura 3.9 – Curvas tensão-deformação para os provetes da segunda tentativa .....	42
Figura 3.10 – Comportamento elástico do 2º provete e respetiva linha de tendência .....	43
Figura 3.11 – Provetes de alumínio utilizados na terceira tentativa .....	44
Figura 3.12 – Sistema de amarração e colocação do extensómetro num provete terceira tentativa ....	44
Figura 3.13 – Estado dos provetes após o ensaio de tração .....	44
Figura 3.14 – Ilustração das porosidades existentes nos provetes .....	45
Figura 3.15 – Curvas tensão-deformação para os provetes da terceira tentativa.....	45
Figura 3.16 – Cálculo do módulo de elasticidade para o primeiro provete da terceira tentativa.....	46
Figura 3.17 – Cálculo da tensão de cedência para o primeiro provete da terceira tentativa .....	47
Figura 3.18 – Variação do módulo de elasticidade com a percentagem de elementos de liga em ligas de alumínio [35].....	48
Figura 3.19 – Comparação entre as curvas tensão-extensão real e de engenharia [36].....	49
Figura 3.20 – Comparação entre a curva nominal e a curva real do provete ensaiado .....	50
Figura 3.21 – Disposição das espumas no ensaio à compressão: a)Uniforme e b) <i>Dual-size</i> .....	51
Figura 3.22 – Estado final da espuma uniforme no ensaio de compressão .....	51
Figura 3.23 – Curva carga-deslocamento da espuma uniforme à compressão .....	52
Figura 3.24 – Estado final da espuma <i>dual-size</i> no ensaio de compressão .....	52
Figura 3.25 – Curva carga-deslocamento da espuma <i>dual-size</i> à compressão .....	53
Figura 3.26 – Comparação entre as curvas carga-deslocamento experimentais das espumas uniforme e <i>dual-size</i> .....	53
Figura 3.27 – Espuma de células uniformes sem parede .....	54
Figura 3.28 – Curvas carga-deslocamento das espumas de células uniformes sem parede.....	54
Figura 3.29 – Estado final da espuma de células uniformes sem parede .....	55
Figura 3.30 – Espuma de células <i>dual-size</i> sem parede .....	55
Figura 3.31 – Curvas carga-deslocamento das espumas de células <i>dual-size</i> sem parede.....	55
Figura 3.32 – Comparação entre uma espuma de células uniformes e uma espuma <i>dual-size</i> .....	56
Figura 3.33 – Cálculo gráfico da rigidez da espuma de alumínio de células uniformes na análise experimental .....	57
Figura 3.34 – Cálculo da energia de deformação [27].....	59
Figura 3.35 – Área representativa da energia de deformação da espuma metálica de células uniformes .....	59
Figura 3.36 – Gesso no interior da espuma <i>dual-size</i> .....	62
Figura 4.1 – Vetor posição e movimento de um corpo deformável [19].....	66



Figura 4.2 – Decomposição polar da deformação de Hencky [19] .....	67
Figura 4.3 – Comportamento tensão-deformação para cada uma das opções de plasticidade [19] ....	70
Figura 4.4 – Várias Superfícies de cedência [19].....	71
Figura 4.5 – Tipos de regras de encruamento [19].....	72
Figura 4.6 – Solução Newton-Raphson para uma iteração [19].....	74
Figura 4.7 – Procedimento do <i>Método Incremental Newton-Raphson</i> [19] .....	74
Figura 4.8 – Elemento SOLID186 [28].....	75
Figura 4.9 – Elemento SOLID187 [28].....	76
Figura 4.10 – Viga utilizada para validação do <i>software</i> [29] .....	77
Figura 4.11 – Distribuição de tensões na zona: a) Elástica, b)Elástico-Plástica e c)Plástica [30] .....	77
Figura 4.12 – Curva tensão-extensão do material da viga [29].....	78
Figura 4.13 – Área de secção transversal de uma viga retangular [27] .....	79
Figura 4.14 – Representação da espessura do núcleo elástico [30].....	80
Figura 4.15 – Propriedades do material utilizado no exercício inseridas na base de dados do Ansys <i>Workbench</i> .....	81
Figura 4.16 – Curva tensão-extensão do material inserido no Ansys .....	81
Figura 4.17 – Viga desenhada no Ansys <i>Workbench</i> .....	82
Figura 4.18 – Distribuição da malha ao longo da viga .....	82
Figura 4.19 – Aplicação das condições de fronteira na viga.....	82
Figura 4.20 – Aplicação do momento fletor de 24 000 lbf.in na viga .....	83
Figura 4.21 – Aplicação de um momento fletor no eixo dos <i>zz</i> .....	83
Figura 4.22 – Distribuição de tensões ao longo da viga para um momento fletor de 24 000 lbf.in.....	83
Figura 4.23 – Gráfico tensão-tempo para o momento fletor de 24 000 lbf.in .....	84
Figura 4.24 – Distribuição de tensões ao longo da viga para um momento fletor de 30 000 lbf.in.....	84
Figura 4.25 – Gráfico tensão-tempo para o momento fletor de 30 000 lbf.in .....	85
Figura 4.26 – Resultados obtidos para um momento fletor de 36 000 lbf.in .....	85
Figura 4.27 – Gráfico tensão-tempo para o momento fletor de 36 000 lbf.in .....	85
Figura 4.28 – Propriedades do alumínio utilizado nas espumas inseridas no Ansys .....	87
Figura 4.29 – Curva real que define o domínio plástico do alumínio das espumas .....	87
Figura 4.30 – Geometria exportada do <i>SolidWorks</i> para o Ansys <i>Workbench</i> .....	88
Figura 4.31 – Malha obtida na espuma de células uniformes .....	89
Figura 4.32 – Malha obtida na espuma <i>dual-size</i> .....	89
Figura 4.33 – Diferença entre as malhas obtidas nas espumas: a) Uniforme; b) Dual-Size .....	90
Figura 4.34 – Aplicação da carga na espuma uniforme .....	90
Figura 4.35 – Aplicação das restrições na espuma uniforme .....	91
Figura 4.36 – Medição da deformação das espumas .....	92
Figura 4.37 – Exemplo de uma curva carga-deslocamento [31].....	93
Figura 4.38 – Convergência dos passos para a espuma uniforme .....	93
Figura 4.39 – Convergência dos passos para a espuma <i>dual-size</i> .....	93
Figura 4.40 – Deslocamento da espuma uniforme ao longo do eixo dos <i>zz</i> .....	94
Figura 4.41 – Curva carga-deslocamento numérica da espuma uniforme obtida no Ansys <i>Workbench</i> .....	95
Figura 4.42 – Comparação dos resultados numéricos obtidos no Ansys e no <i>CosmosWorks</i> .....	95
Figura 4.43 – Comparação das malhas obtidas nos dois programas: a) Ansys; b) <i>CosmosWorks</i> .....	96
Figura 4.44 – Comparação entre os resultados experimentais e os numéricos para a espuma uniforme .....	96
Figura 4.45 – Deslocamento da espuma <i>dual-size</i> ao longo do eixo dos <i>yy</i> .....	97
Figura 4.46 – Curva carga-deslocamento numérica da espuma <i>dual-size</i> no Ansys.....	98

Figura 4.47 – Comparação das curvas carga-deslocamento numéricas da espuma <i>dual size</i> .....	98
Figura 4.48 – Comparação das curvas carga-deslocamento numéricas das espumas uniforme e <i>dual size</i> .....	99
Figura A.1 – Variação do módulo de elasticidade e do alongamento com a temperatura [33].....	113
Figura A.2 – Espaço de tensões [34] .....	122
Figura A.3 – Curva típica tensão-deformação de modelo material não-linear [34].....	123
Figura A.4 – Controlo da força [34].....	124
Figura A.5 – Controlo de deslocamentos [34].....	125
Figura A.6 – Controlo por “arc-length” [34].....	125
Figura A.7 – a) Falha do critério da força e b) Falha do critério de deslocamentos [34].....	126
Figura A.8 – Falha dos critérios da força e deslocamento [34].....	126
Figura A.9 – Método iterativo de Newton-Raphson [34] .....	127
Figura A.10 – Método de Newton-Raphson modificado [34].....	128
Figura A.11 – a) Superfície média de uma folha de metal é realçada b)Elemento casca criado pela superfície média com os nós [34] .....	128
Figura A.12 – Representação do elemento casca [34].....	129
Figura A.13 – Escolha do tipo de estudo numérico .....	133
Figura A.14 – Escolha do material para os componentes .....	133
Figura A.15 – Caracterização do material da espuma .....	134
Figura A.16 – Curva tensão-extensão inserida no programa.....	134
Figura A.17 – Escolha do material para os apoios utilizados no estudo .....	135
Figura A.18 – Aplicação das condições de fronteira.....	135
Figura A.19 – Aplicação da carga.....	136
Figura A.20 – Parâmetros da malha gerados no programa .....	136
Figura A.21 – Malha gerada pelo <i>software</i> .....	137
Figura A.22 – Inserção do número de iterações no <i>CosmosWorks</i> .....	137
Figura A.23 – Ativação da opção da análise dos resultados em todos os passos .....	138
Figura A.24 – Deslocamento final do componente em estudo.....	138
Figura A.25 – Inserir novo gráfico com a deslocamento medida em cada passo da análise .....	139
Figura A.26 – Inserir novo gráfico com a reação da força medida em cada passo da análise .....	139
Figura A.27 – Ambiente de trabalho do Ansys <i>Workbench</i> .....	143
Figura A.28 – Janela do projeto .....	143
Figura A.29 – Janela de escolha dos materiais e de inserção das propriedades .....	144
Figura A.30 – Ícone de acesso à biblioteca (direita) .....	144
Figura A.31 – Lista de bibliotecas disponibilizadas pelo Ansys <i>Workbench</i> .....	144
Figura A.32 – Listagem dos materiais existentes na livreria “ <i>General Non-linear Materials</i> ” .....	145
Figura A.33 – Inserir novo material no Ansys <i>Workbench</i> .....	146
Figura A.34 – Botão que permite regressar ao ambiente de trabalho do Ansys <i>Workbench</i> .....	146
Figura A.35 – Ferramentas de desenho disponíveis no <i>DesignModeler</i> .....	147
Figura A.36 – Passos para importar geometrias .....	147
Figura A.37 – Janela de detalhes de geometria .....	148
Figura A.38 – Ícone que permite gerar a geometria exportada .....	148
Figura A.39 – Aspeto geral da plataforma <i>Multiphysics</i> do Ansys <i>Workbench</i> .....	148
Figura A.40 – Janela com detalhes do conjunto de componentes em análise .....	149
Figura A.41 – Janela com os detalhes da ligação .....	150
Figura A.42 – Detalhes da malha.....	150
Figura A.43 – Ativar da opção “ <i>Large Deflection</i> ”, inserir número de passos na análise e outros parâmetros para a análise .....	151

Figura A.44 – Aplicação da carga.....	152
Figura A.45 – Escolha das condições de fronteira .....	152
Figura A.46 – Detalhes da opção “ <i>Fixed Support</i> ” .....	152
Figura A.47 – Detalhes da opção “ <i>Remote Displacement</i> ” .....	153
Figura A.48 – Escolha do tipo de soluções .....	153
Figura A.49 – Ativar a opção “ <i>Probe</i> ” .....	153
Figura A.50 – Detalhes da opção “ <i>Deformation Probe</i> ” .....	154
Figura A.51 – Detalhes da opção “ <i>Force Reaction</i> ” .....	154
Figura A.52 – Botão “ <i>Solve</i> ” .....	154
Figura A.53 – Janela de informação do ensaio em decurso .....	155
Figura A.54 – Comportamento da convergência da força .....	155
Figura A.55 – Valores obtidos, para cada passo, na opção “ <i>Deformation Probe</i> ” .....	156
Figura A.56 – Exportação dos dados.....	156



## **ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 1 – Dimensões dos provetes para ensaios de tração .....	43
Tabela 2 – Módulos de elasticidade dos provetes da terceira tentativa .....	46
Tabela 3 – Alongamento à rotura e tensões de cedência e rutura dos provetes da terceira tentativa... 47	47
Tabela 4 – Propriedades químicas do alumínio A413.1 [25].....	47
Tabela 5 – Propriedades do alumínio inseridas nos programas de elementos finitos .....	49
Tabela 6 – Valores da rigidez das espumas metálicas com e sem parede.....	57
Tabela 7 – Massa dos dois tipos de espumas com e sem parede .....	58
Tabela 8 – Rigidez específica das espumas metálicas ensaiadas experimentalmente .....	58
Tabela 9 – Valores da energia e da energia específica das espumas com e sem parede .....	60
Tabela 10 – Sumário das opções plásticas [19] .....	72
Tabela 11 – Propriedades do material utilizado na viga [28].....	78
Tabela 12 – Comparação dos resultados do cálculo analítico e do cálculo numérico.....	86
Tabela 13 – Valores da rigidez e rigidez específica dos ensaios experimentais e numéricos .....	99
Tabela 14 – Massas das espumas ensaiadas numericamente.....	100
Tabela 15 – Valores da energia e da energia específica das espumas ensaiadas numericamente e experimentalmente .....	100
Tabela 16 – Propriedades típicas de um ensaio de tração para uma liga A413.1 fundida a diferentes temperaturas [33] .....	113
Tabela 17 – Pontos da curva de plasticidade utilizados nos programas de elementos finitos .....	117



## NOMENCLATURA

Símbolo	Definição	Unidade [S.I.]
$\rho$	Densidade	kg/m <sup>3</sup>
$V$	Volume	m <sup>3</sup>
$m$	Massa	kg
$E$	Módulo de Elasticidade	GPa
$a$	Distância entre dois centros adjacentes das ligações largas de uma espuma	m
$R$	Raio das ligações largas de uma espuma	m
$r$	Raio das ligações secundárias de uma espuma	m
$\sigma$	Tensão	MPa
$P$	Carga ou Força	N
$A_0$	Área Útil	m <sup>2</sup>
$\varepsilon$	Extensão	-
$l$	Comprimento Final	m
$l_0$	Comprimento Inicial	m
$\bar{\sigma}$	Tensão Verdadeira	MPa
$\bar{\varepsilon}$	Extensão Verdadeira	-

$\nu$	Coeficiente de <i>Poisson</i>	-
L	Comprimento da Barra	m
b	Largura da Barra	m
h	Altura da Barra	m
c	Metade da Altura da Barra	m
$\sigma_{yp}$	Tensão de Cedência da Barra	MPa
$M_y$	Momento de Cedência	Nm
$M_p$	Momento Plástico	Nm
$M$	Momento Aplicado	Nm
$\kappa$	Rigidez	N/m
$\dot{\kappa}$	Rigidez por Unidade de Massa	N/mg
$\delta$	Deslocamento	m
$U$	Energia de Deformação	J
$\dot{U}$	Energia de Deformação por Unidade de Massa	J/g



## **1. INTRODUÇÃO**

As espumas metálicas são uma nova gama de materiais ainda em desenvolvimento, com excelentes potencialidades devido à sua ótima relação peso/resistência o que demonstra uma excelente potencialidade no desenvolvimento, concepção e produção de peças e componentes para a indústria dos transportes, como por exemplo o setor automóvel que é onde se verifica os maiores desenvolvimentos neste tipo de indústria visto que a sua elevada capacidade de absorção de energia e a sua baixa densidade aumentam a segurança passiva e reduzem os consumos de combustível dos veículos, respetivamente.

A redução de peso dos veículos é um dos fatores mais importantes na indústria dos transportes uma vez que com a sua diminuição os consumos de combustíveis também diminuem. Contudo, a diminuição de peso do veículo não pode reduzir a segurança dos passageiros o que significa que os materiais utilizados na concepção dos mesmos não podem interferir na segurança do veículo. Desta forma, é importante determinar corretamente o comportamento e propriedades dos materiais a utilizar nos veículos.

Uma das grandes potencialidades das espumas metálicas é o seu comportamento à compressão que, para solicitações de impacto é um fator determinante. Através desta nova gama de materiais é possível reduzir o peso dos veículos e os consumos de combustível que são dois dos fatores preponderantes na seleção de materiais para um veículo. Porém, para a utilização das espumas metálicas em veículos de transporte é obrigatório estudar detalhadamente o seu comportamento à compressão.

Existem diversas propriedades que caracterizam as espumas metálicas, nomeadamente a baixa densidade, a elevada resistência ao impacto e a elevada capacidade de amortecimento de ruído e vibrações. Como a principal aplicação das espumas metálicas é no setor dos transportes e, como as solicitações a que estas estão sujeitas são maioritariamente esforços de tração ou compressão, é importante avaliar corretamente o comportamento mecânico deste tipo de espumas.

As espumas metálicas surgem num contexto competitivo com ligas leves utilizadas na indústria dos transportes com o intuito de reduzir os custos de produção dos veículos e com o intuito de reduzir ainda mais o peso dos mesmos. Nesta nova gama de materiais, existem diversos tipos de espumas metálicas que variam consoante o tipo de geometria celular, sendo normalmente divididas em dois grandes grupos: espumas metálicas de célula aberta e espumas metálicas de célula fechada. Consoante o tipo de estrutura das espumas metálicas, o de processo de fabrico e o material adotados para a concepção destas, as suas propriedades mecânicas variam consideravelmente o que traduz uma elevada complexidade na avaliação do comportamento mecânico desta nova gama de materiais.

As espumas metálicas escolhidas para este estudo são de célula aberta produzidas em alumínio A413.1, com dois tipos diferentes de arranjo de células das espumas metálicas (uniforme e *dual-size*). A figura 1.1 mostra as espumas de alumínio utilizadas neste estudo.

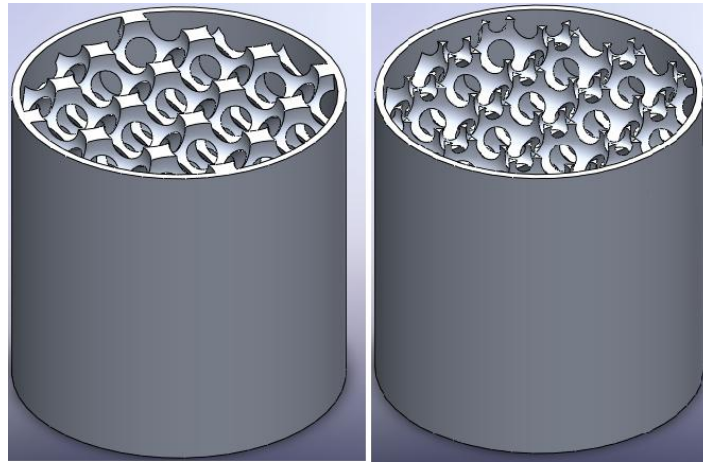


Figura 1.1– Espuma de alumínio de células: a) uniformes e b) *dual-size*

É importante determinar e comparar corretamente o comportamento à compressão destes dois tipos de espumas metálicas para avaliar a sua empregabilidade em componentes sujeitos a solicitações de impacto, como por exemplo, as longarinas de um automóvel.

O objetivo deste projeto é analisar numericamente o comportamento mecânico à compressão de dois tipos de espumas de alumínio de célula aberta, as de células uniformes e as de células *dual-size* e, posteriormente, verificar experimentalmente os resultados obtidos em que para a análise numérica deve ser utilizado o programa de elementos finitos *Ansys Workbench*. Outro objetivo é comparar uma análise numérica de uma espuma metálica de células uniformes entre o *Ansys Workbench* e o *CosmosWorks*. Finalmente, para caracterizar mecanicamente as espumas metálicas através de um carregamento elásto-plástico devem ser analisadas as curvas carga-deslocamento resultantes dos ensaios numéricos experimentais realizados em que através destas curvas deve ser analisada a rigidez e a energia de deformação de cada espuma metálica. Através desta análise é possível determinar corretamente o comportamento elásto-plástico de espumas de alumínio com um determinado arranjo de células, ou seja, é pretendido uma caracterização quantitativa e posterior comparação do comportamento à compressão dos dois tipos de espumas metálicas utilizados no estudo.

Ao longo desta dissertação, no capítulo 2 são apresentados os processos de fabrico mais utilizados no fabrico de espumas metálicas, para espumas metálicas de células abertas e para espumas metálicas de células fechadas. São apresentadas algumas propriedades mecânicas e físicas das espumas metálicas, como por exemplo, a densidade, o módulo de elasticidade, propriedades acústicas e elétricas e é analisado o comportamento mecânico de espumas metálicas, para diferentes tipos de

carregamento. São apresentadas algumas aplicações das espumas metálicas. Neste capítulo, também é realizada a distinção entre espumas metálicas de células uniformes e células *dual-size*, bem como são apresentados estudos numéricos realizados por outros investigadores de espumas metálicas.

No capítulo 3 é apresentada toda a análise experimental realizada neste projeto. São apresentados os ensaios de tração realizados a provetes com o mesmo alumínio utilizado nas espumas metálicas (material base) permitindo determinar o comportamento do material. São apresentadas, também, algumas propriedades da liga de alumínio utilizada na conceção das espumas metálicas e são apresentados os ensaios experimentais realizados aos dois tipos de espumas metálicas, com e sem parede exterior, em análise bem como é analisado o comportamento das espumas metálicas através de uma análise à rigidez e à energia de deformação destas.

No capítulo 4, inicialmente, é apresentada a formulação utilizada pelo *software* utilizado na caracterização mecânica das espumas e é efetuada uma validação do programa de elementos finitos utilizado através de um problema de flexão clássico. Posteriormente, é demonstrada toda a implementação e todos os passos adotados na análise numérica, são exibidos, debatidos e comparados os resultados obtidos numericamente com os obtidos experimentalmente.

Finalmente, o último capítulo da dissertação diz respeito às conclusões da tese, onde se debate todas as ideias retiradas ao longo deste projeto e são apresentadas propostas de novos estudos e desenvolvimentos para melhoria das espumas metálicas estudadas.



## 2. ESTADO DA ARTE

As espumas metálicas surgem como uma nova gama de materiais com excelentes potencialidades devido à sua excelente relação resistência/densidade. A sua produção é realizada por uma diversa gama de processos inovadores, muitos dos quais ainda estão em desenvolvimento. [1]

Outras características deste tipo de espumas, que levam a que a sua aposta seja cada vez maior são a excelente resistência ao fogo, capacidade de absorção de som e de reciclagem. O inconveniente deste tipo de material é o elevado custo do seu processo de fabrico e produção. [2]

A primeira patente de um processo de fabrico de uma espuma metálica foi registada em 1948 nos Estados Unidos por *Benjamin Sosnik* denominada por “*Process For Making Foamlike Mass Of Metal*”. [3]

Devido à sua baixa densidade, elevada resistência e excelente capacidade de absorção de energia à compressão, a utilização de espumas metálicas em solicitações de impacto tem aumentado com o objetivo de aumentar a segurança passiva. Devido a este excelente comportamento, existe necessidade de uma melhoria continua e a obrigação em refinar os seus processos de fabrico e produção, além da necessidade de as caracterizar mecanicamente. [4]

As espumas metálicas podem ser distinguidas de duas formas quanto à sua estrutura celular – abertas (figura 2.1) ou fechadas (figura 2.2). O comportamento mecânico e o tipo de aplicação alteram consoante o tipo de estrutura das espumas metálicas. As espumas metálicas de célula fechada são utilizadas maioritariamente na indústria de transportes devido à sua resistência e capacidade de amortecimento de vibrações. [5]

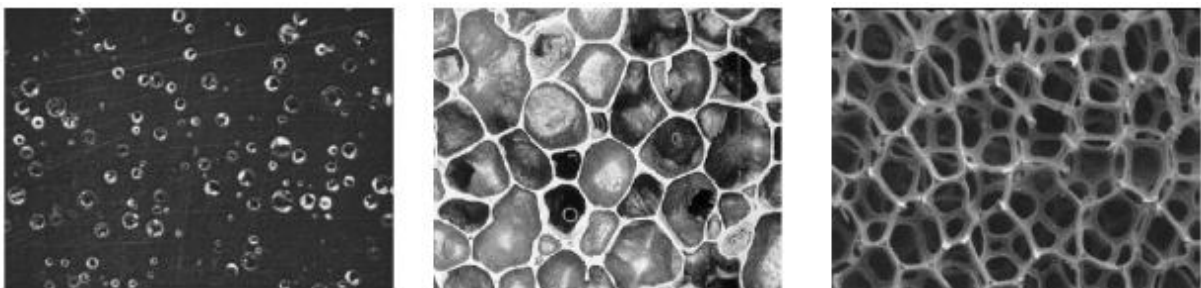


Figura 2.1 – Exemplo de uma espuma metálica de estrutura celular fechada [6]



Figura 2.2 – Exemplo de uma espuma metálica de estrutura celular aberta [7]

O comportamento mecânico das espumas metálicas depende da estrutura das células, da densidade e das propriedades do material base de que são feitas. A eficiência obtida na utilização de espumas metálicas em aplicações estruturais requer uma caracterização detalhada do comportamento da sua deformação para vários carregamentos e diferentes geometrias. O tamanho e a forma das células ou poros determinam as suas propriedades, ou seja, o comportamento destas depende da forma como o sólido se distribui na estrutura porosa. [8]

A figura 2.3 compara as propriedades de diferentes materiais com as espumas metálicas, salientando-se a sua baixa densidade em relação a materiais diferentes.

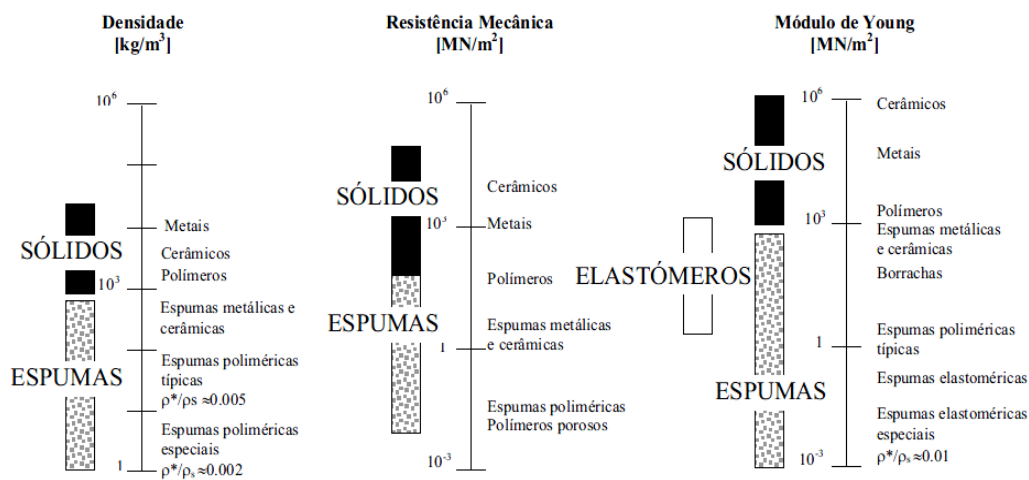


Figura 2.3 – Diferença de algumas propriedades das espumas metálicas comparadas com outros tipos de materiais [9]

## 2.1. Processos de fabrico

Existem diversas formas de fabricar espumas metálicas. Algumas técnicas utilizam processos idênticos às espumas poliméricas, enquanto outras utilizam técnicas inovadoras tirando partido de propriedades características de metais.

Os vários métodos são classificados através da forma que o metal é processado, como é representado na figura 2.4.

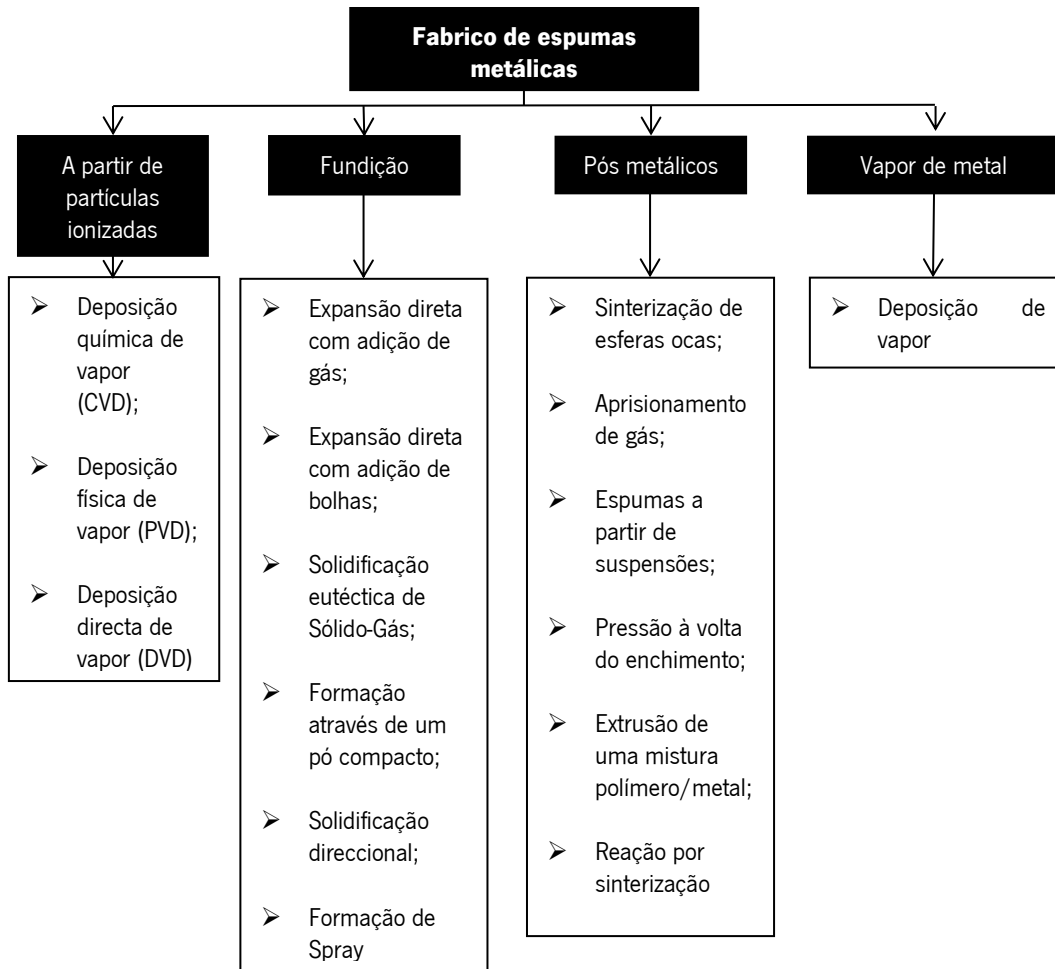


Figura 2.4 – Processos de fabrico mais importantes de espumas metálicas [10]

Dependendo do processo de fabrico, é possível obter diferentes estruturas, diferenciando-se em estruturas abertas ou fechadas. A relação entre os diferentes processos de fabrico e a densidade relativa das espumas metálica está representado na figura 2.5.

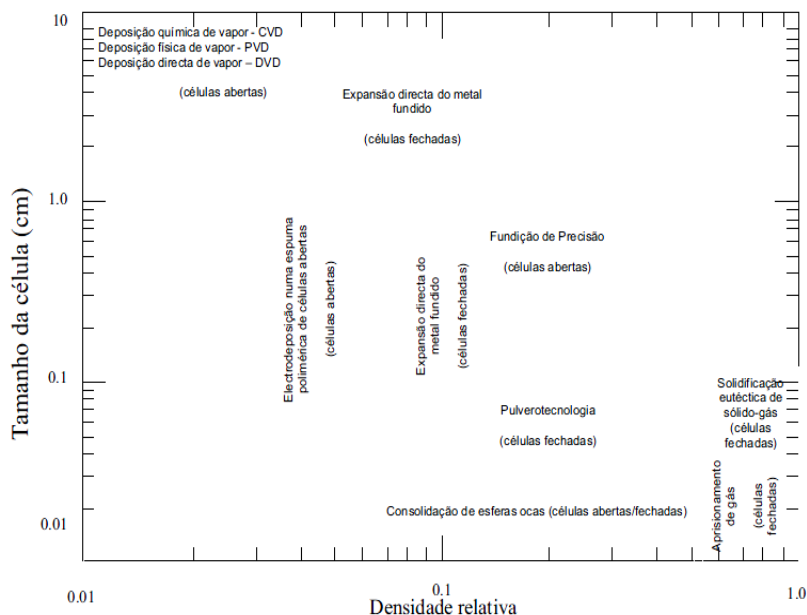


Figura 2.5 – Variação da densidade relativa e do tamanho da célula da espuma para diferentes processos de fabrico [9]

### 2.1.1. A PARTIR DE FUNDIÇÃO

O primeiro grupo de processos de fabrico de espumas metálicas é caracterizado pelo uso de metal líquido, ou seja, através de um processo de fundição. O metal poroso obtido através da injeção de gás diretamente no metal fundido ou através de um agente expensor permite produzir espumas metálicas a partir de métodos indiretos. Dois destes métodos são o uso de uma espuma polimérica ou de materiais sólidos de enchimento que garantam um determinado espaço entre poros para a formação da espuma metálica final após o vazamento do metal líquido. [9]

#### 2.1.1.1. Expansão direta de metais

O processo de expansão direta de metais consiste em obter as espumas metálicas por injeção de gás, criando bolhas no interior do metal líquido, ou através da adição de um agente expensor. Normalmente, as bolhas de gás que são formadas numa massa fundida metálica tendem a aumentar rapidamente a sua superfície devido às forças de flutuação elevadas existentes no líquido de alta densidade, podendo estas rebentar antes de atingir a superfície do metal. Este aumento de tamanho pode ser contrariado pelo aumento da viscosidade do metal fundido com a adição de pós cerâmicos finos ou elementos de liga. Este processo foi sujeito a diversas tentativas para a obter espumas metálicas, mas não é usado por uma questão de inviabilidade económica do processo. [10]

Atualmente existem dois métodos para se obter espumas metálicas através da expansão direta do metal líquido. Um método é através da injeção de gás no interior do metal líquido a partir de uma fonte externa (figura 2.6). O outro é provocar a formação de gás no líquido por adição de uma mistura de gás com agentes de sopro para libertar o metal fundido. [10]

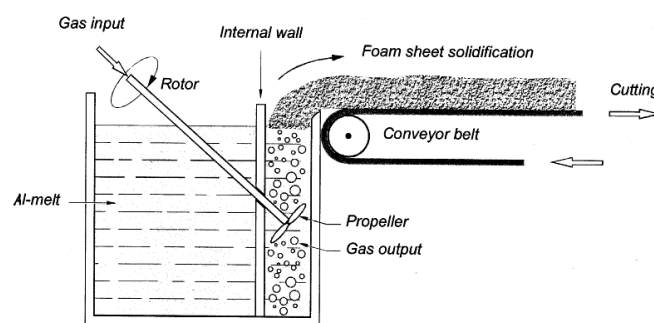


Figura 2.6 – Método de expansão direta através da injeção de gás [10]

#### 2.1.1.2. Solidificação eutética de sólido-gás

Este método, vulgarmente denominado por *Gasar* (figura 2.7), explora o facto de alguns metais líquidos, com hidrogénio gasoso, formarem um sistema eutético. Fundindo os metais numa atmosfera de hidrogénio a alta pressão (acima de 50 atm), obtém-se um fundido homogéneo carregado com



hidrogénio dissolvido no metal em fusão. Posteriormente, se a temperatura for diminuída, o metal líquido eventualmente sofre uma transição eutética para um sistema de duas fases heterogêneas (gás + sólido). À medida que o metal líquido solidifica há uma precipitação dos poros de gás no sólido. O resultado da morfologia dos poros é claramente determinado pelo teor de hidrogénio, pela pressão sobre o metal líquido, pela direção e velocidade de arrefecimento e pela composição química do material fundido. Um inconveniente deste processo é a porosidade pouco uniforme e alongada na direção dos gradientes de temperatura envolvidos durante o arrefecimento do sistema. [11]

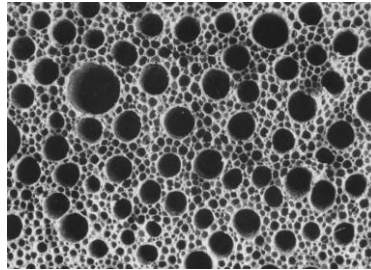


Figura 2.7 – Exemplo de aplicação de uma espuma metálica produzida pelo método Gasar [10]

#### *2.1.1.3. Formação da espuma metálica através de um pó compacto*

Este processo (figura 2.8) recorre ao material metálico base sob a forma de pó em que é misturado um aditivo que posteriormente liberta o gás. Esta mistura é devidamente compactada na forma desejada até que seja obtida uma camada densa. A técnica de compactação é insignificante desde que o material de adição esteja incorporado na matriz de metal sem qualquer porosidade residual aberta e que não afete o resultado final. A fase seguinte consiste no tratamento térmico a temperaturas próximas do ponto de fusão do material da matriz. O agente de expansão, homogêneamente distribuído dentro de uma matriz metálica densa, decompõe-se. O gás libertado força a expansão do metal, formando uma estrutura porosa. [11]

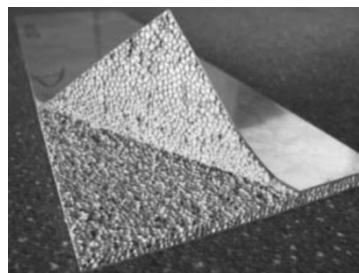


Figura 2.8 – Painel leve em sandwich de espuma de alumínio e aço [6]

#### *2.1.1.4. Investment Casting*

*Investment Casting* utiliza uma espuma metálica de células abertas à base de um material polimérico como molde da espuma metálica que se deseja obter. O molde é revestido com uma carcaça cerâmica e posteriormente pulverizado com partículas cerâmicas. É então, obtida uma carcaça cerâmica que,

após sujeita a um ciclo térmico de cozedura, permite vaziar a espuma metálica que se pretende fazer. Este processo é um processo de fundição de precisão, produzindo componentes de alta qualidade e precisão dimensional.

Numa fase inicial do processo, são produzidos os moldes em cera que refletem toda a estrutura que contempla o sistema de alimentação e toda a estrutura final a obter. Numa fase intermédia são montados os diferentes componentes numa forma de árvore. De seguida, ocorre o revestimento da árvore com um material cerâmico. Após a solidificação do cerâmico, o sistema é aquecido num forno de forma a eliminar a cera e sinterizar o cerâmico. Numa fase final, o metal é vazado obtendo-se o fundido. O esquema do processo pode ser consultado na figura 2.9.

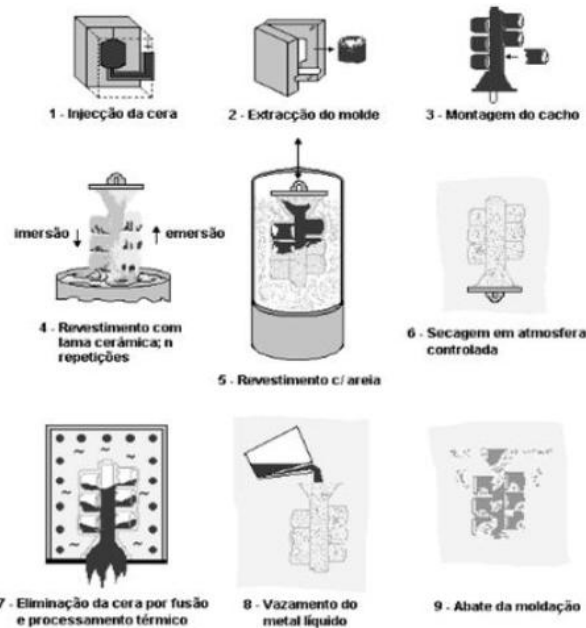


Figura 2.9 – Representação esquemática do processo de fundição por cera perdida [12]

### 2.1.2. A PARTIR DE PÓS METÁLICOS

Outra forma de obter espumas metálicas é através de pós metálicos. Os processos existentes são a sinterização de esferas ocas, aprisionamento de gás, espumas metálicas a partir de suspensões e reação por sinterização.

#### 2.1.2.1. Sinterização de esferas ocas

Neste processo são produzidas esferas metálicas ocas através de esferas de poliéster que são revestidas por um pó metálico. Posteriormente é possível obter a espuma metálica de dois métodos que consistem em comprimir na forma que se pretende, seguindo-se uma fase de aquecimento onde ocorre a destruição do poliéster. A sinterização é iniciada com o aquecimento das esferas revestidas e prensadas que, ao arrefecerem, permitem obter uma estrutura porosa. O segundo método consiste em

preparar as esferas sem aquecerem, formando um material poroso de esferas metálicas simplesmente unidas. Posteriormente as esferas prensadas são aquecidas até uma temperatura próxima da de fusão do pó metálico conduzindo a uma ligação físico-química ao solidificarem. Um exemplo de uma espuma metálica obtida por este processo é representado na figura 2.10. [9]

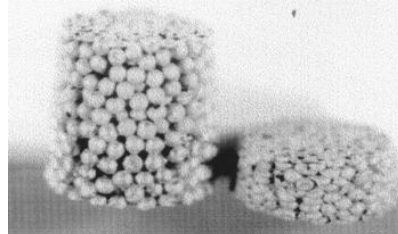


Figura 2.10 – Exemplo de uma espuma metálica obtida por sinterização de esferas ocas [13]

### 2.1.2.2. Aprisionamento de gás

Um método de os metais serem expandidos sem a adição de um agente expansor é aprisionar gás na matriz metálica durante a compactação de pós metálicos, originando um material precursor (figura 2.11). O aquecimento deste material origina a expansão do metal devido à pressão interna criada pelo gás aprisionado. Este método é bastante utilizado em estruturas de titânio. [10]

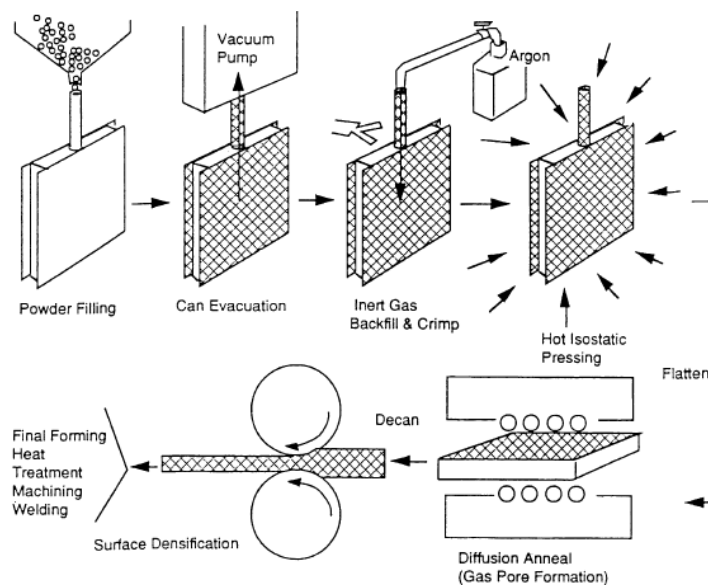


Figura 2.11 – Técnica de aprisionamento de gás [10]

### 2.1.2.3. Espumas a partir de suspensões

As espumas metálicas também podem ser produzidas através da preparação de uma suspensão de pós metálicos, agentes de sopro e alguns aditivos reativos. A suspensão é vertida para um molde após a mistura a temperaturas elevadas. Através dos agentes de sopro e dos aditivos, a suspensão passa para um estado viscoso e inicia-se a expansão do gás. Se forem adotadas medidas de estabilização, a suspensão expandida pode ser preservada e secada completamente. [10]

#### 2.1.2.4. Reação por sinterização

Reação por sinterização da mistura do pó de metal, como por exemplo titânio-alumínio, ferro-alumínio ou titânio-silício também é um processo conhecido para produzir estruturas porosas. A sinterização é realizada intencionalmente na temperatura de transformação de fases, utilizando a energia do processo de transformação que ocorre em cada partícula do sistema. Um exemplo de uma reação por sinterização está representado na figura 2.12. [10]

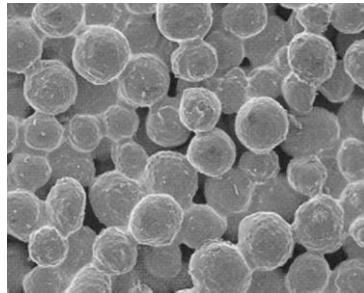


Figura 2.12 – Bronze poroso sinterizado feito através de partículas com cerca de 100 $\mu$ m de diâmetro [10]

#### 2.1.3. A PARTIR DE PARTÍCULAS IONIZADAS

As espumas metálicas podem ser produzidas através de métodos de deposição – CVD, PVD (figura 2.13) ou DVD. A técnica de deposição física de vapor é a mais utilizada e consiste na metalização de uma espuma de poliuretano de estrutura aberta. Posteriormente, a espuma é revestida com uma camada eletricamente condutiva por eletrodeposição. Numa fase final deste processo, o substrato da espuma de poliuretano é retirado por decomposição térmica ou vaporização. [14]

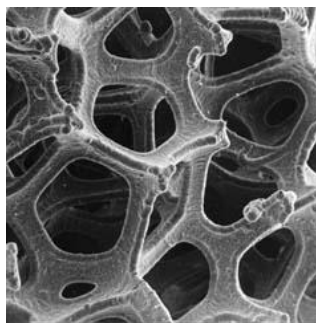


Figura 2.13 – Exemplo de uma microestrutura (100 $\mu$ m) de uma espuma metálica obtida por PVD [14]

## 2.2. Propriedades

Os materiais celulares são descritos pela sua estrutura geométrica, ou seja, são caracterizados pela forma, tamanho das células e distribuição das células. As espumas metálicas são sólidos celulares tridimensionais e mais complexos que estruturas bidimensionais. Contudo, para estudar estruturas tridimensionais é necessário criar uma base para a compreensão das variáveis mais complexas. É de salientar que ainda não existe uma relação matemática muito forte devido à grande dispersão de

resultados existente de autor para autor. A formulação analítica que se apresenta foi proposta por *Ashby e Gibson*. [9]

### 2.2.1. DENSIDADE

Uma das características mais importantes em sólidos celulares é a densidade relativa definida pela equação 2.1.

$$\rho = \frac{\rho^*}{\rho_0} \quad (2.1)$$

Em que  $\rho^*$  e  $\rho_0$  são a densidade da espuma metálica completa (material celular e o exterior) e a densidade do sólido (material que compõe as paredes), respetivamente, ou seja, o primeiro é referente à densidade de tudo o que envolve a espuma e o segundo é a densidade do material que compõe a espuma metálica. A fração de poros é  $1 - \rho$ . Quanto mais espessa a parede da célula, maior será a densidade relativa.

Segundo *Gibson e Ashby*, a densidade relativa do material exterior é proporcional à fração de volume do material exterior,  $\vartheta_0$ , definida pela equação 2.2.

$$\vartheta_0 = \frac{\text{Volume do material base (m}^3\text{)}}{\text{Volume da espuma (m}^3\text{)}} = \frac{V_0}{V^*} \quad (2.2)$$

A figura 2.14 representa a distribuição de volumes de uma espuma metálica.

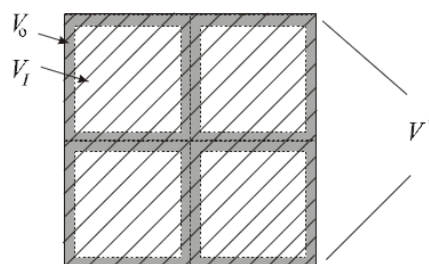


Figura 2.14 – Representação dos volumes da estrutura de um material celular [9]

A relação entre a massa e o volume da espuma metálica exprime a massa volúmica

$$\rho^* = \frac{\text{massa da espuma (kg)}}{\text{volume da espuma (m}^3\text{)}} = \frac{m^*}{V^*} \quad (2.3)$$

A densidade do material de conexão (exterior) é

$$\rho_0 = \frac{\text{massa do material de conexão (kg)}}{\text{volume do material de conexão (m}^3\text{)}} = \frac{m_0}{V_0} \quad (2.4)$$

A fracção de volume do material exterior é

$$\vartheta_0 = \frac{V_0}{V^*} = \frac{\frac{m_0}{\rho_0}}{\frac{m^*}{\rho^*}} = \frac{\rho^*}{\rho_0} \quad (2.5)$$

### 2.2.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade (E) do material corresponde à inclinação inicial da curva tensão-extensão no domínio elástico de deformação e está relacionado com a porosidade e densidade dos materiais. Existem vários modelos matemáticos, propostos por diferentes autores para relacionar o módulo de elasticidade com a densidade da espuma metálica. O módulo de elasticidade relativo é

$$E = \frac{E^*}{E_0} \quad (2.6)$$

Em que  $E^*$  e  $E_0$  são o módulo de elasticidade do material celular e o módulo de elasticidade do material sólido, respetivamente.

A relação entre o módulo de elasticidade e a densidade para diferentes tipos de espumas metálicas é apresentada na figura 2.15.

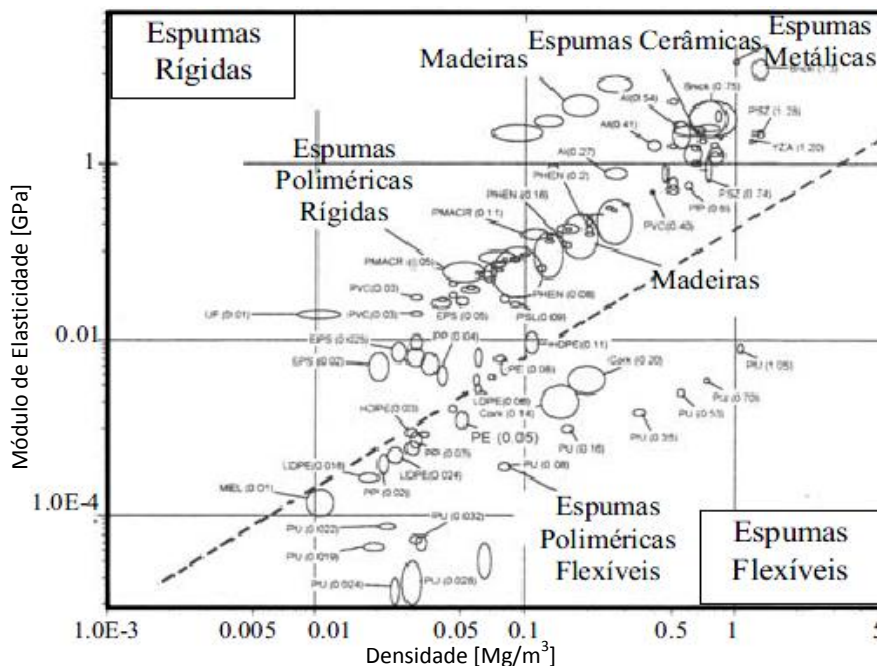


Figura 2.15 – Relação entre o módulo de elasticidade e a densidade para diferentes tipos de espumas metálicas [9]

Os modelos apresentados foram desenvolvidos por *Gibson e Ashby* [9], salientando-se que representam uma simplificação que despreza vários parâmetros da espuma metálica.

### 2.2.2.1. Células abertas

Para modelar estruturas celulares abertas, *Ashby e Gibson* propõem a disposição de células cúbicas representadas na figura 2.16.

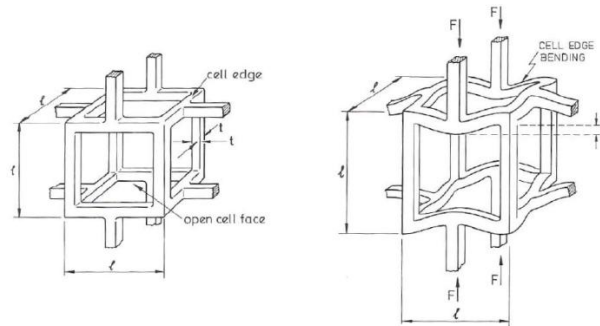


Figura 2.16 – Estrutura celular aberta segundo *Ashby e Gibson* [9]

Segundo os autores, o módulo de elasticidade para uma estrutura de células abertas à compressão é

$$\frac{E^*}{E} = C_1 \cdot \left(\frac{\rho^*}{\rho}\right) \quad (2.7)$$

Em que  $C_1$  é a constante de proporcionalidade que relaciona a estrutura das células. O módulo de elasticidade, através desta expressão, só é válido para pequenas deformações. Com deformações elásticas maiores, surgem momentos fletores adicionais nas colunas verticais das células, conduzindo a uma diminuição do módulo.

### 2.2.2.2. Células fechadas

Estes tipos de espumas metálicas são de análise mais complexa. Para obter as relações necessárias para determinar as equações matemáticas, os autores utilizaram um elemento celular representado na figura 2.17.

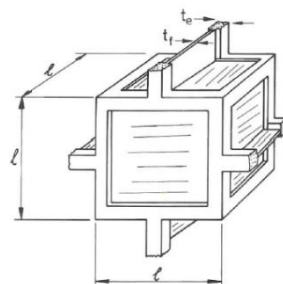


Figura 2.17 – Estrutura celular fechada [9]

O módulo de elasticidade é resultante da flexão das zonas de união das células, das tensões de membrana nas paredes celulares e da compressão das células.

$$\frac{E^*}{E} = C_1 \cdot \varnothing^2 \cdot \left(\frac{\rho^*}{\rho}\right)^2 + C_1 \cdot (1 - \varnothing) \cdot \frac{\rho^*}{\rho_0} + \frac{p_0 \cdot (1 - 2\vartheta_0)}{E \cdot \left(1 - \frac{\rho^*}{\rho_0}\right)} \quad (2.8)$$

Em que  $\varnothing$  é a fração de sólido que se encontra na zona da união das células ( $t_j$ ) e  $(1 - \varnothing)$  é a fração de sólido que se encontra nas faces das células ( $t_i$ ).

### 2.2.3. TÉRMICAS

As espumas metálicas podem ser utilizadas como isolantes devido à sua baixa condutividade, principalmente as espumas de célula fechada. A condutividade térmica deste tipo de material é atribuída apenas às paredes metálicas das células, o que significa que a condutividade é a do metal base utilizado. [9]

### 2.2.4. ACÚSTICAS

As variáveis mais importantes em aplicações acústicas na seleção de um material são a energia sonora, a velocidade de amortecimento de vibrações e a frequência.

A energia sonora que se propaga no material é convertida em energia térmica através da fricção entre membranas. As espumas metálicas, principalmente as de estrutura aberta, absorvem o som que é refletido no interior da mesma entre as células.

A capacidade de absorção sonora de um material é definida pelo coeficiente de absorção que corresponde ao quociente entre a intensidade sonora não refletida à superfície e a intensidade do som incidente. Este coeficiente depende de parâmetros como a espessura do material, a densidade da espuma metálica e o tamanho das células.

### 2.2.5. ELÉTRICAS

As propriedades elétricas das espumas metálicas dependem, claramente, do material base utilizado para a produção destas.



## 2.3. Comportamento mecânico

Uma das aplicações das espumas metálicas insere-se em componentes que estão submetidos a esforços mecânicos de tração e/ou compressão. O comportamento da espuma metálica é alterado consoante o tipo de carregamento, ou seja, o comportamento à compressão de uma espuma metálica é diferente do comportamento à tração.

### 2.3.1. COMPRESSÃO

O comportamento típico de uma espuma metálica à compressão é apresentado na figura 2.18.

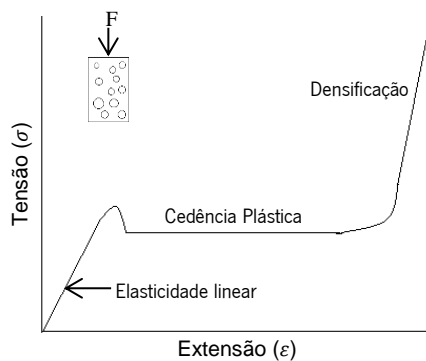


Figura 2.18 – Curva típica tensão-extensão de uma espuma metálica à compressão [9]

Uma curva típica tensão-extensão de uma espuma metálica é constituída por três estágios. O primeiro é referente à deformação elástica, o segundo é a cedência plástica e o estágio final é a densificação.

Como já referido, os mecanismos de deformação dependem, sobretudo do tipo de células – abertas ou fechadas. Para espumas metálicas com uma estrutura celular fechada, a deformação ocorre devido à flexão e contração das arestas das células e, também, à contração das membranas que formam as paredes celulares. Esta contração é o mecanismo que permite controlar a deformação numa espuma metálica de estrutura celular fechada. Numa de células abertas, o mecanismo que controla a deformação é a flexão da parede celular. [9]

#### Primeiro estágio

Numa espuma metálica, o primeiro estágio é constituída por uma zona linear e outra não-linear. Inicialmente, o material deforma-se quase exclusivamente de uma maneira elástica e apresenta uma evolução praticamente linear. O pico inicial de tensão, no caso de existir, corresponde à resistência de compressão da espuma metálica.

## Segundo estágio

É caracterizado por um patamar de tensão praticamente constante consequência dos diversos mecanismos de deformação. É nesta zona que inicia o colapso das células. O mecanismo de colapso é dependente do material base da espuma metálica, inicia-se quando a tensão excede um limite e ocorre no plano perpendicular ao carregamento. Existe uma decomposição das forças de compressão nas paredes celulares, criando uma instabilidade elástica, produzindo tensões elevadas e deformação. A importante característica neste estágio é a evolução horizontal existente no colapso plástico que tem grande importância numa situação de impacto.

## Terceiro estágio

Nesta fase existe uma densificação da espuma metálica denominada por colapso. À medida que a deformação aumenta, as células das paredes aproximam-se e entram em contacto. Inicia-se na zona mais fraca da ligação estrutural e de maior solitação, propagando-se a todo o material a uma tensão constante.

### 2.3.2. TRAÇÃO

A curva de uma espuma metálica sujeita a um carregamento de tração está representada na figura 2.19.

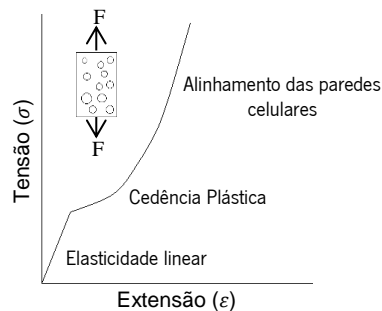


Figura 2.19 – Curva típica tensão-extensão de uma espuma metálica à tração [9]

Uma espuma metálica à tração tem um comportamento distinto da compressão. Contudo, ambas as curvas têm três estágios no seu comportamento. O domínio elástico, numa espuma metálica à tração é igual à compressão. No patamar de cedência, em vez de existir uma compressão das paredes das células existe tração das mesmas. No final da curva, existe um esticar das arestas que conduz a um alinhamento da parede celular. Em materiais muito dúcteis com o aumento da deformação as paredes das células sofrem rotações alinhando-se na direção da aplicação da tensão, o que provoca um

aumento da rigidez da espuma até à rotura. A exceção é nas espumas de alumínio em que não se verifica este comportamento. [9]

### 2.3.3. RESISTÊNCIA AO IMPACTO

Uma importante, e já referida, característica das espumas metálicas é o seu comportamento a solicitações de impacto devido à sua excelente capacidade de absorção de energia. É possível determinar a curva tensão-extensão através de uma seleção cuidada do material base da estrutura celular e da densidade relativa da espuma metálica. Um baixo peso, a elevada resistência e a ductilidade deste material são características importantes nesta solicitação. A figura 2.20 é um exemplo de uma curva tensão-extensão em carregamento dinâmico.

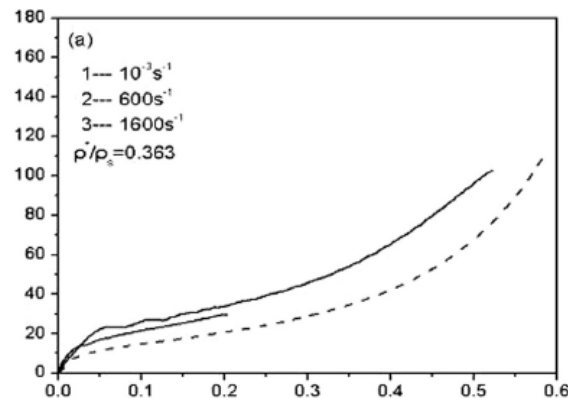


Figura 2.20 – Exemplo de uma espuma à compressão com carregamento dinâmico [15]

A uma taxa de deformação constante verifica-se que as espumas metálicas absorvem mais energia comparativamente a um material maciço, quando submetidas a um determinado nível de tensão. A maior parte da energia absorvida é convertida em energia de deformação plástica. Quanto maior for a densidade da espuma, maior será a resistência e a capacidade de absorver energia específica será menor. [4]

### 2.3.4. CARREGAMENTO MULTIAXIAL

Em grande parte das aplicações mecânicas não existem apenas solicitações uniaxiais. Verifica-se que a resistência do material apresenta uma grande variabilidade em função dos estados de tensão. Num carregamento uniaxial, a flexão das paredes é controlada pelo mecanismo de deformação e flexão. Num carregamento multiaxial, existe uma variação do estado de tensão, possibilitando que o momento fletor em cada parede celular possa ser anulado.

Para descrever este tipo de carregamento é necessário recorrer a modelos constitutivos do material que, na maioria dos casos, são deduzidos através de leis de encruamento e cedência.

### 2.3.5. ANISOTROPIA

A maioria das estruturas celulares é anisotrópica, como por exemplo a madeira, em que a direcção de carregamento tem grande importância no comportamento do material. Nas espumas metálicas, esta propriedade está directamente relacionada com o processo de fabrico utilizado.

A anisotropia dos materiais celulares é o resultado da estrutura celular e do material das paredes celulares.

## **2.4. Aplicações**

Existe um vasto campo de aplicações de espumas metálicas que tem vindo a ser alargado devido a correntes investigações realizadas a esta gama de materiais. A característica mais importante das espumas é a capacidade de absorção de energia quer por solicitações de impacto quer por vibrações. Para determinar a viabilidade da implementação da espuma é importante considerar a sua morfologia (estrutura aberta ou fechada), o material base, o processo de fabrico da espuma metálica e os custos. Outro fator relevante das espumas é a facilidade de reciclagem.

As espumas podem ser utilizadas em órgãos de máquinas, como reforço interno de componentes (idêntico a um painel sandwich), elementos estruturais, na indústria química, como isolante e em outras aplicações.

As espumas de estrutura aberta são bastante utilizadas na indústria química como filtros, reservatórios de fluidos, entre outras aplicações devido à sua porosidade aberta.

As espumas de estrutura fechada, principalmente as de alumínio, são muito utilizadas em aplicações estruturais principalmente na indústria de transportes (veículos, aviões, barcos, comboios, etc). A implementação deste material num veículo permite reduzir o seu peso global e, conseqüentemente, diminuir o consumo de combustíveis.

As espumas, para além das aplicações já numeradas, também podem ser aplicadas nas áreas da biomédica, nos permutadores de calor, silenciadores, baterias, estruturas de protecção contra incêndios, entre diversas aplicações.

A figura 2.21 relaciona alguns tipos de aplicações de espumas metálicas e o tipo de porosidade destas.



Figura 2.21 – Relação entre o tipo de porosidade da espuma e o tipo de aplicação [6]

## 2.5. Espumas de células uniforme e de células *dual-size*

Ao longo dos últimos anos houve uma constante evolução no ramo da engenharia de materiais. Um vasto número de processos de fabrico foram criados para produzir espumas quer de célula aberta quer de célula fechada.

Embora a densidade relativa seja o fator mais preponderante para determinar o comportamento e a resistência de uma espuma metálica, outros parâmetros como a compactação, a distribuição e a configuração das células também têm grande influência no comportamento mecânico.

*Kou et al [16]* propuserem dois tipos de espumas de estrutura celular aberta que são as células uniformes e *dual-size*. Numa espuma metálica de células uniformes, estas têm um formato esférico e estreitamente compactas. É assumido que a estrutura celular tem um arranjo cúbico de faces centradas (figura 2.22). [16]

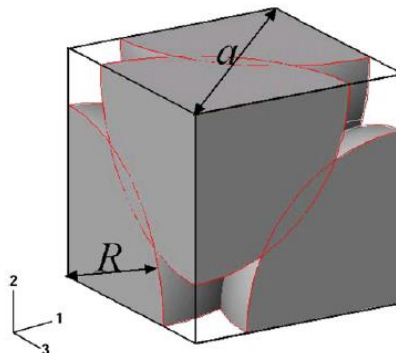


Figura 2.22 – Estrutura compactada com arranjo de ligações numa estrutura uniforme de célula aberta [16]

Neste tipo de geometria, a distância entre dois centros adjacentes das ligações largas é  $a$  e o raio das ligações largas é  $R$ . [16]

Nas espumas *dual-size* existe uma ligação secundária. Esta nova ligação é disposta nos espaços vazios existentes numa espuma uniforme como é visível na figura 2.23.

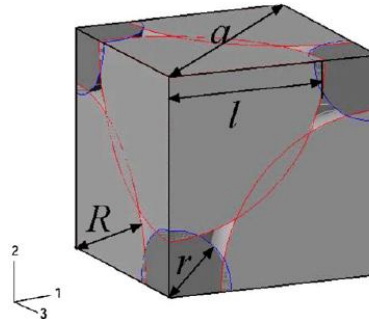


Figura 2.23 – Estrutura compactada com arranjo de ligações numa estrutura *dual-size* de célula aberta [16]

Neste caso,  $r$  representa o raio das ligações secundárias. Através destas variáveis surge a fração de volume das ligações largas e das ligações secundárias,  $f_l$  e  $f_s$ , respetivamente. Se os contactos das ligações forem normais, então  $R=a/2$ ,  $r=(\sqrt{2}-1)\cdot R$  e  $f_s\approx 0.071f_l$ . A sobreposição de ligações reduz a densidade relativa das estruturas celulares produzidas. [16]

Segundo os autores, o comportamento das espumas com estruturas *dual-size* é bastante melhor do que estruturas uniformes. Verifica-se que a tensão de cedência de uma espuma com estrutura celular *dual-size* é consideravelmente superior do que uma espuma com estrutura celular uniforme para uma densidade equivalente. Para um rácio entre os raios das ligações largas e das ligações secundárias de 0.425, é visível um aumento dessa mesma tensão. Quanto à rigidez, esta aumenta conforme aumenta a razão entre os raios das ligações largas e secundárias. [16]

## 2.6. Modelos constitutivos

A caracterização da maioria dos materiais é realizada através de modelos constitutivos, ou seja, são caracterizados por modelos matemáticos que descrevem idealmente o comportamento tensão-deformação que de uma forma global são de formulação bastante complexa.

Um dos maiores entraves na investigação de materiais celulares é encontrar modelos matemáticos que representem aceitavelmente o comportamento de uma espuma metálica. Esta dificuldade pode ser explicada pela constante alteração de geometria das células, pela alteração do regime de deformação e pela anisotropia destes materiais. Existem alguns investigadores que se dedicaram em formular matematicamente o comportamento de espumas metálicas, ou seja, através de modelos constitutivos.

Serão apresentados os modelos de *Despande e Fleck*, de *Miller*, de *Schreyer* e de *Ehlers* uma vez que são os mais utilizados na modelação de espumas metálicas. No entanto, estes modelos apenas estão disponíveis no programa *LS-DYNA*. Posteriormente são apresentados o modelo de Wang e os modelos constitutivos disponíveis no *Ansys*.

### 2.6.1. DESHPANDE E FLECK

Para metais com um comportamento mecânico isotrópico, o critério de *Von-Mises* é largamente aplicado nos algoritmos de resolução de problemas de solicitações mecânicas. Contudo, as espumas metálicas exibem um fluxo de plasticidade para condições de tensões hidrostáticas puras. [17]

Os critérios de cedência para materiais porosos devem incluir o termo da tensão hidrostática porque as células da espuma colapsam quando comprimidas e, devido aos espaços existentes na espuma, o volume é variável. O modelo constitutivo isotrópico proposto por *Deshpande e Fleck* contem este termo. [17]

A função de cedência ( $\phi$ ) é definida pela equação 2.9.

$$\phi = \hat{\sigma} - Y \leq 0 \quad (2.9)$$

E o endurecimento ( $Y$ ) é expresso pela equação 2.10.

$$Y = \sigma_p + R(\hat{\epsilon}) \quad (2.10)$$

Em que  $R(\hat{\epsilon})$  representa o encruamento do material e  $\hat{\epsilon}$  representa a deformação equivalente. A tensão equivalente é calculada através

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{[1 + (\alpha/3)^2]} \cdot [\sigma_e^2 + \alpha^2 \cdot \sigma_m^2] \quad (2.11)$$

Em que  $\sigma_e$  é a tensão efetiva de *Von-Mises* e  $\sigma_m$  é a tensão média. O parâmetro  $\alpha$  define o perfil da superfície de cedência e é calculado através da equação 2.12.

$$\alpha^2 = \frac{9(1 - 2\nu_p)}{2(1 + \nu_p)} \quad (2.12)$$

Em que  $\nu_p$  é o coeficiente de *Poisson* quando se inicia a deformação plástica do material.

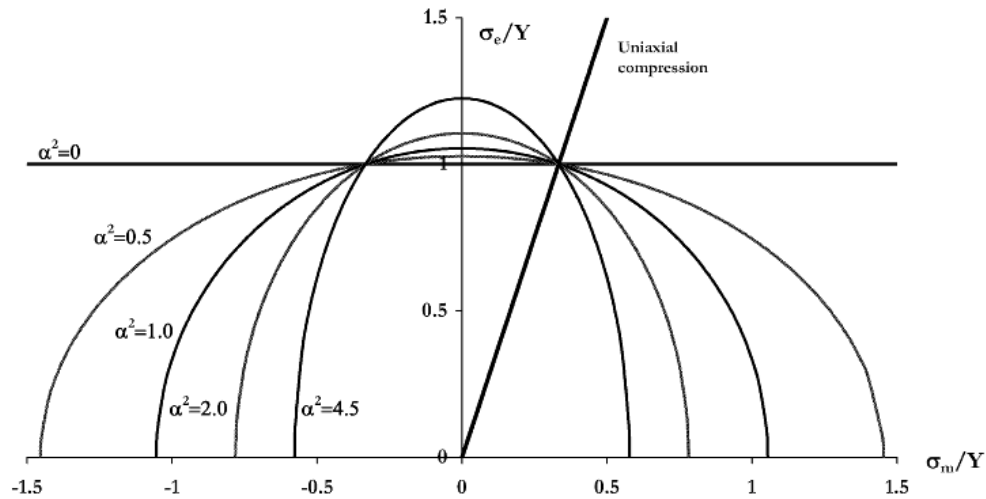


Figura 2.24 – Influência do fator  $\alpha$  na superfície de cedência [17]

A figura 2.24 representa a influência do fator  $\alpha$  na superfície de cedência. Se  $\alpha^2 = 4.5$ , não existe deformação plástica resultante de um carregamento axial, o que significa que a tensão de engenharia medida é igual à tensão verdadeira. Os valores de  $\alpha^2$  devem estar limitados entre  $0 \leq \alpha^2 \leq 4.5$  para que seja fisicamente admissível. O limite superior corresponde a um coeficiente plástico à contração de zero e o limite mais baixo corresponde ao critério de *Von-Mises*.

### 2.6.2. MILLER

A superfície de cedência proposta por *Miller* é um polinómio de invariantes de tensão em que numa primeira abordagem a superfície de cedência é calculada através da tensão equivalente de *Von Mises* e numa segunda abordagem através da tensão hidrostática. A presença de um termo hidrostático linear possibilita que a superfície de cedência tenha diferentes pontos de cedência na tensão uniaxial à compressão. [2]

Uma definição da regra de encruamento no modelo de *Miller* é a decomposição multiplicativa do encruamento em endurecimento causado pela compactação das células da estrutura  $H_V(\varepsilon_V)$  e pelo endurecimento causado pela deformação do material base  $H_S(\varepsilon_{pl})$ . Miller avalia o endurecimento através da deformação volumétrica na compactação das células da estrutura  $\varepsilon_V$ , enquanto que o endurecimento do material base é representado através da deformação plástica acumulada  $\varepsilon_{pl}$ . [2]

A função do endurecimento é expressa através da equação 2.13.

$$Y = (Y^0 + H_S(\varepsilon_{pl})) \cdot H_V(\varepsilon_V) \quad (2.13)$$



Em que  $Y^0 = d_0 Y$ . As constantes  $\gamma$ ,  $\alpha$  e  $d_0$  definem a função de cedência e o potencial de fluxo. Podem ser expressas em termos do rácio entre a tensão de cedência à compressão e à tracção  $\beta = Y^0/Y^0_t$  e pelo coeficiente de poisson plástico  $\nu_p$ , resultando na equação 2.14, 2.15 e 2.16.

$$\gamma = \frac{6\beta^2 - 12\beta + 6 + 9(\beta^2 - 1)/(1 + \nu_p)}{2(\beta + 1)^2} \quad (2.14)$$

$$\alpha = \frac{45 + 24\gamma - 4\gamma^2 + 4\nu_p(2 + \nu_p)(-9 + 6\gamma - \gamma^2)}{16(1 + \nu_p)^2} \quad (2.15)$$

$$d_0 = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\gamma}{3} + \sqrt{\left(1 - \frac{\gamma}{3}\right)^2 + \frac{4}{9}\alpha} \right) \quad (2.16)$$

Este modelo é derivado do modelo de *Deshpande e Fleck*.

### 2.6.3. SCHREYER PARA ESPUMAS DE ALUMÍNIO

Este modelo inclui a anisotropia introduzindo um endurecimento cinemático inicial no critério de cedência. [2]

A função de cedência gera uma esfera no espaço principal de tensões e é expressa pela equação 2.17.

$$\phi = \sqrt{(\sigma - b):(\sigma - b)} - Y = 0 \quad (2.17)$$

Em que  $b$  é o tensor diagonal e que corresponde ao endurecimento cinemático inicial. Schreyer indica a regra do fluxo plástico e o vetor incremental do fluxo plástico têm a mesma direção que o vetor da tensão. [2]

O fluxo da deformação plástica é calculado pela equação 2.18.

$$F = \sqrt{\frac{1}{2}\sigma:\sigma} = \sqrt{\sigma_e^2 + \frac{9}{2}p^2} \quad (2.18)$$

O endurecimento é expresso por

$$Y = Y^0 + H_V(\varepsilon_V) \quad (2.19)$$

#### 2.6.4. EHLERS

Em todos os modelos apresentados, o modelo de *Ehlers* é o que apresenta maior número de graus de liberdade para modelar espumas de alumínio. Este modelo baseia-se na teoria de media dos poros. [2] A função de cedência é expressa pela equação 2.20.

$$\phi = \sqrt{3\Gamma\sigma_e^2 + \frac{9}{2}\alpha p^2 + 81\delta^2 p^4 - 3\beta p + 9\zeta p^2 - \kappa} = 0 \quad (2.20)$$

A função  $\Gamma$  é obtida pela equação 2.21.

$$\Gamma = \left( 1 + \gamma \frac{J_3}{\left(\frac{1}{3}\sigma_e^2\right)^{\frac{3}{2}}} \right)^m, \quad J_3 = \frac{1}{3} \det\{\sigma^D_{ij}\} \quad (2.21)$$

Como é possível verificar nas equações 2.20 e 2.21, existem sete coeficientes a determinar, o que demonstra que a calibração não é tão simples como nos modelos anteriormente expostos. São necessários um certo número de tensões triaxiais para determinar os coeficientes e os que são desconhecidos são determinados por cálculo através do método dos mínimos quadrados utilizando um algoritmo de otimização não-linear. Neste modelo existe o terceiro invariante de tensão,  $J_3$ , que permite controlar a forma da superfície de cedência no plano desviador. [2]

#### 2.6.5. WANG

Estes autores determinaram um modelo constitutivo que permite representar as três fases de um carregamento à compressão de uma espuma de alumínio para taxas de cargas diferentes. [18]

A tensão de compressão uniaxial pode ser calculada pela equação 2.22.

$$\sigma = \left( A\rho \frac{e^{\alpha\rho\varepsilon} - 1}{B + e^{\beta\rho\varepsilon}} + C\rho \left( \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right)^n \right) \cdot \left( 1 + D \log \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \quad (2.22)$$

Em que  $\varepsilon$  é a deformação à compressão,  $\rho = \rho^*/\rho_0$  é a densidade relativa da espuma metálica,  $\dot{\varepsilon}$  e  $\dot{\varepsilon}_0$  são a taxa de deformação média e a taxa de deformação de referência, respetivamente. O primeiro termo da equação representa os três estágios de deformação da espuma metálica, enquanto que o segundo termo descreve o efeito da taxa de deformação. Os parâmetros A, B,  $\alpha$ ,  $\beta$ , C e D descrevem

as características principais da resposta de tensão-deformação para grandes deformações, como é possível ver na figura 2.25. [18]

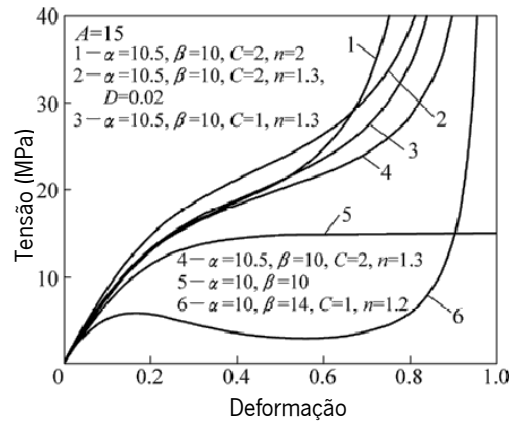


Figura 2.25 – Influência dos vários parâmetros no modelo [18]

O módulo de elasticidade equivalente pode ser calculado através da equação 2.23.

$$E = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = \frac{A \alpha}{2} \quad (2.23)$$

Os parâmetros são calculados através da densidade relativa. Estes são expressos pelas equações 2.24, 2.25, 2.26 e 2.27.

$$A = 44.5 \rho^{1.42} \quad (2.24)$$

$$\alpha = 138.4 / (1 - 0.076 \rho^{-1}) \quad (2.25)$$

$$\beta = 137.7 / (1 - 0.0675 \rho^{-1.086}) \quad (2.26)$$

$$C = 0.00711 \rho^{1.816} \quad (2.27)$$

As constantes  $n$  e  $D$  são empíricas e assumem o valor de 1.515 e 0.06474, respetivamente.

#### 2.6.6. DISPONÍVEIS NO PROGRAMA DE CÁLCULO ANSYS

No *Ansys* os modelos constitutivos disponíveis são o modelo de *Drucker-Prager*, o modelo *CAP* e o modelo de *Gurson*. O único modelo para materiais porosos é o modelo de *Gurson*. No entanto, segundo vários investigadores [2], este modelo não é o ideal para representar o comportamento de uma espuma metálica.

### Modelo de Drucker-Prager

Este modelo usa o critério de cedência de Drucker-Prager com um determinado fluxo. É utilizado em materiais elásticos – perfeitamente plásticos. Este modelo não é utilizado em espumas metálicas, pelo que não se apresenta a sua formulação. [19]

### Modelo CAP

Este modelo centra-se na plasticidade geométrica resultante na compactação em tensões médias baixas seguido de uma significativa dilatação depois da rotura. Tal como o modelo anterior, este modelo não representa o comportamento de uma espuma metálica. [19]

### Modelo de Gurson

O modelo de *Gurson* representa a plasticidade e a fratura num metal dúctil poroso. Quando a plasticidade e a fratura ocorrem, os metais dúcteis atravessam um processo de crescimento de vazios, nucleação e coalescência. A figura 2.26 representa microscopicamente um metal poroso em que é visível a existência de dilatação de vazios quando a matriz de sólidos está sob um estado de tensão hidrostático.

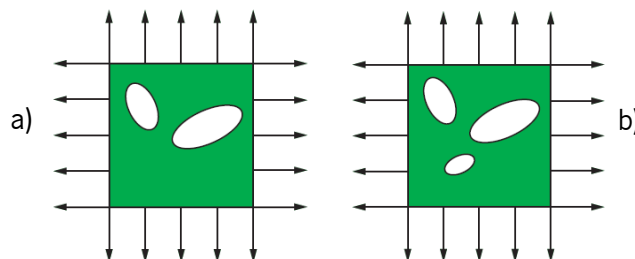


Figura 2.26 – a) Início do crescimento dos vazios; b) novos vazios formados na deformação plástica [19]

A equação da evolução da porosidade é dada pela equação 2.28.

$$\dot{f} = \dot{f}_{\text{crescimento}} + \dot{f}_{\text{nucleação}} \quad (2.28)$$

Em que  $f$  é a porosidade e “ $\dot{\phantom{x}}$ ” é a taxa de alteração de variáveis. A porosidade é dada pela equação 2.29.

$$f = \frac{V_V}{V} \quad (2.29)$$

Em que  $V_V$  representa o volume de vazios e  $V$  representa o volume aparente ou de referência.

A evolução do trabalho plástico microscópico equivalente é dada pela equação 2.30.

$$\dot{\varepsilon}^p = \frac{\sigma : \dot{\varepsilon}^p}{(1-f)\sigma_Y} \quad (2.30)$$

Em que  $\dot{\varepsilon}^p$  é a taxa de deformação plástica microscópica equivalente,  $\sigma$  é a tensão de Cauchy,  $:$  é o operador do produto interno entre dois tensores de segunda ordem,  $\varepsilon^p$  é a deformação plástica macroscópica equivalente e  $\sigma_Y$  é a tensão de cedência corrente. [19]

A evolução da porosidade que retrata o crescimento de vazios e a nucleação pode ser expressa através da deformação plástica microscópica equivalente é obtida pela equação 2.31.

$$\dot{f}_{crescimento} = (1-f)\dot{\varepsilon}^p : I \quad (2.31)$$

Em que  $I$  é a identidade do tensor de segunda ordem.

A nucleação de vazios é controlada pela deformação plástica ou pela tensão e é assumida como uma estatística de distribuição normal. No caso de a nucleação ser controlada pela deformação, a distribuição é descrita em termos da deformação média e correspondente desvio padrão. No caso de a nucleação ser controlada pela tensão, a distribuição é descrita em termos da tensão média e correspondente desvio padrão. A alteração da taxa de porosidade devido à nucleação é dada pela equação 2.32. [19]

$$\dot{f}_{nucleação} = \begin{cases} \frac{f_N \dot{\varepsilon}^p}{S_N \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\bar{\varepsilon}^p - \varepsilon_n}{S_N} \right)^2}, & \text{controlada pela deformação} \\ \frac{f_N (\sigma_Y + p)}{S_N^\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_Y + p - \sigma_N}{S_N^\sigma} \right)^2}, & \text{controlada pela tensão} \end{cases} \quad (2.32)$$

Em que  $f_N$  corresponde à fração de volume do segregado de inclusão de partículas,  $\varepsilon_n$  corresponde à deformação média,  $S_N$  corresponde ao desvio da tensão,  $\sigma_N$  corresponde à tensão média,  $S_N^\sigma$  corresponde ao desvio da tensão (escalar com unidades de tensão) e  $p = \frac{1}{3} \sigma : I$  que corresponde a uma pressão.

A regra de cedência do modelo de Gurson é definida pela equação 2.33.

$$\Phi = \left( \frac{q}{\sigma_Y} \right)^2 + 2f^* \cdot q_1 \cdot \cosh \left( \frac{3}{2} \frac{q_2 p}{\sigma_Y} \right) - (1 + q_3 \cdot f^{*2}) \quad (2.33)$$

Em que  $q_1$ ,  $q_2$  e  $q_3$  são constantes de Tvergaard-Needleman e  $\sigma_Y$  é a tensão de cedência do material.  $q$  representa a tensão equivalente e é calculada pela equação 2.34.

$$q = \sqrt{\frac{3}{2}(\sigma - pI):(\sigma - pI)} \quad (2.34)$$

A função de Tvergaard-Needleman,  $f^*$ , é obtida através da equação 2.35.

$$f^*(f) = \begin{cases} f, & se \leq f_c \\ f_c + \frac{q_1}{f_F - f_c}(f - f_c), & se > f_c \end{cases} \quad (2.35)$$

Em que  $f_c$  corresponde à porosidade crítica e  $f_F$  corresponde à porosidade de fratura.

## 2.7. Estudos numéricos

A utilização de ferramentas de elementos finitos reduz significativamente os custos no estudo do comportamento de componentes mecânicos. Por outro lado, através destes programas de cálculo a necessidade de realizar ensaios experimentais diminui o que conduz à redução do tempo dispendido e, conseqüentemente, à redução de custos inerentes aos ensaios. Assim, é possível identificar pequenas irregularidades ou falhas nos componentes num estágio de desenvolvimento.

Em espumas metálicas, os estudos realizados são maioritariamente quase-estáticos e dinâmicos porque num estudo estático só é possível analisar o comportamento elástico e plástico da espuma metálica, visto que não permite criar uma situação de dano e analisar a densificação das espumas metálicas. Isto é, um estudo estático no programa *Ansys Workbench* não permite observar a rotura das fibras da espuma metálica e, desta forma, não permite verificar a densificação da espuma metálica.

Existem algumas ferramentas de elementos finitos, como por exemplo, o *Ansys*, o *CosmosWorks*, o *LS-DYNA* e o *ABAQUS*. O *Ansys* e o *CosmosWorks* são bastante utilizados em análises estáticas em que o primeiro também é muito utilizado em análises modais, enquanto que o *LS-DYNA* e o *ABAQUS* são bastante utilizados em análises quase-estáticas e dinâmicas. A ferramenta de análise numérica mais utilizada pelos investigadores de espumas metálicas é o *LS-DYNA* que é um integrante do *Ansys*.

### 2.7.1. EXEMPLOS DE ESTUDOS NUMÉRICOS

*Santosa et al* [20] estudaram o aumento significativo da força de compressão de uma coluna carregada e a dependência linear com a resistência à compressão da espuma metálica e a área de secção transversal da coluna através de estudos quase-estáticos. O objetivo deste estudo era estudar o

comportamento da espuma metálica, da parede da coluna e a interação entre estas duas partes da espuma metálica (figura 2.27). [20]

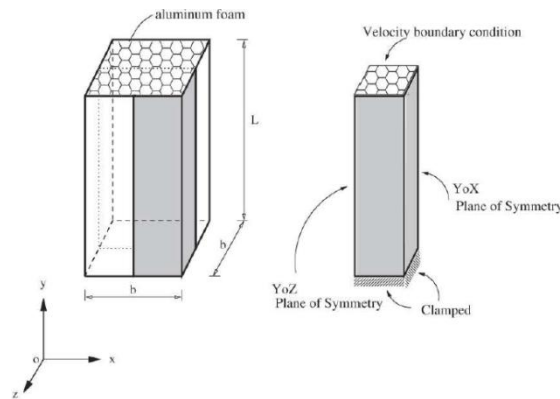


Figura 2.27 – Modelação geométrica da coluna preenchida de espuma metálica [20]

As paredes da coluna deformam progressivamente através da formação de dobras para dentro e para fora em duas arestas de conexão como é possível verificar na figura 2.28.

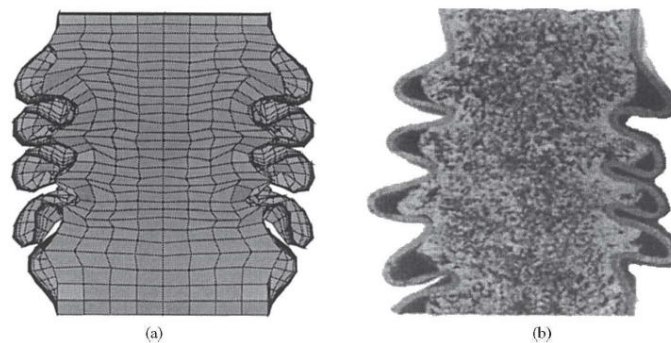


Figura 2.28 – Padrão de deformação da interface parede-espuma: a) Simulação numérica; b) Experimental [20]

De uma forma global, os autores comprovaram o aumento da força de compressão, ou seja, com a utilização da espuma metálica o comportamento da coluna é melhorado, como é visível na figura 2.29.

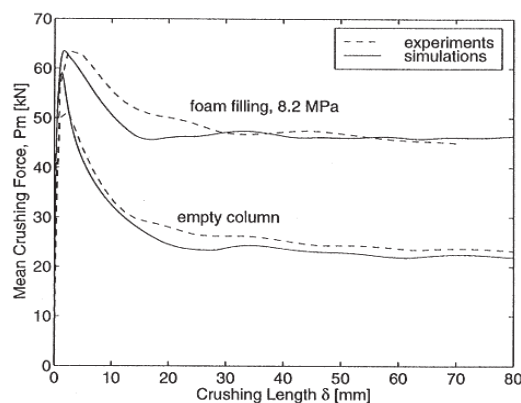


Figura 2.29 – Resposta da força de compressão [20]

Fusheng Han et al [15] estudaram o comportamento mecânico de uma espuma metálica de células abertas comercial (figura 2.30) de alumínio puro à compressão, dinamicamente. O objetivo do estudo era demonstrar a existência de uma dependência da taxa de deformação presente numa espuma de

alumínio originada por uma arquitetura poligonal dos poros, uma densidade relativamente alta, pelas propriedades do alumínio, bem como a força de fricção entre o contacto das células com a parede.

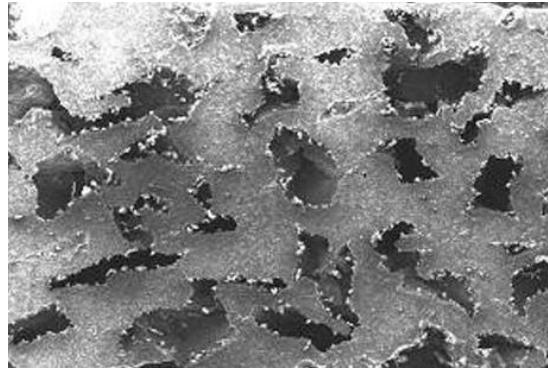


Figura 2.30 – Micrografia da estrutura da espuma de alumínio [15]

Para modelar numericamente a espuma metálica, os autores conceberam uma estrutura tetraédrica. Posteriormente, as células da estrutura tetraédrica são definidas pelo truncamento dos cantos de um cubo (figura 2.31).

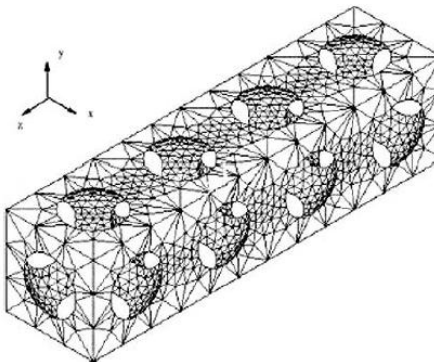


Figura 2.31 – Malha de elementos finitos do modelo da espuma metálica de células abertas [15]

Os autores concluíram que a tensão de cedência da espuma metálica aumenta quando a taxa de deformação aumenta, demonstrando a existência de um efeito da taxa de deformação. O efeito da taxa de deformação é explicado por o efeito microinterno resultante de uma parede celular relativamente espessa juntamente com uma arquitetura poligonal das espumas de alumínio. Outro efeito é a força de atrito entre as paredes e as células que aumenta com o aumento da velocidade de impacto (figura 2.32).



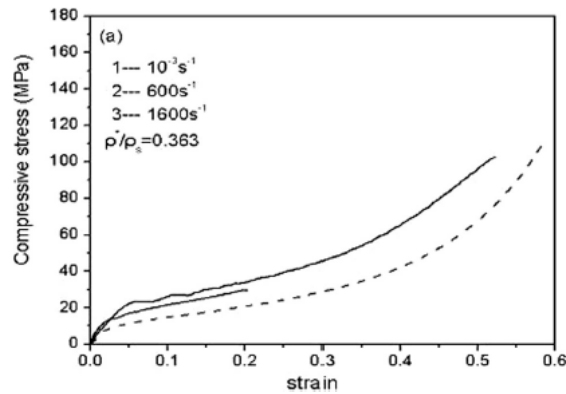


Figura 2.32 – Curva tensão-deformação do modelo à compressão [15]

Song *et al* [21] estudaram a o efeito da relação entre a espuma de alumínio e a coluna metálica que ocorre quando as secções cheias de espuma são carregadas axialmente. No estudo a coluna metálica é de aço, do tipo *top-hat* ou *double-hat* como representado na figura 2.33.

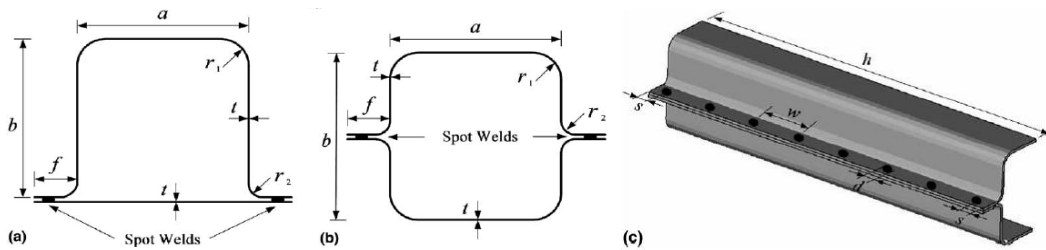


Figura 2.33 – Geometria da coluna: a) Seção transversal da coluna *top-hat*; b) Seção transversal da coluna *double-hat*; c) Ponto de soldadura numa coluna *double-hat* [21]

O comportamento das espumas metálicas é dividido em três regiões. A primeira é a região de densificação, a segunda é a região de extrema densificação e a última fase é a região indeformável. A figura 2.34 mostra as zonas totalmente esmagadas (A), deformadas elasticamente e indeformadas (C).

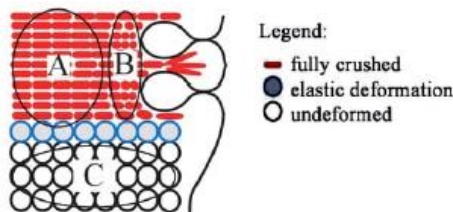


Figura 2.34 – Diagrama das três zonas existentes na espuma metálica numa solicitação ao impacto [21]

O aumento de dobras criadas através da introdução de material de enchimento de espuma metálica faz com que o grau de força das colunas com espuma metálica seja significativamente superior do que a soma do efeito da espuma metálica e do efeito da coluna, calculados separadamente. A figura 2.35 mostra a interação entre as cargas obtidas com o carregamento do conjunto espuma metálica e coluna, da soma da espuma metálica e da coluna, da coluna e da espuma metálica. É visível que o conjunto espuma metálica e coluna permitem obter cargas elevadas.

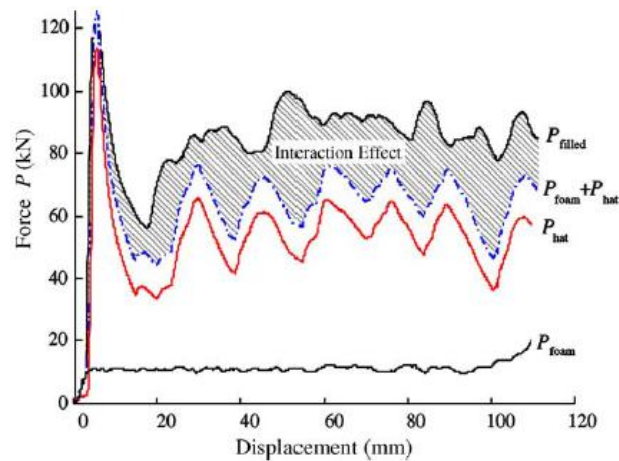


Figura 2.35 – Efeito da interação do carregamento do conjunto espuma metálica e coluna [21]

Rajendran *et al* [22] simularam numericamente cilindros de espumas de alumínio de célula fechada sofrendo impacto axial devido ao impacto de um martelo de queda, utilizando o Ansys/LS-DYNA. Os testes são axiais quase-estáticos. Segundo os autores, o comportamento plástico de uma espuma metálica é descrito pela utilização de um modelo de endurecimento do material da espuma metálica esmagada. O martelo utilizado na análise é de aço com 155 mm de diâmetro e 320 mm de altura. Na análise numérica, a energia cinética do martelo de 106 kg é transmitida à espuma metálica por meio da base de 155 mm de diâmetro. Para análise foram utilizados elementos sólidos de nós hexaédricos com um modelo de material bilinear para o martelo e multilinear para a espuma metálica. A espuma metálica tinha 100 mm de altura e 80 mm de diâmetro em que foi modelada com oito elementos sólidos de nós hexaédricos. Posteriormente foram realizados refinamentos na malha com comprimentos de arestas de 2, 4, 5, 10, 15 e 20 mm. O modelo numérico é representado na figura 2.36.

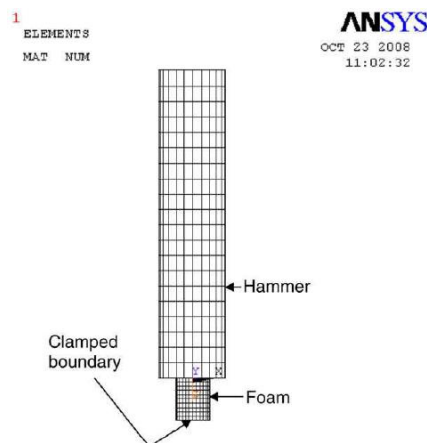


Figura 2.36 – Modelo de elementos finitos do martelo de impacto e da espuma de alumínio [22]

Desta forma, a variação da fração de energia elástica em função da velocidade de impacto é visível na figura 2.37.

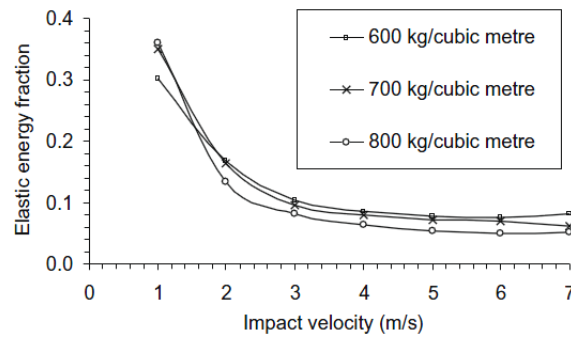


Figura 2.37 – Variação da fração de energia elástica em função da velocidade de impacto [22]

A variação da força de reação relativamente ao tempo e ao deslocamento para uma densidade de 600 kg/m<sup>3</sup> da espuma é representado na figura 2.38.

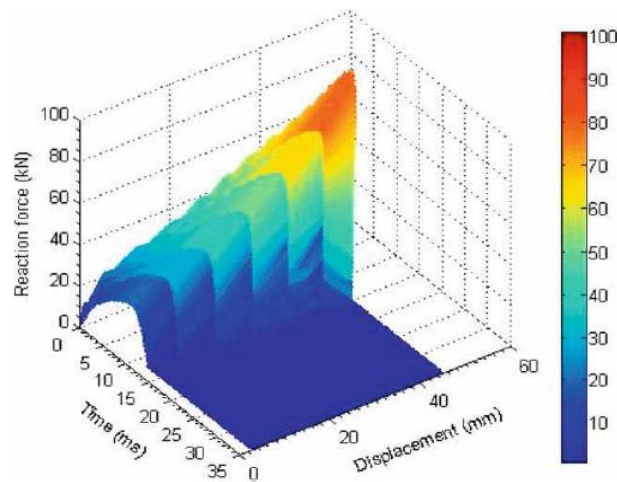


Figura 2.38 – Variação da reação da força em função do tempo e do deslocamento para uma densidade da espuma de 600 kg/m<sup>3</sup> [22]

### 2.7.2. DIFERENTES ABORDAGENS DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Para realizar uma simulação numérica de espumas metálicas existem três abordagens distintas que são a utilização de modelos constitutivos, como por exemplo, o de Gurson, a utilização de um modelo numérico detalhado em que uma curva tensão-deformação do material bem definida é inserida no programa de elementos finitos e é determinado o comportamento da espuma metálica. Uma outra abordagem é a utilização de um modelo numérico simplificado em que é inserida uma curva de resposta da espuma metálica e, posteriormente, é assumido que um cilindro maciço tem um comportamento igual ao do da espuma metálica.

Neste estudo a abordagem utilizada foi a do modelo numérico detalhado em que foi determinada uma curva tensão-deformação do mesmo material utilizado no fabrico das espumas metálicas e, após a inserção desta no programa de elementos finitos, foi determinada o comportamento da espuma metálica à compressão.



### 3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

O objetivo deste projeto é estudar o comportamento de espumas metálicas de célula aberta à compressão. Numa fase inicial é necessário definir o tipo de espumas utilizadas no estudo. Posteriormente é demonstrada a parte experimental do estudo que consiste em determinar as propriedades do material através de uma curva de um ensaio de tração realizado a provetes do mesmo material utilizado nas espumas e, também, são realizados ensaios de compressão às espumas de alumínio em estudo, com e sem parede. Através das curvas obtidas no ensaio experimental das espumas de alumínio será analisada a rigidez a rigidez específica, energia de deformação e energia de deformação específica das espumas e serão comparados os resultados.

#### 3.1. Tipo de espumas

O estudo realizado incidiu sobre dois tipos de espumas metálicas de células abertas, espumas de alumínio de células uniformes e de células *dual-size*. Como já foi referido, a diferença destas espumas encontra-se no arranjo das células que compõem a estrutura da espuma metálica.

A figura 3.1 demonstra a espuma metálica de células uniformes utilizada no estudo.

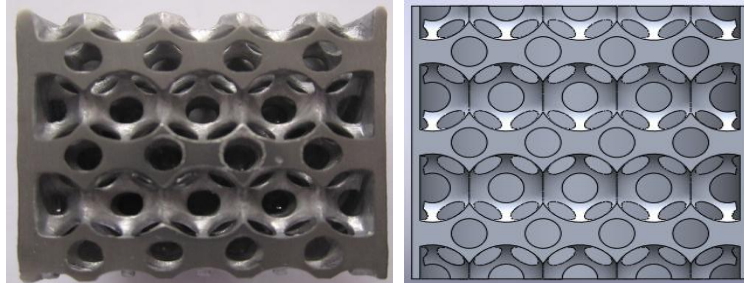


Figura 3.1 – Modelo da espuma de alumínio de células uniformes: a)real; b)CAD

Como já foi referido, uma espuma metálica de células uniformes é caracterizada pela distância entre os dois centros adjacentes das ligações largas ( $a$ ) e pelo raio das ligações largas ( $R$ ), que no caso em estudo são 1,38 mm e 7,5 mm, respetivamente.

A figura 3.2 demonstra a espuma metálica de células *dual-size*, também, utilizada no estudo.

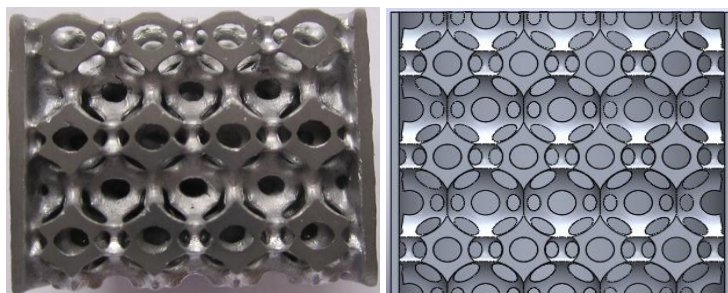


Figura 3.2 – Modelo da espuma de alumínio de células *dual-size*: a)real; b)CAD

No caso de espumas de célula *dual-size*, estas são caracterizadas, também, pelo raio das ligações secundárias ( $r$ ). No caso em estudo, a distância entre os dois centros adjacentes das ligações largas é 3,71 mm, o raio das ligações largas é 2 mm e o raio das ligações secundárias é de 0,85 mm.

### 3.2. Processo de fabrico das espumas

Ambas as espumas foram produzidas no laboratório de materiais funcionais na Universidade do Minho através de um processo de fundição por cera perdida. As etapas utilizadas neste processo estão representadas na figura 3.3.

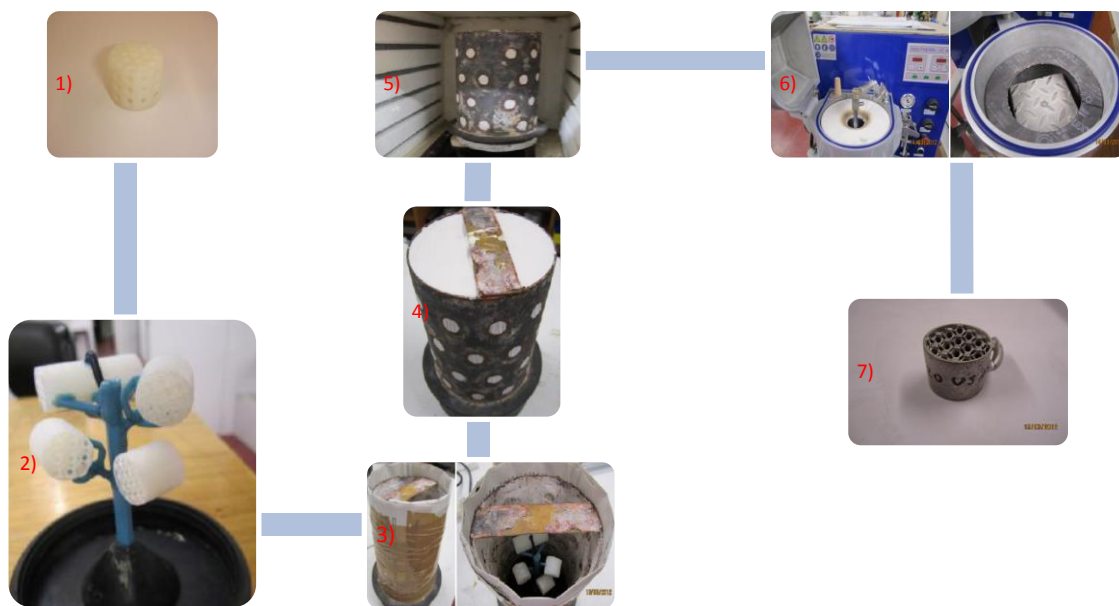


Figura 3.3 – Etapas da fundição por cera perdida das espumas metálicas utilizadas neste estudo

Na primeira etapa é efetuada a prototipagem rápida do modelo CAD da espuma metálica obtendo-se um objeto com a mesma geometria da espuma desenhada na ferramenta CAD, mas com o material utilizado na prototipagem rápida. Na segunda etapa é montada a árvore de fundição que é constituída por todo sistema de alimentação e por todos os objetos com a mesma geometria das espumas. A terceira etapa corresponde à moldação de todo o conjunto. Na quarta etapa a moldação é preenchida com uma mistura gesso/água e é secada durante 2 horas à temperatura ambiente. Na quinta etapa a moldação é aquecida num forno até a uma temperatura que não danifique o gesso existente na moldação e é removida a cera existente no conjunto de fundição. Na sexta etapa, após findado o ciclo térmico, inicia-se o vazamento do metal líquido, que neste caso é alumínio. A última etapa corresponde à remoção do gesso obtendo-se a espuma metálica pretendida.

### 3.3. Determinação das propriedades do material

As propriedades de um material são definidas por um ensaio de tração uma vez que através deste ensaio é possível identificar o comportamento do material. Para determinar o comportamento real das espumas metálicas é necessário determinar as propriedades mecânicas do material. A curva obtida num ensaio de tração é preponderante uma vez que, além de ser possível determinar o comportamento do material, todos os cálculos efetuados pelos programas de elementos finitos assentam sobre esta curva.

#### 3.3.1. ENSAIOS DE TRAÇÃO

O ensaio mecânico de tração é um método que consiste na aplicação de cargas axiais em provetes, de forma a possibilitar a obtenção das propriedades mecânicas dos materiais. No decorrer do ensaio são registados a força e o deslocamento instantaneamente sofrido por uma parte do provete, designada por área útil, possibilitando a construção da curva tensão-deformação do material, muito utilizada no ramo da engenharia. A área útil de um provete é definida por uma secção central menor do que as extremidades.

Num ensaio de tração os provetes são amarrados nas extremidades em que uma das extremidades é um apoio encastrado e na outra extremidade é aplicada a carga de tração. A carga provocada no provete é constante durante o ensaio e no instante em que a carga máxima é atingida, a área útil do provete diminui até atingir a rutura. A figura 3.4 demonstra as várias fases de um provete ensaiado à tração numa curva tensão-deformação.

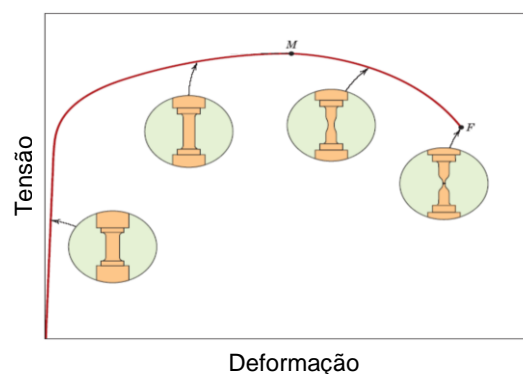


Figura 3.4 – Comportamento típico de um provete num ensaio de tração [23]

As propriedades do material são definidas através de um gráfico tensão-deformação ou tensão-extensão em que está claramente definida a zona elástica, a zona plástica e a rotura do provete. A tensão define a distribuição das forças por unidade de área e é calculada através da divisão entre a carga aplicada,  $P$ , e a área útil inicial do provete,  $A_0$  – equação 3.1.

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (3.1)$$

A partir da carga aplicada há uma deformação no provete que é calculada através da deformação deste ao longo do ensaio (equação 3.2).

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (3.2)$$

Em que  $l$  é o comprimento num dado instante e  $l_0$  é o comprimento inicial do provete.

A curva típica tensão-deformação de um material está representada na figura 3.5.

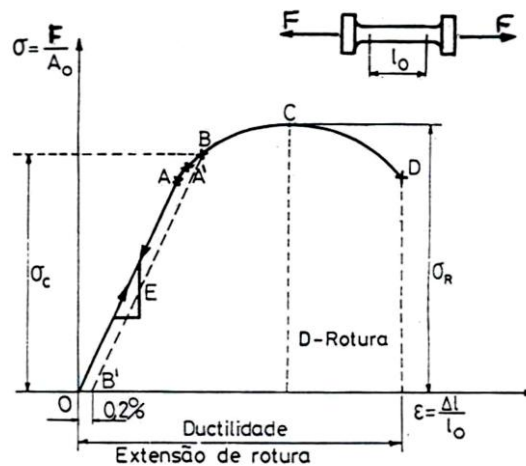


Figura 3.5 – Curva típica tensão-deformação de um material [24]

Numa curva tensão-deformação existem duas zonas que definem o comportamento do material – zona elástica e zona plástica. A elasticidade de um material é a propriedade que permite que um corpo, após retirada uma carga, retome o seu tamanho inicial. Esta propriedade é calculada através da lei de *Hooke* (equação 3.3).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.3)$$

O módulo de elasticidade também pode ser calculado graficamente, uma vez que em quase todos os materiais tem um comportamento elástico linear. Deduzindo a Lei de Hooke, este parâmetro do material corresponde ao declive de uma reta.



A zona plástica inicia-se após a tensão de cedência e caracteriza-se pela deformação irreversível que um corpo sofre. Gráficamente, a tensão de cedência pode ser calculada através de uma reta paralela à reta que define a elasticidade do material, para uma extensão de 0,2%.

### 3.3.2. ENSAIOS REALIZADOS

Os provetes ensaiados foram produzidos através do mesmo processo das espumas – fundição por cera perdida. Numa abordagem inicial do projeto os provetes utilizados para a determinação das propriedades do material são os da figura 3.6, em que as dimensões dos provetes estão no Anexo I.

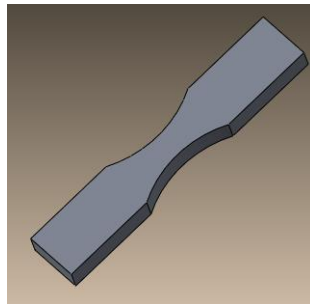


Figura 3.6 – Provetes de alumínio utilizados na primeira tentativa

Os provetes foram presos através de amarras de esmagamento e foram ensaiados na máquina de ensaios de tração disponibilizada no laboratório de ensaios mecânicos no departamento de engenharia mecânica (*Instron 8870*) com uma capacidade de carga total de 25 kN.

Foram ensaiados três provetes a uma velocidade de 0,05 mm/s. Os resultados obtidos no ensaio estão explícitos na figura 3.7.

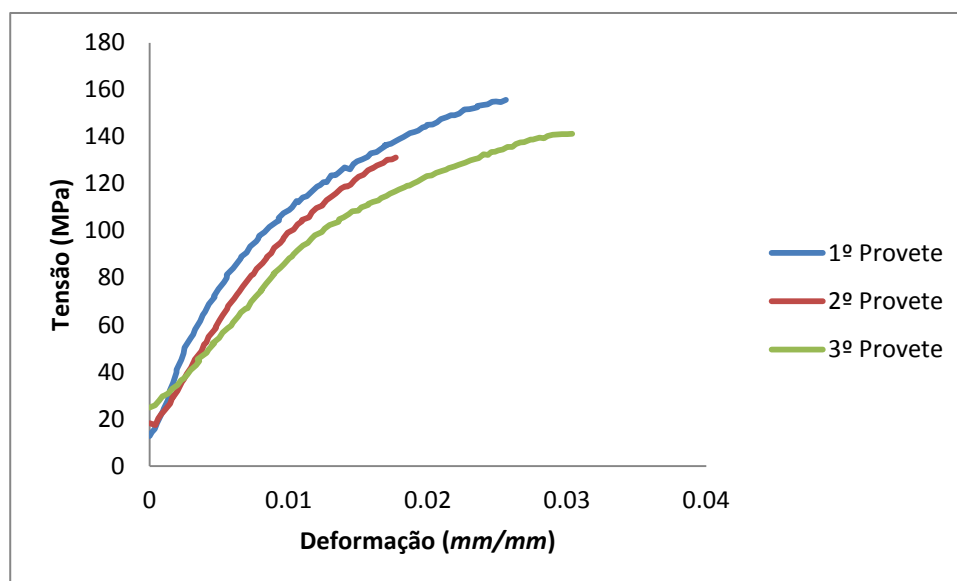


Figura 3.7 – Curvas tensão-deformação para os três provetes da primeira tentativa

Como é visível na figura 3.7, é difícil definir o módulo de elasticidade e, conseqüentemente a tensão de cedência nas curvas calculadas. O motivo encontrado para a não-linearidade da curva foi que a área útil dos provetes ensaiados não era linear o que conduzia a uma deformação não-linear ao longo do ensaio e, desta forma, não era possível definir a curva do material. A solução encontrada para resolver este entrave foi maquirar a área útil de forma a tentar obter uma zona linear. Assim, foram realizados novos ensaios de tração a provetes idênticos aos da figura 3.8. As dimensões dos provetes encontram-se no Anexo I.

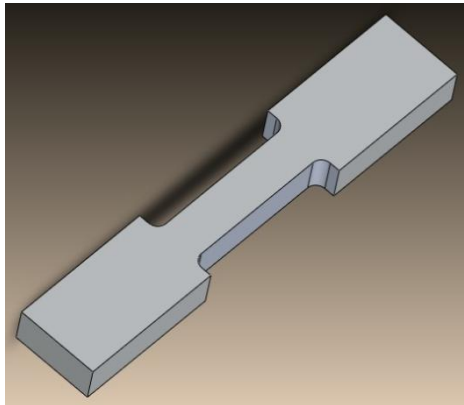


Figura 3.8 – Provetes de alumínio maquinados

Foram realizados ensaios a quatro provetes a uma velocidade de  $0,02 \text{ mm/s}$ . As curvas tensão-extensão obtidas nos ensaios estão representadas na figura 3.9 para cada um dos provetes ensaiados.

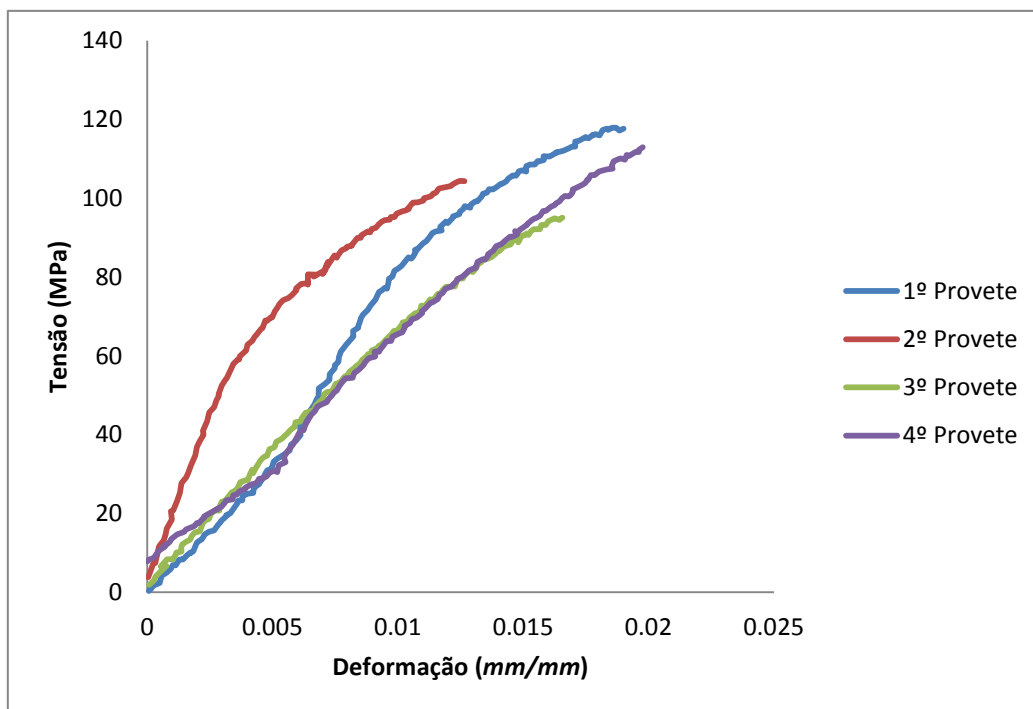


Figura 3.9 – Curvas tensão-deformação para os provetes da segunda tentativa

Como é claramente visível na figura 3.9, a única curva minimamente aceitável que resulta desta tentativa é a curva do segundo provete. Mesmo assim, a curva obtida não é uma curva típica do alumínio. No entanto, o módulo de elasticidade desta curva foi calculado graficamente e está representado na figura 3.10.

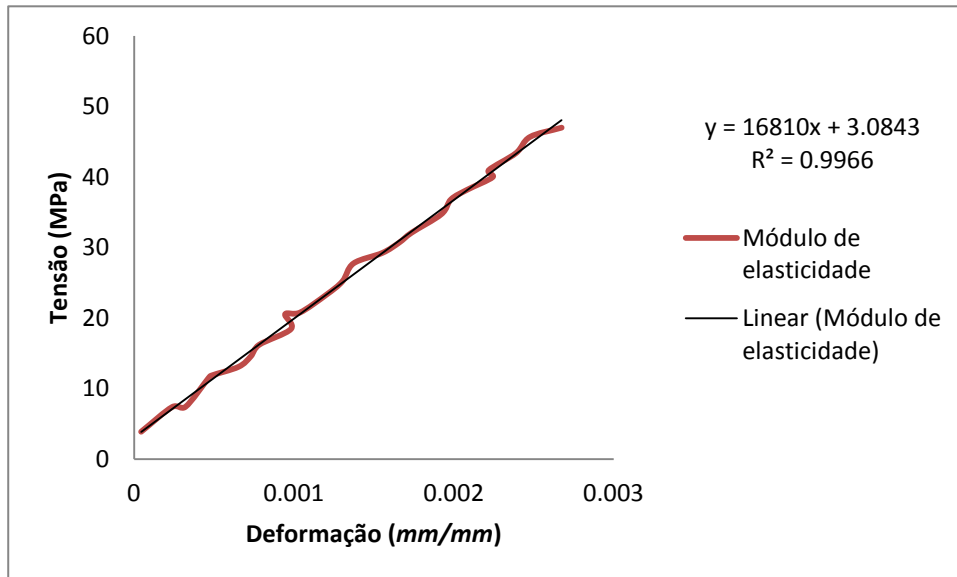


Figura 3.10 – Comportamento elástico do 2º provete e respetiva linha de tendência

Graficamente, o módulo de elasticidade corresponde ao declive da zona linear. Neste caso, o módulo de elasticidade é de, aproximadamente, 16,81 GPa. Os valores admissíveis para o módulo de elasticidade do alumínio variam entre 60 a 70 GPa.

Os motivos encontrados para este problema são que, como os provetes tracionados tinham dimensões relativamente pequenas e não permitiam a colocação do extensómetro na área útil do provete e a deformação medida era a dos provetes e do sistema de amarração. Logo, não era possível medir a deformação corretamente sem a colocação de extensómetros. Desta forma, consultou-se a norma *NP EN 10 002-1* que é referente a ensaios de tração. As dimensões recomendadas para provetes de seção retangular são os da tabela 1.

Tabela 1 – Dimensões dos provetes para ensaios de tração

Tipo de provete	Largura b	Comprimento inicial entre referências $L_0$	Comprimento da zona útil $L_c$	Comprimento mínimo livre entre maxilas para bandas de lados paralelos
Retangular	12,5 ± 1	50	75	87,5
Cilíndrico	20,0 ± 1	80	120	140

Através das dimensões disponibilizadas na norma portuguesa para ensaios de tração, foram produzidos provetes idênticos aos da figura 3.11. As dimensões destes provetes estão no Anexo I.

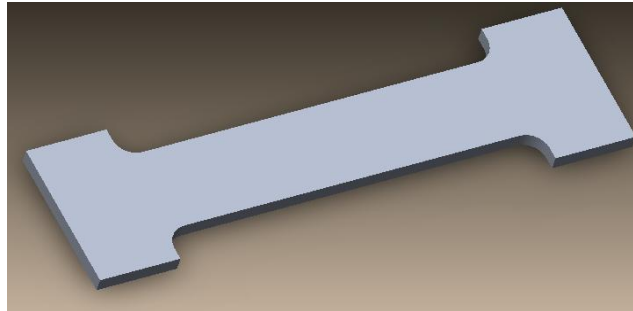


Figura 3.11 – Provetes de alumínio utilizados na terceira tentativa

Com estas dimensões da área útil foi possível colocar extensómetros durante o ensaio de tração, como é visível através da figura 3.12.



Figura 3.12 – Sistema de amarração e colocação do extensómetro num provete terceira tentativa

Foram ensaiados três provetes a uma velocidade de  $0,01 \text{ mm/s}$ . A rutura dos dois primeiros provetes deu-se na extremidade da área útil perto do raio de concordância dos provetes, enquanto que no terceiro provete a rutura deu-se numa zona mais central, como é visível na figura 3.13.

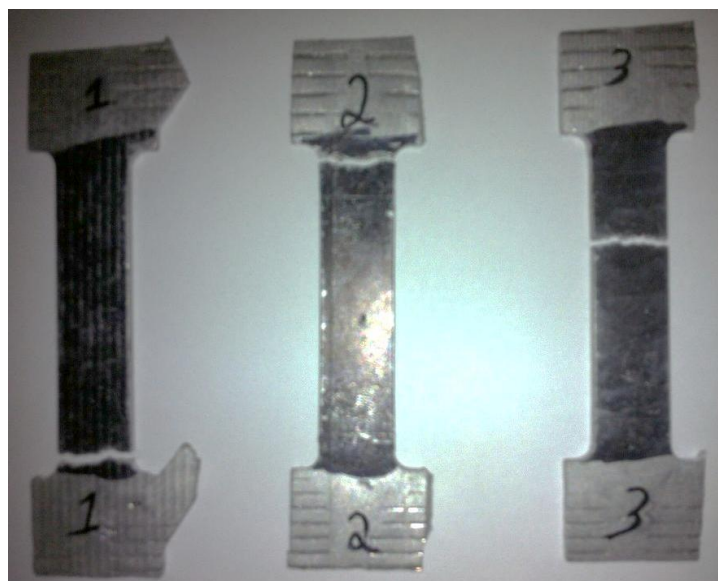


Figura 3.13 – Estado dos provetes após o ensaio de tração

A área útil é calculada através da largura e da espessura do provete e a rutura destes normalmente dá-se onde a área for mais baixa. No caso dos dois primeiros provetes, a largura não era constante e era menor na zona onde se deu a rutura. Outro problema encontrado durante o ensaio foram porosidades existentes nos provetes, como é visível na figura 3.14.

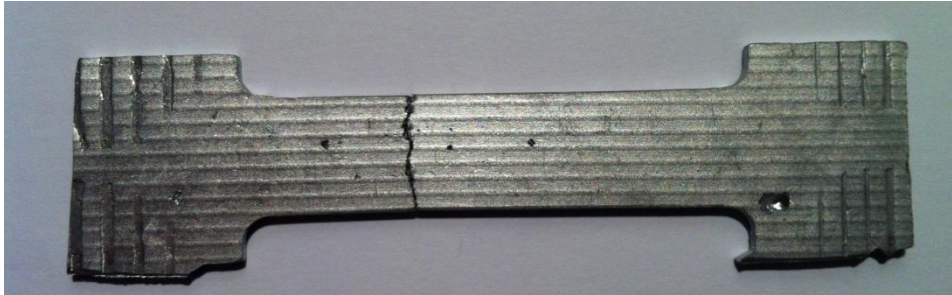


Figura 3.14 – Ilustração das porosidades existentes nos provetes

A presença de porosidades nos provetes pode alterar o comportamento do material e, consequentemente alterar o valor das tensões de cedência e rutura.

As curvas obtidas, para cada um dos provetes ensaiados, estão representadas na figura 3.15.

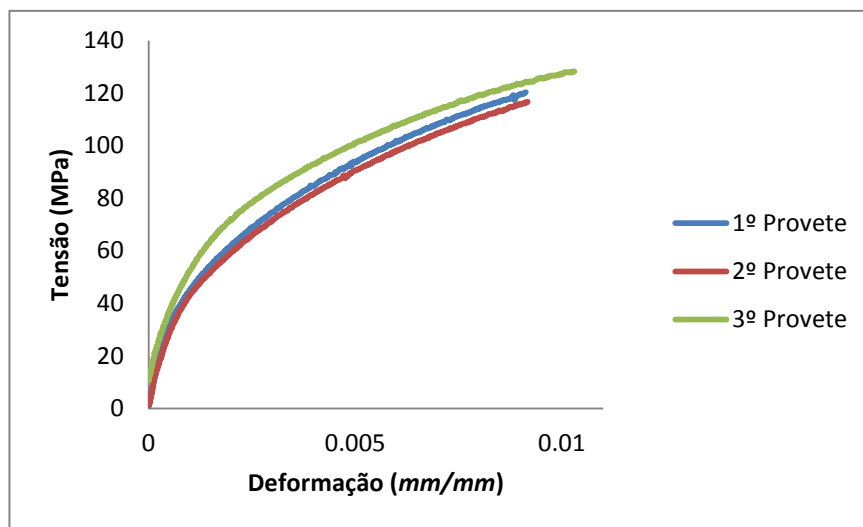


Figura 3.15 – Curvas tensão-deformação para os provetes da terceira tentativa

Como é visível na figura 3.15, existem diferenças entre a curva do terceiro provede e a curva dos dois primeiros provedes. O modo de rutura pode ser o motivo para esta diferença.

As curvas determinadas não são curvas muito comuns do alumínio. Qualquer das formas calculou-se o módulo de elasticidade graficamente para cada um dos provedes.

O módulo elasticidade para o primeiro provede é obtido através da figura 3.16.

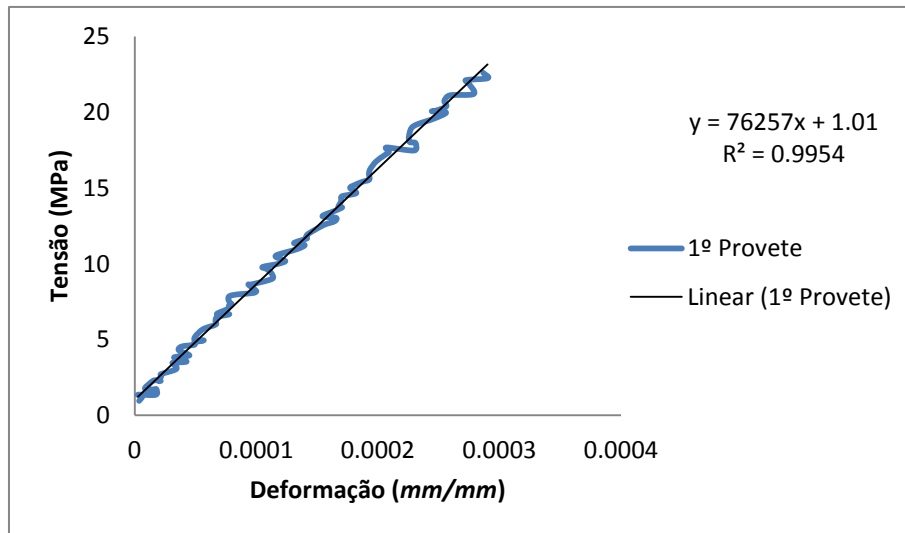


Figura 3.16 – Cálculo do módulo de elasticidade para o primeiro provete da terceira tentativa

Como é visível através da figura 3.16, o módulo de elasticidade obtido é de aproximadamente 76 MPa que é ligeiramente superior ao admissível. De forma análoga, foram calculados os módulos de elasticidade dos outros dois provetes e os valores obtidos estão na tabela 2.

Tabela 2 – Módulos de elasticidade dos provetes da terceira tentativa

<b>Provete</b>	<b>Módulo de Elasticidade</b>
Primeira tentativa	76 GPa
Segunda tentativa	63 GPa
Terceira tentativa	57 GPa

Como é visível, o único valor do módulo de elasticidade compreendido entre os valores teóricos (60 a 70 GPa) é o da segunda tentativa. No entanto, como a fratura do terceiro provete se deu numa zona que estava compreendida na de medição do extensómetro, então os resultados obtidos no terceiro provete são mais confiáveis e são os utilizados ao longo deste estudo.

Após calculados os módulos de elasticidade, é possível calcular graficamente as tensões de cedência para cada um dos provetes. Graficamente, a tensão de cedência é calculada através de uma reta que é traçada no ponto 0,002 paralela à reta que define a zona elástica na curva tensão-deformação de cada provete. O ponto de interseção da reta traçada com a curva tensão-deformação é a tensão de cedência. Para o primeiro provete desta tentativa, o cálculo da tensão de cedência é demonstrado na figura 3.17.

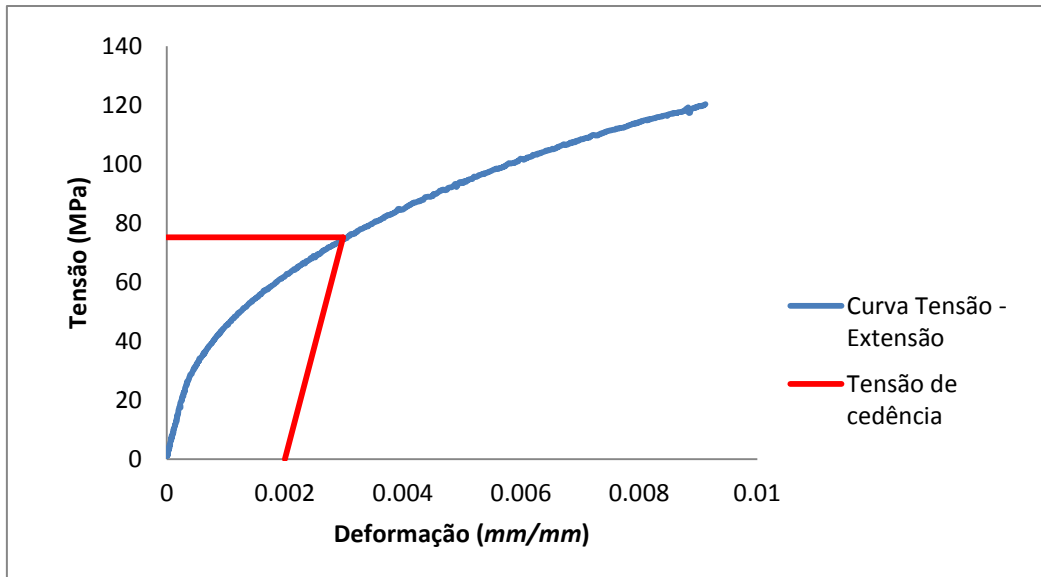


Figura 3.17 – Cálculo da tensão de cedência para o primeiro provete da terceira tentativa

A tensão de cedência obtida é de, aproximadamente, 75 MPa. De forma análoga calculou-se as tensões de cedência para os restantes provetes. Os valores estão apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Alongamento à rotura e tensões de cedência e rutura dos provetes da terceira tentativa

Provetes	Tensão de Cedência	Tensão de Rotura	Alongamento à rotura
Primeira tentativa	75 MPa	120 MPa	0,25 mm
Segunda tentativa	74 MPa	117 MPa	0,29 mm
Terceira tentativa	90 MPa	130 MPa	0,5 mm

A curva do material escolhida para inserir no programa foi a do terceiro provete, uma vez que a fratura do provete deu-se numa zona central, o que traduz uma maior confiança. Por outro lado, as tensões de cedência e rutura obtidas com este provete são superiores às dos outros provetes, como é possível verificar através do Anexo II

### 3.3.3. PROPRIEDADES QUÍMICAS DO ALUMÍNIO

O comportamento do alumínio é influenciado pelas propriedades químicas. O alumínio utilizado nas espumas é o A413.1 e as propriedades químicas desta liga são as da tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades químicas do alumínio A413.1 [25]

Elementos	Si	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn	Ni	Al
Teor [%]	11,0 – 13,0	1,0	1,0	0,10	0,35	0,40	0,50	Restante

A presença de ferro na liga influencia a resistência e a ductilidade do material. Quanto maior percentagem de ferro existir, menor será a resistência e ductilidade da liga. Quanto ao silício, este é importante para a fundição de ligas de alumínio, uma vez que permite que a liga tenha uma boa fluidez e diminui a contração do material durante o arrefecimento. Contudo, a presença deste elemento químico reduz a ductilidade do material, uma vez que nas ligas de Al-Si a microestrutura bruta de fundição é geralmente composta por partículas de silício que apresenta uma estrutura acicular. Conclui-se, então, que o silício numa liga de alumínio reduz a capacidade de deformação plástica de qualquer componente que utiliza este tipo de ligas. [26]

O módulo de elasticidade é outra propriedade que varia consoante a percentagem dos elementos químicos utilizados na liga. A figura 3.18 mostra a influência que os elementos utilizados nas ligas de alumínio têm no módulo de elasticidade.

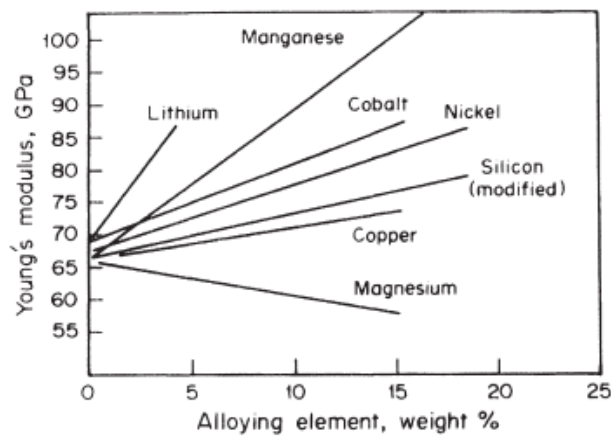


Figura 3.18 – Variação do módulo de elasticidade com a percentagem de elementos de liga em ligas de alumínio [35]

Como é visível na figura 3.18, o lítio e o manganês aumentam consideravelmente o módulo de elasticidade. Inversamente, o magnésio diminui o valor do módulo de elasticidade.

No anexo II é possível verificar algumas propriedades mecânicas para a liga de alumínio utilizada neste caso de aplicação concreto.

### 3.4. Curva a utilizar nos programas de elementos finitos

Como já foi referido, a curva tensão-extensão escolhida para inserir nos programas de elementos finitos é a do terceiro provete da terceira tentativa. As propriedades do alumínio inseridas no programa são apresentadas na tabela 5.



Tabela 5 – Propriedades do alumínio inseridas nos programas de elementos finitos

Módulo de Elasticidade [GPa]	Tensão de Cedência [MPa]	Coefficiente de Poisson	Densidade mássica [g/cm <sup>3</sup> ]
57	90	0,33	2,7

Numa análise estática não linear num programa de elementos finitos, a curva de plasticidade é um dos parâmetros mais importantes visto que é o que define o comportamento plástico dos componentes em estudo.

Como já foi referido, a plasticidade inicia-se quando é atingido um valor de tensão superior à tensão de cedência. Desta forma, a curva de plasticidade é definida por todas as tensões superiores à tensão de cedência.

As curvas de plasticidade inseridas nos programas de elementos finitos são as curvas reais. Os resultados obtidos num ensaio de tração representam o comportamento convencional do material em que a secção do provete é considerada constante (curva nominal). Na realidade existe um decréscimo da área útil do provete ao longo do ensaio e a carga necessária para prosseguir a deformação baixa. Com este decréscimo da carga, a tensão também diminui após atingida a carga máxima, como é visível verificar através da figura 3.19.

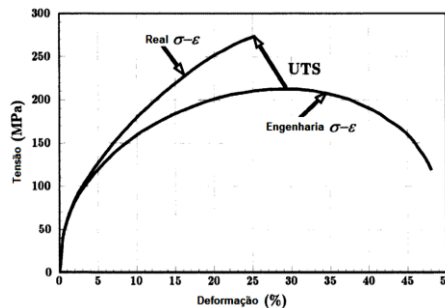


Figura 3.19 – Comparação entre as curvas tensão-extensão real e de engenharia [36]

Para solucionar este problema é utilizada uma tensão verdadeira que é baseada na área instantânea do provete, garantindo um crescimento da curva tensão-extensão até ao instante da fratura. Se a tensão também forem valores instantâneos, é possível traçar a curva tensão-extensão verdadeira, que caracteriza o comportamento plástico do material.

É possível relacionar os valores da tensão e da extensão retirados do ensaio de tração através das equações 3.4 e 3.5 e, desta forma, obter o comportamento real dos provetes.

$$\bar{\sigma} = \sigma \cdot (1 + \varepsilon) \quad (3.4)$$

$$\bar{\epsilon} = \ln(1 + \epsilon) \quad (3.5)$$

Aplicando estas duas equações para valores de tensão e extensão, posteriores aos valores da tensão e da extensão quando se inicia a cedência do provete, é possível obter a curva de tensão-extensão real que vai ser inserida no programa. A figura 3.20 compara a curva tensão-deformação obtida no ensaio de tração e a curva tensão-deformação real.

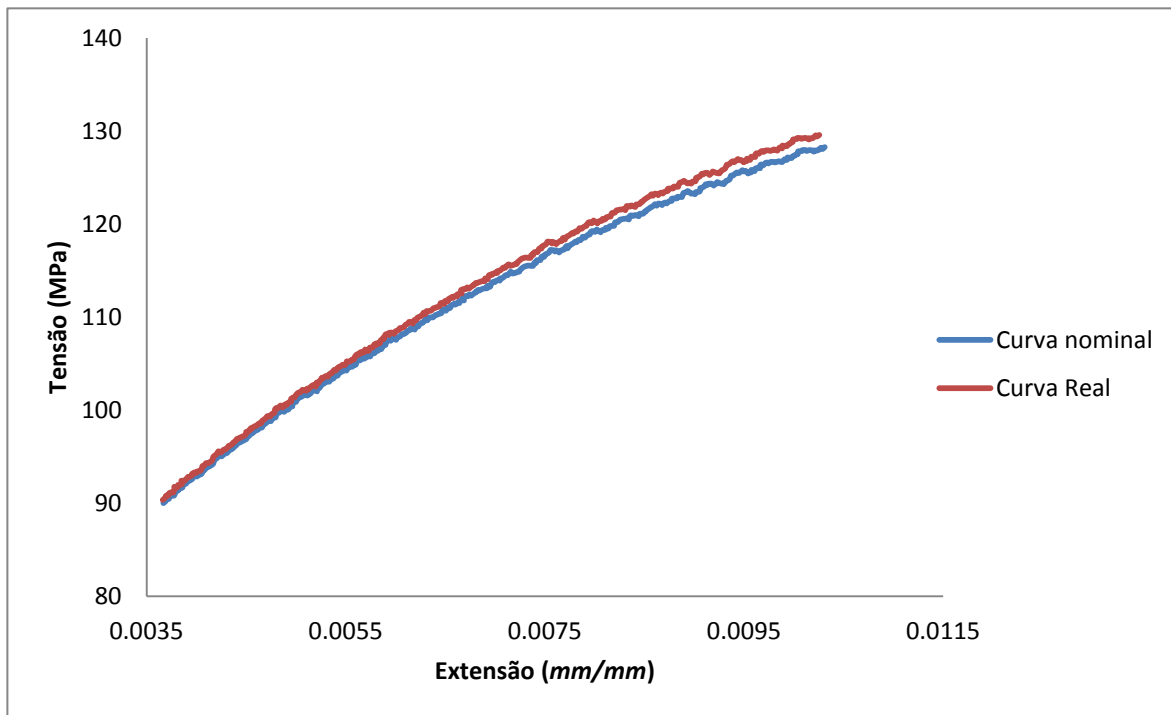


Figura 3.20 – Comparação entre a curva nominal e a curva real do provete ensaiado

A curva real do domínio plástico do provete em análise inicia-se no ponto da cedência – 90 MPa. A tensão de rutura desta curva é de 130 MPa, aproximadamente. Os pontos da curva real para inserir nos programas de elementos finitos estão no anexo III.

### 3.5. Ensaio de compressão às espumas em estudo

Foram ensaiadas experimentalmente uma espuma uniforme e outra *dual-size*, à compressão, na mesma máquina em que foram realizados os ensaios de tração (*Instron 8870*). Para ser possível a realização do ensaio, foram colocadas duas placas de aço nas extremidades das espumas como é visível na figura 3.21.



Figura 3.21 – Disposição das espumas no ensaio à compressão: a) Uniforme e b) *Dual-size*

Num ensaio à compressão, é necessário inserir na máquina o deslocamento do provete pretendido. No caso da espuma uniforme, o deslocamento inserido na máquina foi de 26 mm. O comprimento total da espuma é de 38,5 mm, aproximadamente, e a velocidade do ensaio foi de 10 mm/min. A figura 3.22 mostra o estado final da espuma de células uniformes no ensaio experimental à compressão.



Figura 3.22 – Estado final da espuma uniforme no ensaio de compressão

Os resultados obtidos no ensaio expressam-se pela curva carga-deslocamento e, para a espuma uniforme, estão apresentados na figura 3.23.

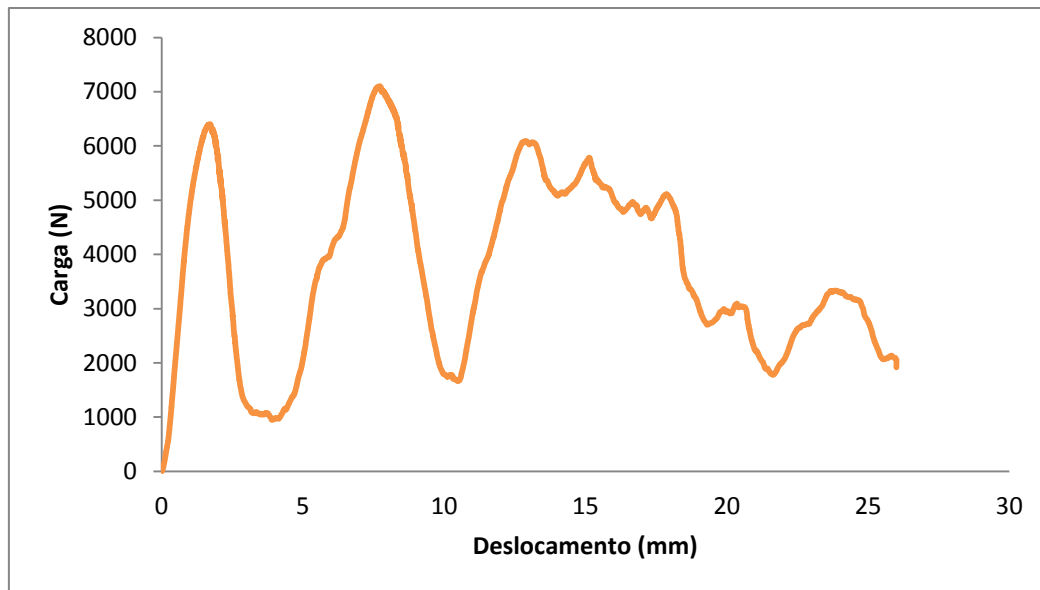


Figura 3.23 – Curva carga-deslocamento da espuma uniforme à compressão

No gráfico, o aumento da carga representa a deformação da espuma. Por outro lado, a diminuição da carga é resultante da rutura das fibras e da parede que complementam a espuma. É visível que após uma certa deformação da espuma, as fibras entram em rutura e que, após a densificação das fibras, a espuma continua a deformar novamente.

Quanto à espuma *dual-size*, a amostra testada tinha 38,5 mm de altura. O deslocamento inserido na máquina foi 20 mm e a velocidade foi a mesma utilizada na espuma uniforme. A figura 3.24 mostra o estado da espuma *dual-size* após o ensaio de compressão.



Figura 3.24 – Estado final da espuma *dual-size* no ensaio de compressão

A figura 3.25 mostra o gráfico carga-deslocamento obtido no ensaio à compressão da espuma *dual-size*.

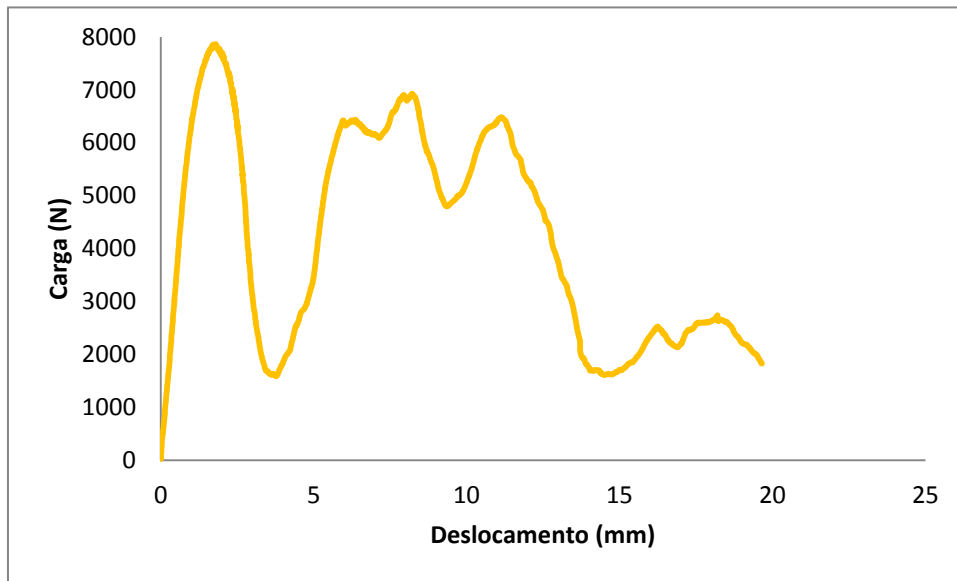


Figura 3.25 – Curva carga-deslocamento da espuma *dual-size* à compressão

Tal como na espuma uniforme, o acréscimo da carga demonstra a deformação das fibras da espuma, enquanto que o decréscimo demonstra a rutura e densificação da espuma.

Após as curvas estarem definidas, é possível comparar os resultados experimentais para a espuma uniforme e para a espuma *dual-size* (figura 3.26).

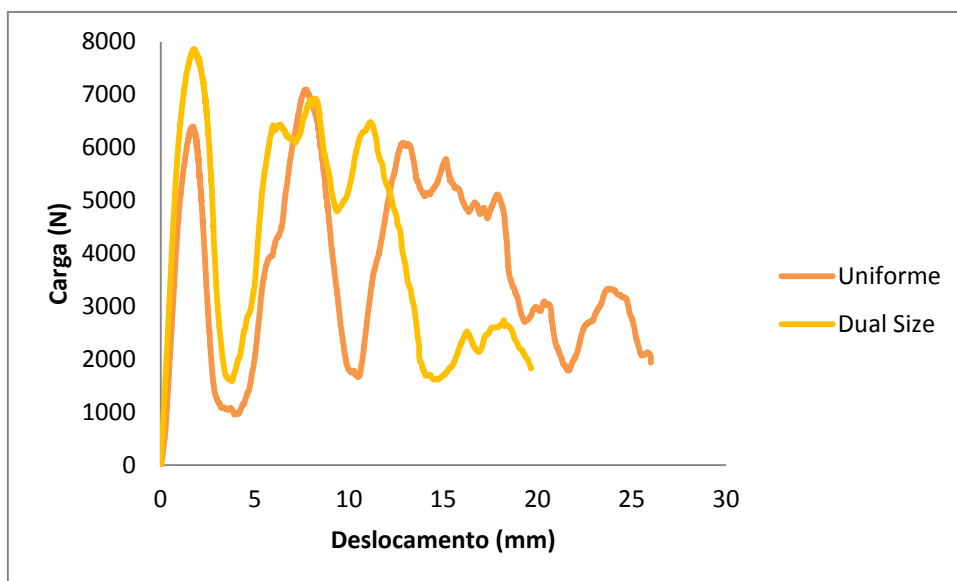


Figura 3.26 – Comparação entre as curvas carga-deslocamento experimentais das espumas uniforme e *dual-size*

Através desta comparação é perceptível que a espuma *dual-size* suporta carregamentos superiores para a mesma deformação que a espuma uniforme, o que demonstra uma maior rigidez das espumas *dual-size*.

Foram realizados, também, ensaios de compressão a espumas mas sem a parede exterior. A remoção da parede exterior permite a extração total do gesso resultante do processo de fundição, o que conduz a uma maior confiança nos resultados obtidos.

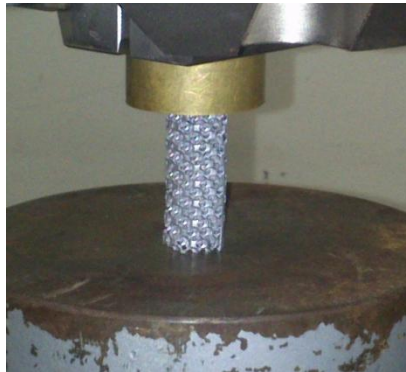


Figura 3.27 – Espuma de células uniformes sem parede

Foram ensaiados quatro provetes de espumas de células uniformes com 38 mm de altura (figura 3.27), a uma velocidade de 10 mm/min, em que o deslocamento inserido na máquina foi de 26mm. Os resultados obtidos estão apresentados na figura 3.28.

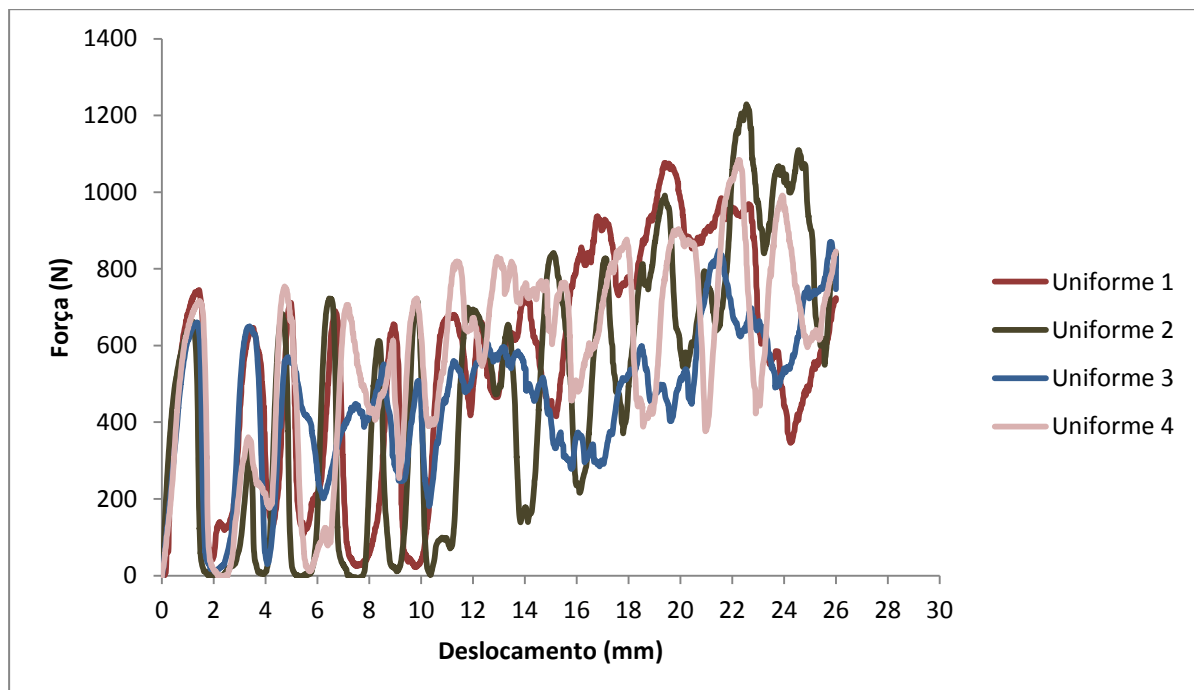


Figura 3.28 – Curvas carga-deslocamento das espumas de células uniformes sem parede

É visível que o comportamento elásto-plástico das quatro espumas é similar o que demonstra uma grande confiança nos ensaios realizados.

Na figura 3.29 é possível verificar o estado final da espuma após o ensaio de compressão.

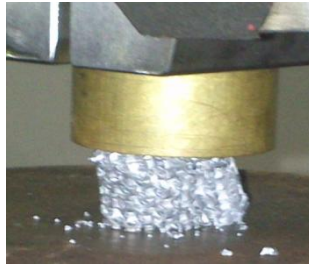


Figura 3.29 – Estado final da espuma de células uniformes sem parede

Foram ensaiadas, também, quatro espumas de células *dual-size* sem a parede exterior. A figura 3.30 demonstra uma destas espumas antes do ensaio realizado. Os parâmetros do ensaio inseridos na máquina de tração (velocidade e deslocamento) foram iguais aos utilizados no caso das espumas de células uniformes.



Figura 3.30 – Espuma de células *dual-size* sem parede

Os resultados obtidos nos quatro ensaios de compressão estão visíveis na figura 3.31.

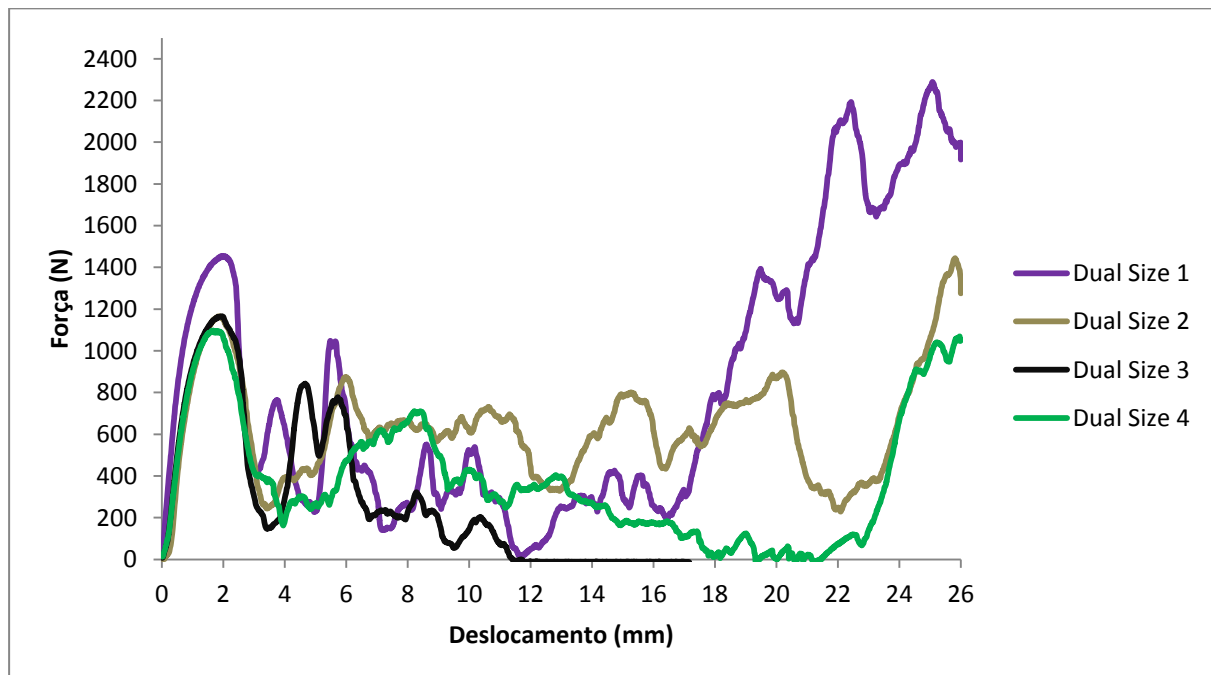


Figura 3.31 – Curvas carga-deslocamento das espumas de células *dual-size* sem parede

É notável a semelhança das curvas dos ensaios, o que mais uma vez demonstra que os ensaios experimentais correram bem.

A figura 3.32 mostra uma compara o comportamento entre uma espuma de células uniformes e uma espuma de células dual size. Não foi utilizado nenhum critério de seleção uma vez que o comportamento elásto-plástico é idêntico em todos os tipos de espumas testadas.

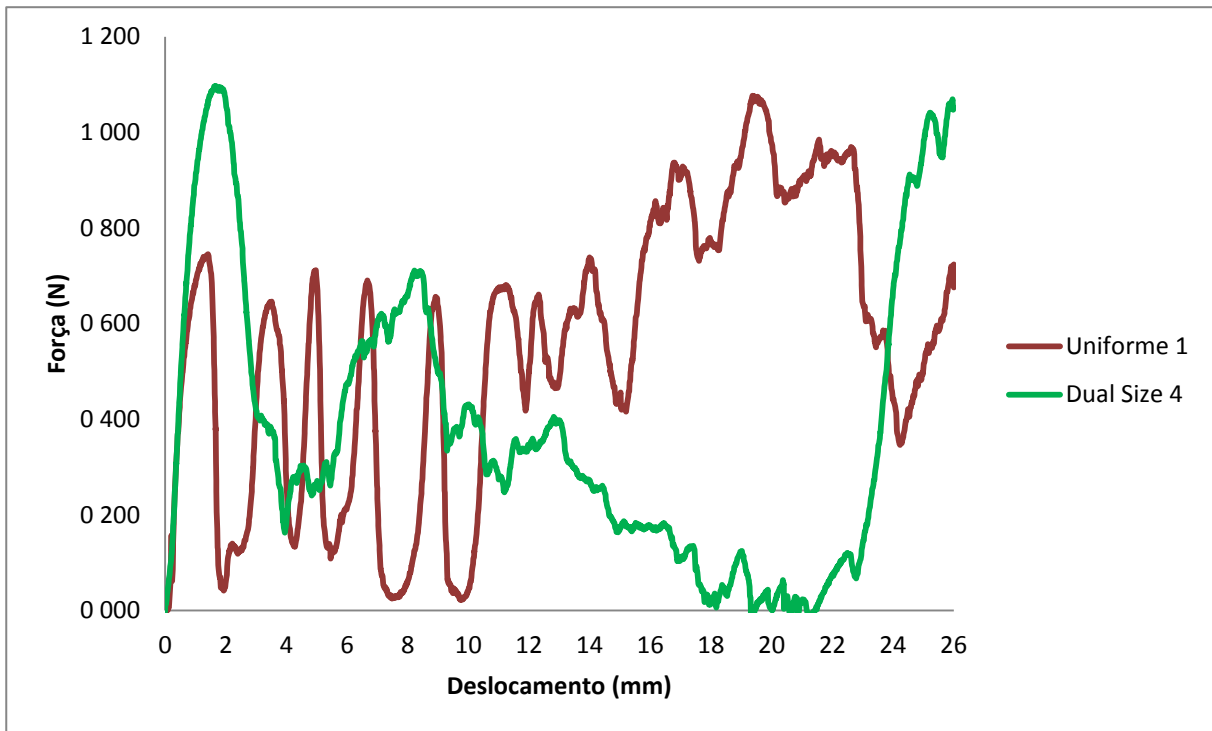


Figura 3.32 – Comparação entre uma espuma de células uniformes e uma espuma *dual-size*

Verifica-se, através destes ensaios experimentais, um melhor comportamento elásto-plástico da espuma *dual-size* uma vez que suporta cargas mais elevadas neste domínio de comportamento desta.

### 3.6. Rigidez

Após a determinação das curvas carga-deslocamento é possível determinar a rigidez de cada espuma. A rigidez de um material,  $\kappa$ , é a capacidade que um elemento sólido ou elemento estrutural tem para suportar esforços sem adquirir grandes deformações ou deslocamentos e é definida pela inclinação da reta linear da curva carga-deslocamento. Esta é expressa através da equação 3.6.

$$\kappa = \frac{P}{\delta} \quad (3.6)$$



Em que  $\kappa$  é a rigidez expressa em N/m,  $d$  é o deslocamento em metros e  $P$  é a carga aplicada. Este parâmetro é medido na zona elástica do componente em análise e, graficamente, é medido como é visível na figura 3.33.

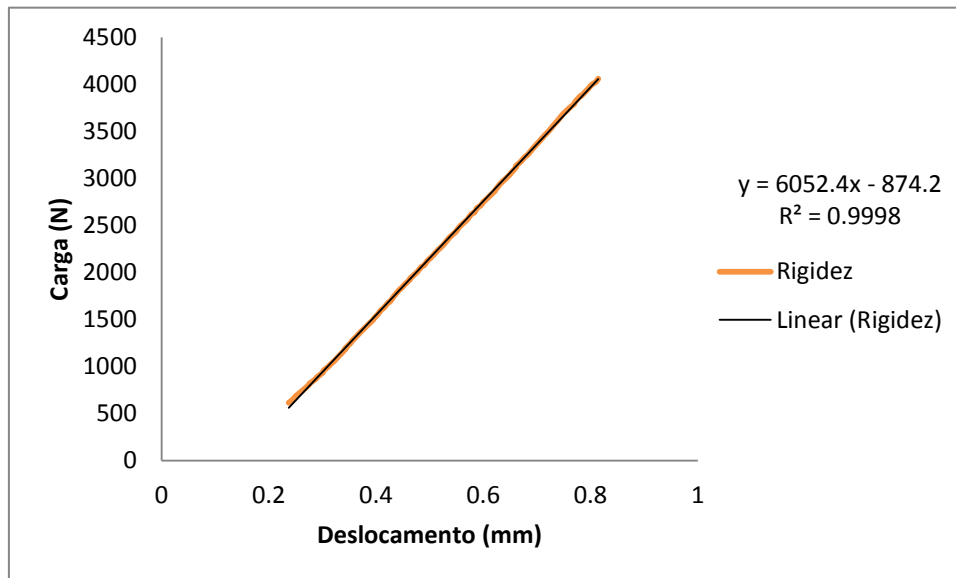


Figura 3.33 – Cálculo gráfico da rigidez da espuma de alumínio de células uniformes na análise experimental

A rigidez da espuma de células uniformes com parede obtida no ensaio experimental é de 6 052 N/mm. De forma análoga foram calculados os valores da rigidez para a espuma de células *dual-size*, com e sem parede, e para a espuma de células uniformes sem parede – tabela 6.

Tabela 6 – Valores da rigidez das espumas metálicas com e sem parede

	<b>Espuma Metálica</b>	<b>Rigidez (N/m)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Com parede	Uniforme	$6 \times 10^6$	-	-
	<i>Dual-size</i>	$7 \times 10^6$		
Sem parede	Uniforme 1	$1,18 \times 10^6$	$0,95 \times 10^6$	$0,23 \times 10^6$
	Uniforme 2	$1,1 \times 10^6$		
	Uniforme 3	$0,7 \times 10^6$		
	Uniforme 4	$0,8 \times 10^6$		
	<i>Dual-Size 1</i>	$1,5 \times 10^6$	$1,28 \times 10^6$	$0,13 \times 10^6$
	<i>Dual-Size 2</i>	$1,23 \times 10^6$		
	<i>Dual-Size 3</i>	$1,32 \times 10^6$		
	<i>Dual-Size 4</i>	$1,23 \times 10^6$		

É visível que os valores da rigidez obtidos nos ensaios experimentais realizados às espumas sem parede são relativamente próximos. Quanto à diferença da rigidez obtida entre as espumas *dual-size* e as uniformes verifica-se, como era expectável, uma maior rigidez das *dual-size*. No entanto, esta diferença é maior para as espumas com parede do que para as sem parede. Para quantificar melhor a

diferença dos valores de rigidez das espumas, será calculada a rigidez por unidade de massa (equação 3.7)

$$\dot{\kappa} = \frac{\kappa}{m} \quad (3.7)$$

Para determinar a massa de cada espuma, foi recorrido ao *SolidWorks* (ferramenta CAD utilizada para desenhar as espumas) em que através deste *software* é possível obter o volume de cada espuma que, através da densidade volúmica é possível determinar a massa – equação 3.8.

$$m = \rho \cdot V \quad (3.8)$$

O valor teórico da densidade volúmica do alumínio admitida é de 2,7 g/cm<sup>3</sup>. As massas dos dois tipos de espumas, com e sem parede, estão quantificadas na tabela 7.

Tabela 7 – Massa dos dois tipos de espumas com e sem parede

	<b>Tipo de Espuma Metálica</b>	<b>Massa (g)</b>
Com parede	Uniforme	4,1
	<i>Dual-size</i>	3,8
Sem parede	Uniforme	2,1
	<i>Dual-size</i>	1,6

Logo, a rigidez por unidade de massa é apresentada na tabela 8.

Tabela 8 – Rigidez específica das espumas metálicas ensaiadas experimentalmente

	<b>Espuma Metálica</b>	<b>Rigidez Específica (N/mg)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Com parede	Uniforme	14,6 × 10 <sup>5</sup>	-	-
	<i>Dual-size</i>	18,4 × 10 <sup>5</sup>		
Sem parede	Uniforme 1	5,62 × 10 <sup>5</sup>	4,53 × 10 <sup>5</sup>	1,1 × 10 <sup>5</sup>
	Uniforme 2	5,24 × 10 <sup>5</sup>		
	Uniforme 3	3,33 × 10 <sup>5</sup>		
	Uniforme 4	3,81 × 10 <sup>5</sup>		
	<i>Dual-Size 1</i>	9,38 × 10 <sup>5</sup>	7,97 × 10 <sup>5</sup>	7,97 × 10 <sup>4</sup>
	<i>Dual-Size 2</i>	7,69 × 10 <sup>5</sup>		
	<i>Dual-Size 3</i>	8,25 × 10 <sup>5</sup>		
	<i>Dual-Size 4</i>	7,69 × 10 <sup>5</sup>		

Como é visível, a espuma metálica *dual-size* tem uma rigidez superior do que a espuma metálica de células uniformes o que demonstra que com a utilização da primeira é possível obter estruturas mais leves para o mesmo tipo de carregamento.

### 3.7. Energia de deformação

A energia de deformação,  $U$ , é a energia gasta pela ação das forças externas na deformação de um corpo elástico, ou seja, a energia de deformação corresponde ao trabalho realizado por uma carga  $P$  quando aplicada sobre uma determinada estrutura. Este trabalho realizado pela carga é o produto entre a intensidade da carga,  $P$ , e um pequeno alongamento,  $dx$ , como é demonstrado na figura 3.34.

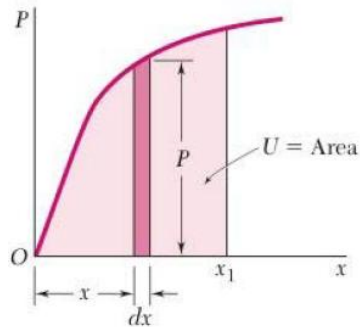


Figura 3.34 – Cálculo da energia de deformação [27]

A equação 3.9 é a utilizada para calcular a energia de deformação de um material.

$$U = \sum (\Delta d \times P_{med}) \quad (3.9)$$

Em que  $\Delta d$  é um pequeno deslocamento e  $P_{med}$  é a carga média nesse mesmo deslocamento.

Graficamente, a energia de deformação é a área que se encontra abaixo da curva carga-deslocamento da espuma metálica, como é visível na figura 3.35.

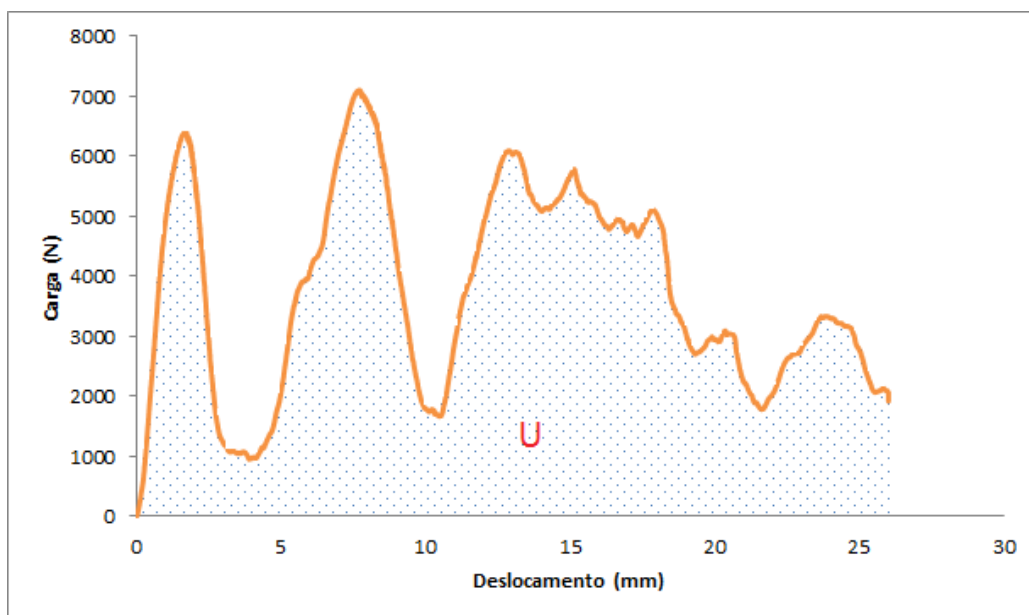


Figura 3.35 – Área representativa da energia de deformação da espuma metálica de células uniformes

Foram calculados os valores das energias de deformação para os dois tipos de espumas de alumínio com e sem parede. Também foi calculada a energia por unidade de massa. Estes valores podem ser consultados na tabela 9. Neste capítulo, a energia de deformação calculada envolvia as zonas elástica, plástica e de densificação da espuma metálica. O deslocamento máximo admitido foi de 20 mm que corresponde ao valor máximo de deslocamento da espuma *dual-size*.

Para o cálculo da energia específica é utilizada a equação 3.10.

$$\dot{U} = \frac{U}{m} \quad (3.10)$$

Tabela 9 – Valores da energia e da energia específica das espumas com e sem parede

	<b>Espuma Metálica</b>	<b>Energia (J)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Energia Específica (J/g)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Com parede	Uniforme	41,2	-	-	10,1	-	-
	<i>Dual-size</i>	22,5			5,9		
Sem parede	Uniforme 1	5,1	4,6	0,7	2,4	2,2	0,34
	Uniforme 2	3,8			1,8		
	Uniforme 3	4,1			1,95		
	Uniforme 4	5,2			2,5		
	<i>Dual-Size 1</i>	5,4	5	1,6	3,33	3	1
	<i>Dual-Size 2</i>	6,3			3,9		
	<i>Dual-Size 3</i>	2,6			1,6		
	<i>Dual-Size 4</i>	3,8			2,5		

Nos valores de energia obtidos nos ensaios realizados às espumas de alumínio com parede é possível verificar que a de células uniformes absorveu mais energia do que a *dual-size* o que contradiz os resultados obtidos por *Kou et al* [16]. Esta incoerência deve-se à presença do gesso no interior das espumas de alumínio com parede ensaiadas experimentalmente.

Quanto aos resultados obtidos das espumas de alumínio sem parede verifica-se que a espuma *dual-size* absorve maior energia do que a de células uniformes o que demonstra coerência nos resultados. Quanto aos valores de energia das espumas de alumínio de células uniformes sem parede verifica-se que são relativamente próximos enquanto que os da *dual-size* verifica-se algumas diferenças entre as duas primeiras espumas testadas e as outras. A espuma *dual-size 3* foi testada até a um deslocamento de 17 mm o que obviamente traduz uma menor capacidade de absorção de energia. Quanto à *dual-size 4* verifica-se que o mecanismo de densificação é diferente das outras espumas testadas.

Verifica-se através dos valores do desvio padrão que existe maior discrepância nos valores de energia e energia específica da espuma *dual-size* do que da espuma de células uniformes.

### **3.8. Discussão de resultados**

Quanto aos ensaios de tração realizados, houve bastantes problemas nos resultados obtidos. Na primeira tentativa, não foi possível definir claramente o módulo de elasticidade. A explicação encontrada para o comportamento destes provetes foi a não linearidade da sua área útil e a solução encontrada para tentar resolver este problema foi maquinar os provetes para que a área útil seja linear. Foram, então, maquinados três provetes iguais aos ensaiados na primeira tentativa e, posteriormente foram ensaiados. Os resultados obtidos na segunda tentativa não são de confiança, uma vez que durante o processo de maquinagem dos provetes foram induzidas tensões residuais, que pode comprometer a integridade estrutural dos componentes. As tensões residuais são originadas por deformações plásticas distribuídas de forma irregular, que é o que acontece num processo de maquinagem. No entanto, o módulo de elasticidade obtido no único provete com um comportamento era muito baixo, cerca de 16 MPa, o que descredibilizava por completo os ensaios realizados. A explicação encontrada para a falha dos dois processos anteriores prende-se com a não colocação de extensómetros na área útil. Para o terceiro método foram, então, produzidos provetes normalizados segundo a norma portuguesa para ensaios de tração (*NP 10 002-1 de 1990*). O comprimento da área útil destes provetes normalizados, já permite a colocação de extensómetros, o que traduz numa maior confiança dos resultados obtidos. Os provetes foram produzidos através de fundição por cera perdida. Contudo, o método utilizado na fundição não estava preparado para amostras das dimensões pretendidas. Os provetes produzidos neste processo continham poros que são explicados pela existência de rechupes resultantes da má fundição dos provetes. Estes rechupes adulteram os resultados obtidos, mais concretamente, fazem com que a tensão de cedência e de rutura não correspondam à realidade. Após ensaiados os três provetes, comprovou-se que a fratura nos dois primeiros deu-se numa zona próxima do raio de concordância explicada pela menor espessura existente naquela parte do provete e pela concentração de tensões existentes. Apesar de os resultados obtidos no domínio elástico serem válidos, os extensómetros colocados nestes dois provetes não foram eficazes, uma vez que foram colocados numa zona onde não se deu a fratura, ou seja, a extensão dos provetes deve ser medida na zona onde vai haver a fratura visto que é o local onde vai haver maior extensão. Nestas duas situações, a extensão foi medida numa zona que não foi onde se deu a fratura já que o extensómetro estava colocado numa parte central do provete e a rutura deu-se numa das extremidades dos provetes. Qualquer das formas, através da colocação de extensómetros já foi possível obter resultados dos módulos de elasticidade mais próximos dos teóricos. A curva que será utilizada nos programas de elementos finitos será a do terceiro provete, visto que durante o ensaio de tração é a

que apresenta resultados mais confiáveis. Por outro lado, a colocação do extensómetro neste provete coincidiu com a zona da fratura do provete. A tensão de cedência e a tensão de rutura dos provetes não correspondem aos valores tabelados no Anexo II, para esta liga.

Quanto aos ensaios às espumas, não houve tantos problemas como nos ensaios de tração. No entanto, no interior das espumas ensaiadas existia gesso resultante do processo de fundição que não foi possível retirar, como é visível na figura 3.36.



Figura 3.36 – Gesso no interior da espuma *dual-size*

A presença do gesso nas espumas influencia os resultados obtidos uma vez que a carga de compressão aplicada aumenta. Por outro lado, o processo de fundição das espumas, tal como nos provetes tracionados, ainda não estava totalmente correto para o fabrico de espumas. Este processo ainda está em investigação no laboratório de materiais funcionais na Universidade do Minho e será, naturalmente, refinado permitindo a obter espumas de melhor qualidade do que as testadas.

Outra questão muito importante nos resultados obtidos é a escolha da liga para o fabrico das espumas. Como já foi referido, uma liga de Al-Si apresenta uma excelente resposta na fundição devido à excelente fluidez que o silício confere à liga de alumínio e, também, devido à menor contração do material durante o processo de fundição é outra excelente propriedade da liga de alumínio. Contudo, o silício diminui a ductilidade da liga e, conseqüentemente reduz a sua plasticidade. Através desta característica conclui-se que a liga escolhida tem excelentes propriedades para a fundição, mas não apresenta boas propriedades mecânicas. Logo, a melhor opção será mudar o tipo de liga de alumínio para o fabrico de espumas metálicas.

Quanto aos ensaios realizados às espumas sem a parede exterior verificou-se um melhor comportamento das espumas de células *dual-size* num carregamento à compressão visto que para a mesma deformação, este tipo de espuma suporta cargas mais elevadas do que a espuma de células uniformes. Por outro lado, os resultados obtidos com estas espumas são muito mais viáveis do que os resultados das espumas com parede uma vez que não existia gesso, resultante do processo de fundição, no interior destas.

Comprovou-se que as espumas *dual-size* têm uma maior rigidez específica do que as de células uniformes o que demonstra uma maior aptidão desta espuma para suportar esforços sem grandes deformações. Quanto à energia de deformação, comprova-se, também, uma maior capacidade de absorção de energia da espuma *dual-size* o que demonstra, também, uma maior aptidão deste tipo de espumas metálicas para solicitações de impacto.





## 4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Numa fase inicial e para compreender o método de cálculo do *software* Ansys é apresentada a formulação utilizada por este programa em análises não-lineares. Quanto ao processo de cálculo do *CosmosWorks* encontra-se no Anexo IV. Para validar o programa utilizado, será realizada uma validação do *software* através de um problema de *benchmark* disponibilizado pelo Ansys. Numa fase final, são demonstrados os passos realizados para a simulação numérica e são apresentados os resultados obtidos e realizada uma discussão dos mesmos.

Será estudada, apenas, a capacidade de deformação plástica das espumas, bem como a rigidez e a energia de deformação correspondente visto que não é possível entrar em rutura na opção “*Static Structural*” do Ansys. Para estudar modos de rutura e, conseqüentemente estudar o comportamento de deformação completo das espumas, o estudo deveria ser realizado através da opção “*Explicit Dynamics*”.

### 4.1. Formulação teórica apresentada no Ansys

Para materiais com relações lineares, a relação entre a tensão e a deformação é expressa através da equação 4.1.

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon^{el}\} \quad (4.1)$$

Em que  $\{\sigma\}$  é o vetor das tensões, D é a matriz de rigidez do sistema e  $\varepsilon^{el}$  é o vetor das deformações elásticas.

A não-linearidade pode ser devido ao material, devido à geometria e devido ao contacto. Os dois primeiros tipos de não-linearidade são os mais importantes e são os apresentados no manual de teoria do programa. É, também, apresentado o processo de cálculo iterativo utilizado (*Newton-Raphson*).

#### 4.1.1. ESTRUTURAS COM GEOMETRIA NÃO-LINEAR

As opções de cálculo para geometrias não-lineares disponíveis no *Ansys* são:

- “*Large Strain*”: assume que as deformações não são mais infinitesimais. É assumido que existe mudança de geometria (área, espessura, etc.). Tanto as deformações como as rotações podem ser arbitrariamente elevadas;

- “*Large Rotation*”: assumem que as rotações são largas, mas que as deformações mecânicas evoluem usando expressões lineares. Assume que a estrutura não muda de configuração, exceto se for um corpo rígido em movimento.
- “*Stress Stiffening*”: Assume que tanto as deformações como as rotações são pequenas. Numa primeira ordem de aproximação, assume que as rotações são usadas para captar alguns efeitos de rotações não-lineares.
- “*Spin Softening*”: também assume que tanto as deformações como as rotações são pequenas. No entanto, esta opção conta com a ligação entre o momento vibracional transversal e a força centrífuga existente numa velocidade angular.

Como é possível verificar, a opção “*Large Strain*” é a mais utilizada em problemas estáticos não-lineares, logo é a opção apresentada. Nesta opção, quando as deformações excedem uma determinada percentagem, a mudança de geometria existe e estas deformações não podem ser desprezadas.

A teoria da opção “*Large Strain*” pode ser definida por entidades físicas (deslocamentos e deformações) e a correspondente relação matemática. A carga aplicada no corpo faz com que este se desloque de uma posição para outra. Este deslocamento pode ser definido pelo estudo do vetor posição na configuração “deformada” e “indeformada”, em que os vetores são representados por  $\{x\}$  e  $\{X\}$ , respetivamente. O vetor deslocamento  $\{u\}$  é calculado como é visível na figura 4.1.

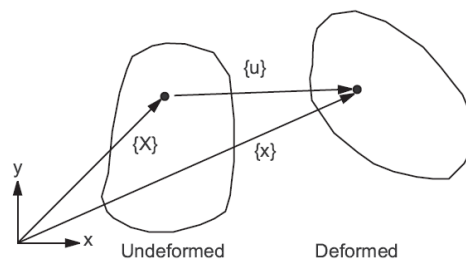


Figura 4.1 – Vetor posição e movimento de um corpo deformável [19]

O vetor deslocamento é calculado através da equação 4.2.

$$\{u\} = \{x\} - \{X\} \quad (4.2)$$

O gradiente da deformação é definido pela equação 4.3.

$$[F] = \frac{\partial \{x\}}{\partial \{X\}} \quad (4.3)$$

E pode ser escrito em termos do deslocamento do ponto pela equação 4.4.

$$[F] = [I] + \frac{\partial\{x\}}{\partial\{X\}} \quad (4.4)$$

Em que  $[I]$  é a matriz identidade. O gradiente da deformação pode ser separado numa rotação e a alteração do corpo é calculada usando o teorema da decomposição em coordenadas polares (equação 4.5).

$$[F] = [R] \cdot [U] \quad (4.5)$$

Em que  $[R]$  é a matriz rotação e  $[U]$  a matriz deformação. Quando a matriz deformação é conhecida, um logaritmo ou a medida de deformação de *Hencky* (figura 4.2) é definido pela equação 4.6.

$$[\varepsilon] = \ln[U] \quad (4.6)$$

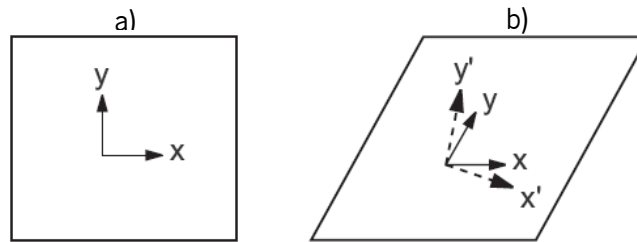


Figura 4.2 – Decomposição polar da deformação de Hencky [19]

Computacionalmente, a evolução da equação 4.6 é realizada por um de dois métodos de aproximação incremental (equação 4.7).

$$[\varepsilon] = \int d[e] \approx \sum [D_{\varepsilon_n}] \quad (4.7)$$

Com

$$[\Delta\varepsilon_n] = \ln[\Delta U_n] \quad (4.8)$$

Em que  $[\Delta U_n]$  é o incremento da matriz extensão computorizada pelo gradiente de deformação.

$$[\Delta F_n] = [F_n] \cdot [F_{n-1}]^{-1} \quad (4.9)$$

$[F_n]$  é o gradiente da deformação no incremento de tempo (“*time step*”) corrente.

$$[\Delta\varepsilon_n] = [R_{1/2}]^T \cdot [\Delta\varepsilon_n] \cdot [R_{1/2}] \quad (4.10)$$

Em que  $[R_{1/2}]$  é a matriz rotação resultante da decomposição polar da evolução do gradiente de deformação na configuração do ponto médio (equação 4.11).

$$[F_{1/2}] = [R_{1/2}] \cdot [U_{1/2}] \quad (4.11)$$

Em que

$$[F_{1/2}] = [I] + \frac{\partial \{u_{1/2}\}}{\partial \{X\}} \quad (4.12)$$

E o deslocamento é calculado através da equação 4.13.

$$\{u_{1/2}\} = \frac{1}{2} (\{u_n\} + \{u_{n-1}\}) \quad (4.13)$$

$\{u_n\}$  é o deslocamento corrente e  $\{u_{n-1}\}$  é o deslocamento no incremento de tempo imediatamente anterior.  $[\Delta\varepsilon_n]$  é a “rotação-neutralizada” do incremento da deformação no fim do passo de tempo. O incremento da deformação  $[\Delta\tilde{\varepsilon}_n]$  é também calculado pela configuração do ponto médio (equação 4.14).

$$\{\Delta\tilde{\varepsilon}_n\} = [B_{1/2}] \cdot \{\Delta u_n\} \quad (4.14)$$

$\{\Delta u_n\}$  é o incremento do deslocamento no fim do incremento de tempo e  $[B_{1/2}]$  é a evolução da relação carga-deslocamento da geometria do ponto médio.

$$\{X_{1/2}\} = \frac{1}{2} (\{X_n\} + \{X_{n-1}\}) \quad (4.15)$$

Este método é uma excelente aproximação do logaritmo da deformação, isto se as deformações forem inferiores a valores aproximadamente de 10%. O incremento da deformação  $[\Delta\varepsilon_n]$  (equivalente a  $\{\Delta\varepsilon_n\}$ ) pode ser calculado pela deformação anterior  $\{\Delta\varepsilon_{n-1}\}$ , obtendo-se a corrente deformação total de *Hencky*:

$$\{\varepsilon_n\} = \{\Delta\varepsilon_{n-1}\} + \{\Delta\varepsilon_n\} \quad (4.16)$$

A matriz de elementos e o vetor de cargas são derivados usando uma formulação de *Lagrange*.

$$[\bar{K}_i] \cdot \Delta u_i = \{F^{app}\} - \{F_i^{nr}\} \quad (4.17)$$

Em que  $[\bar{K}_i]$  é a matriz tangente, calculada através da equação 4.18.

$$[\bar{K}_i] = [K_i] + [S_i] \quad (4.18)$$

Em que  $[K_i]$  é a usual matriz de rigidez, obtida através da equação 4.19.

$$[K_i] = \int [B_i]^T \cdot [D_i] \cdot [B_i] \cdot d(vol) \quad (4.19)$$

$[B_i]$  é a matriz carga-deslocamento em termos da geometria corrente  $\{X_n\}$  e  $[D_i]$  é a matriz tensão-deformação corrente.

$[S_i]$  é a contribuição da tensão de rigidez (ou rigidez de geometria) e é obtida pela equação 4.20.

$$[S_i] = \int [G_i]^T \cdot [\tau_i] \cdot [G_i] \cdot d(vol) \quad (4.20)$$

Em que  $[G_i]$  é a matriz da função derivada de forma e  $[\tau_i]$  é a matriz corrente do tensor de *Cauchy*  $\{\sigma_i\}$  no sistema cartesiano global.

A restauração da força de Newton-Raphson é calculada pela equação 4.21.

$$[F_i^{nr}] = \int [B_i]^T \cdot \{\sigma_i\} \cdot d(vol) \quad (4.21)$$

#### 4.1.2. NÃO-LINEARIDADE DO MATERIAL

As não-linearidades do material ocorrem devido à relação entre a tensão e a deformação, que resulta de uma curva não-linear. A relação é, também, dependente da história da carga. No caso de deformações não-lineares, a definição da deformação elástica é da forma da equação 4.22.

$$\{\varepsilon^{el}\} = \{\varepsilon\} - \{\varepsilon^{th}\} - \{\varepsilon^{pl}\} - \{\varepsilon^{cr}\} - \{\varepsilon^{sw}\} \quad (4.22)$$

Em que  $\{\varepsilon^{el}\}$  é o vetor das deformações elásticas,  $\{\varepsilon\}$  é o vetor das deformações totais,  $\{\varepsilon^{th}\}$  é o vetor das deformações térmicas,  $\{\varepsilon^{pl}\}$  é o vetor das deformações plásticas,  $\{\varepsilon^{cr}\}$  é a fluência (“creep”) e  $\{\varepsilon^{sw}\}$  é o vetor da dilatação. Neste caso,  $\{\varepsilon\}$  é a deformação medida por uma deformação padronizada. A equação 4.22 é unicamente entendida para mostrar a relação entre os termos. De uma forma global, a componente da deformação total,  $\{\varepsilon^{tot}\}$ , pode ser expressa pela equação 4.23.

$$\{\varepsilon^{tot}\} = \{\varepsilon^{el}\} + \{\varepsilon^{pl}\} + \{\varepsilon^{cr}\} \quad (4.23)$$

A diferença entre estas duas “deformações totais” é que  $\{\varepsilon\}$  é usada para comparar resultados de deformações padronizadas e  $\{\varepsilon^{tot}\}$  pode ser usada como um gráfico de uma curva não-linear tensão-deformação.

A plasticidade é uma das definições mais importantes da não-linearidade do material e é caracterizada pela deformação irreversível que ocorre no material quando um determinado nível de tensão é atingido. Existem várias opções disponibilizadas pelo *Ansys* para caracterizar diferentes tipos de comportamento de materiais como é possível verificar na figura 4.3.

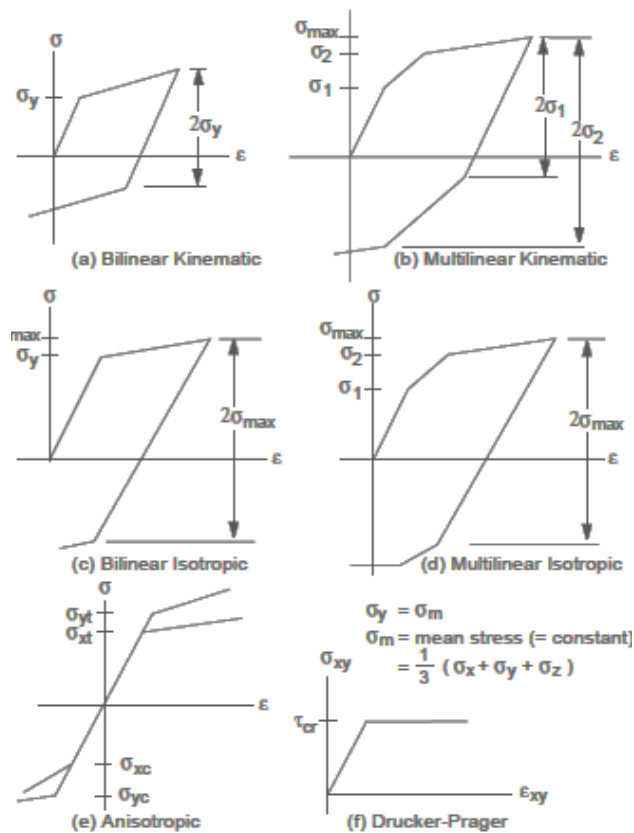


Figura 4.3 – Comportamento tensão-deformação para cada uma das opções de plasticidade [19]

A plasticidade é caracterizada pelo critério de cedência, regra do escoamento e regra do encruamento. O critério de cedência determina o nível de tensão quando a cedência é iniciada. Para componentes de tensão múltiplos, a tensão é representada por uma função de componentes individuais,  $f(\{\sigma\})$ , que pode ser interpretada como tensão equivalente através da equação 4.23.

$$\sigma_e = f(\{\sigma\}) \quad (4.23)$$

Quando a tensão equivalente é igual ao parâmetro de cedência do material (equação 4.24), o material vai desenvolver deformações plásticas.

$$f(\{\sigma\}) = \sigma_y \quad (4.24)$$

A equação anterior pode ser decomposta num espaço de tensões, como é visível na figura 4.4. As superfícies desta figura são conhecidas como superfícies de cedência e qualquer estado de tensão no interior da superfície elástica não pode causar deformações plásticas. [19]

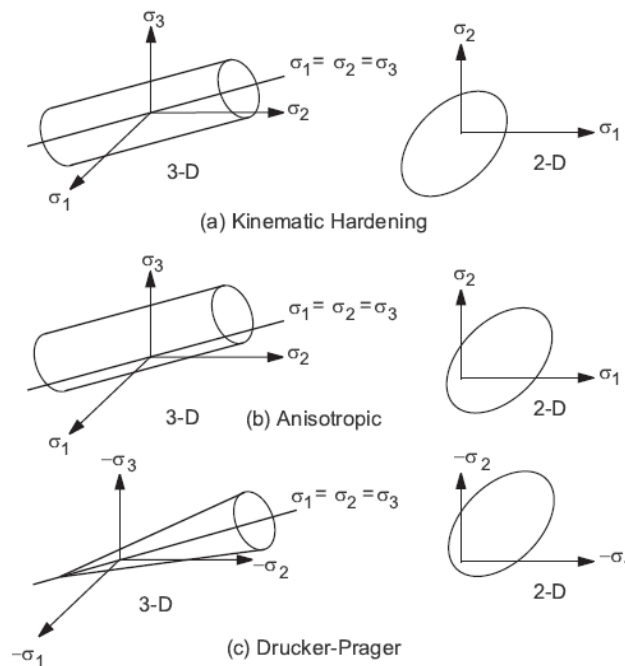


Figura 4.4 – Várias Superfícies de cedência [19]

A regra do escoamento determina a direção da deformação plástica e é expressa através da equação 4.25.

$$\{d\varepsilon^{pl}\} = \lambda \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \quad (4.25)$$

Em que  $\lambda$  é o multiplicador plástico e  $Q$  é uma função de tensão denominada por potencial plástico. O programa assume que a regra do escoamento é um termo associativo e a deformação plástica ocorre numa direção normal à superfície de cedência. [19]

A regra do encruamento (figura 4.5) descreve a mudança da superfície de cedência através da cedência progressiva, estabelecendo as condições para a cedência até estabilizar. Existem duas regras disponíveis no *Ansys* para descrever o encruamento, “*Isotropic Hardening*” e a “*Kinematic Hardening*”, ou seja, encruamento isotrópico e cinemático, respetivamente. Na primeira, a superfície de cedência permanece centrada sobre a linha de centro inicial e expande à medida que as deformações plásticas são desenvolvidas. Na segunda, a superfície sofre uma translação no espaço de tensões principais com o progresso da cedência. [19]

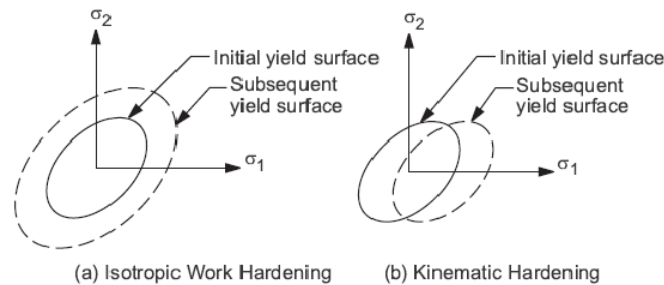


Figura 4.5 – Tipos de regras de encruamento [19]

As opções de plasticidade estão sumarizadas na tabela 10.

Tabela 10 – Sumário das opções plásticas [19]

Nome	Critério de cedência	Regra de escoamento	Regra de encruamento	Resposta do material
Bilinear Isotropic Hardening	Von Mises / Hill	Associativa	Isotrópico	Bilinear
Multilinear Isotropic Hardening	Von Mises / Hill	Associativa	Isotrópico	Multilinear
Nonlinear Isotropic Hardening	Von Mises / Hill	Associativa	Isotrópico	Não-linear
Classical Bilinear Kinematic Hardening	Von Mises / Hill	Associativa	Cinemático	Bilinear
Multilinear Kinematic Hardening	Von Mises / Hill	Associativa	Cinemático	Multilinear
Nonlinear Kinematic Hardening	Von Mises / Hill	Associativa	Cinemático	Não-linear
Anisotropic	Von Mises modificado	Associativa ou não-associativa	Isotrópico	Bilinear, mas direção, tensão e compressão diferentes
Drucker-Prager	Von Mises com dependência da tensão hidrostática	Associativa ou não-associativa	Não	Elástico – perfeitamente plástico
Extended Druck-Prager	Von Mises com dependência da tensão hidrostática	Associativa	Isotrópico	Multilinear



Cast Iron	Von Mises com dependência da tensão hidrostática		Isotrópico	Multilinear
Gurson	Von Mises com dependência da pressão e porosidade	Associativa	Isotrópico	Multilinear

#### 4.1.3. CRITÉRIOS DE CONVERGÊNCIA

A discretização do processo de cedência em elementos finitos é obtida através da equação 4.26.

$$[K]\{u\} = \{F^a\} \quad (4.26)$$

Em que  $[K]$  é a matriz rigidez,  $\{u\}$  é a matriz dos graus de liberdade desconhecidos e  $\{F^a\}$  é o vetor das cargas aplicadas. A matriz de coeficientes é uma função não-linear dos graus de liberdade desconhecidos. O método de Newton-Raphson é um processo iterativo de resolução de equações não-lineares e pode ser escrito pelas equações 4.27 e 4.28.

$$[K_i^T]\{\Delta u_i\} = \{F^a\} - \{F_i^{nr}\} \quad (4.27)$$

$$\{u_{i+1}\} = \{u_i\} + \{\Delta u_i\} \quad (4.28)$$

Em que  $[K_i^T]$  é a matriz tangente ou Jacobiana,  $i$  representa a iteração de equilíbrio corrente e  $\{F_i^{nr}\}$  é o vetor das cargas de restauração que correspondem ao elemento interno das forças.

O algoritmo de procedimento é:

1. Assume-se que  $\{u_0\} \cdot \{u_0\}$  é usualmente a solução de convergência do incremento de tempo anterior. No primeiro incremento,  $\{u_0\} = \{0\}$ ;
2. Cálculo da atualização da matriz tangente  $[K_i^T]$  e restauro das forças  $\{F_i^{nr}\}$  através da configuração  $\{u_i\}$ ;
3. Cálculo de  $\{\Delta u_i\}$  através da equação 4.27;
4. Soma de  $\{\Delta u_i\}$  com  $\{u_i\}$  para obter a próxima iteração  $\{u_{i+1}\}$ ;
5. Repetir os passos de 2 a 4 até convergir.

Graficamente, o critério está representado na figura 4.6.

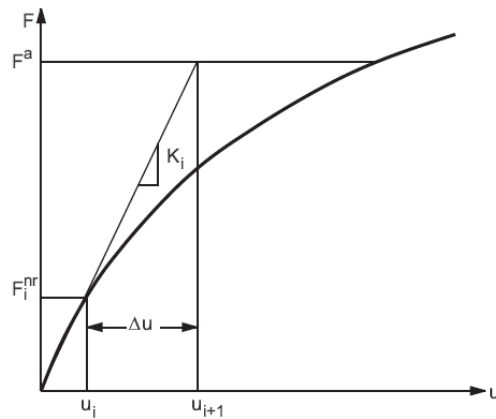


Figura 4.6 – Solução Newton-Raphson para uma iteração [19]

A solução é obtida até que  $\{F_i^{nr}\}$  atinja o nível da força  $\{F^a\}$ , como se verifica na figura 4.6. Se a análise incluir a história da carga (plasticidade), então a solução requer que alguns passos intermédios estejam em equilíbrio, de forma a seguir corretamente o caminho da carga. Isto só é possível especificando uma análise incremental passo a passo, ou seja, o vetor de cargas final é alcançado através da implementação de incrementos de força e da realização de iterações *Newton-Raphson* em cada passo. Desta forma, o método é alterado e a equação 4.29 rege o processo iterativo.

$$[K_{n,i}^T]\{\Delta u_i\} = \{F_n^a\} - \{F_{n,i}^{nr}\} \quad (4.29)$$

Em que  $[K_{n,i}^T]$  é a matriz tangente para o passo de tempo  $n$  na iteração  $i$ ,  $\{F_n^a\}$  é o vetor das forças totais aplicadas no passo de tempo  $n$  e  $\{F_{n,i}^{nr}\}$  é o vetor das cargas de restauração para o incremento de tempo  $n$  na iteração  $i$ . Este processo é denominado por *Método Incremental Newton-Raphson* (figura 4.7).

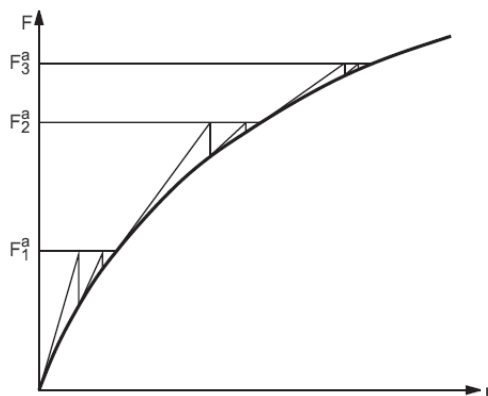


Figura 4.7 – Procedimento do *Método Incremental Newton-Raphson* [19]

A convergência é assumida quando se verifica a equação 4.30 e/ou a equação 4.31.

$$\|\{R\}\| < \varepsilon_R \cdot R_{ref} \quad (4.30)$$

$$\|\{\Delta u_i\}\| < \varepsilon_u \cdot u_{ref} \quad (4.31)$$

Em que  $\{R\}$  é o vetor residual obtido através da equação 4.32.

$$\{R\} = \{F^a\} - \{F^{nr}\} \quad (4.32)$$

#### 4.1.4. DISCRETIZAÇÃO DE ELEMENTOS DE MALHA

A formação da malha num componente ou num conjunto de componentes no *Ansys Workbench* é realizada de forma automática, ou seja, os tipos de elementos são selecionados automaticamente consoante a geometria das peças em análise, enquanto que no *Ansys APDL* é necessário escolher o tipo de elemento e o tipo de nó para gerar uma malha. No entanto, o *Workbench* permite alterar as definições da malha automaticamente, apesar de haver limitações nas definições.

Os dois tipos de elementos mais comuns numa malha do *Ansys Workbench* são o SOLID186, SOLID187.

##### 4.1.4.1. SOLID186

A geometria e o sistema de coordenadas do elemento SOLID186 é mostrado na figura 4.8.

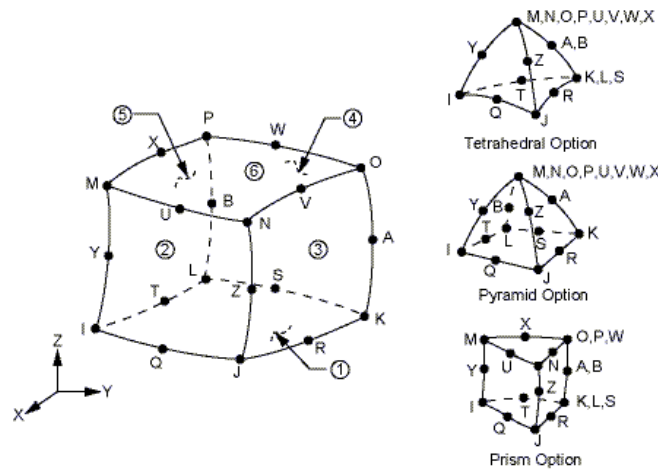


Figura 4.8 – Elemento SOLID186 [28]

Um elemento em forma de prisma pode ser formado definindo o mesmo número de nós para os nós K, L e S; nós A e B; e nós O, P e W. Um elemento em forma tetraédrica também pode ser formado como é representado na figura 4.8. Além dos nós, os dados de entrada do elemento incluem as propriedades de um material anisotrópico, em que a direção da anisotropia corresponde à direção de coordenadas do elemento. Este elemento é indicado para análises de plasticidade e hiperelasticidade. [28]

Na discretização de elementos numa análise em espumas metálicas, a maioria dos investigadores utiliza um elemento SOLID186 tetraédrico. Este elemento é utilizado na malha da espuma bem como na malha da coluna. [28]

#### 4.1.4.2. SOLID187

O SOLID187 (figura 4.9) é um elemento tridimensional composto por dez nós, com três graus de liberdade em cada nó. Idealmente é utilizada em situações onde a malha é irregular devido à geometria dos componentes. É um elemento que possibilita estudos plásticos e hiperelásticos e permite análises com grandes deflexões e extensões. [28]

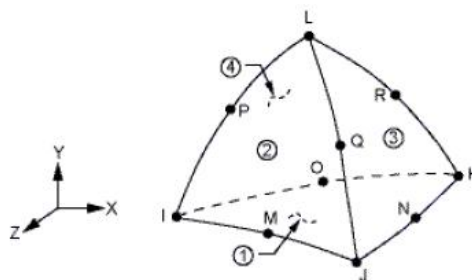


Figura 4.9 – Elemento SOLID187 [28]

## 4.2. Validação do Ansys

Uma das soluções para validar um programa de elementos finitos consistem em resolver um problema de análise estrutural estático no domínio não-linear que se adeque aos problemas existentes neste projeto. O Ansys possui um manual de verificação próprio que permite consultar e resolver diferentes tipos de exercícios capazes de testar os diferentes tipos de análises existentes neste *software* de simulação numérica. [29] Através de uma consulta aos problemas existentes, verificou-se que não existe nenhum problema que resolva problemas estáticos não-lineares de espumas metálicas e que o único que simula um componente através de uma análise não-linear é o problema “*WBVMMECH029*”. Neste caso concreto, existe uma viga retangular encastrada numa extremidade e é aplicado um momento de flexão, num eixo, na outra extremidade oposta ao encastramento.

### 4.2.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O exercício proposto, como já foi referido, é uma viga retangular carregada em flexão pura, como ilustrado na figura 4.10.

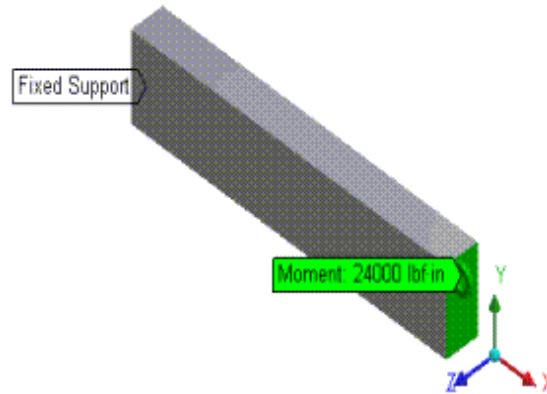


Figura 4.10 – Viga utilizada para validação do *software* [29]

Este exercício tem como referência o livro de Timoshenko [30] sobre resistência de materiais que estuda as linhas longitudinais da secção transversal da viga com um comportamento elásto-plástico. Através deste artigo, o autor demonstra que quando as linhas superiores e inferiores da barra atingirem a tensão de cedência do material, a viga começa a deformar plasticamente. Este caso trata-se de um clássico problema de flexão pura em que existe uma superfície neutra definida pela equidistância entre esta superfície e as superfícies superiores e inferiores da viga. As tensões que existem acima da superfície neutra são negativas (compressão) enquanto que as tensões que estão abaixo da superfície neutra são positivas (tração). A figura 4.11 mostra o diferente comportamento de uma viga retangular para um carregamento elástico, elásto-plástico e perfeitamente plástico.

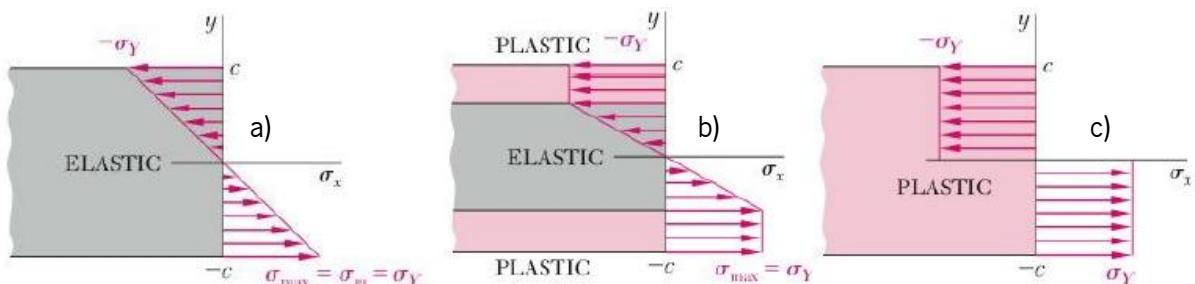


Figura 4.11 – Distribuição de tensões na zona: a) Elástica, b) Elásto-Plástica e c) Plástica [30]

O plano  $\sigma_x$  representa a superfície neutra da viga em que as tensões nesta superfície são nulas. Como é visível, quando a viga está no domínio elástico, as tensões aumentam linearmente tendendo a obter um valor máximo nas superfícies superiores e inferiores da viga, enquanto que no domínio plástico, existe uma distribuição uniforme das tensões na zona deformada plasticamente.

Como é visível através da figura 4.11 as tensões mais elevadas verificam-se nas superfícies superior e inferior da viga. Quando a viga está sujeita a solicitações elásticas, as tensões aumentam linearmente desde a superfície neutra até às superfícies superiores e inferiores das vigas enquanto que na plasticidade total as tensões são uniformes ao longo da viga.

Para a resolução do problema, é proposta a construção de uma viga com um comprimento  $L = 10 \text{ in}$ , uma largura  $b = 1 \text{ in}$  e uma altura  $h = 2 \text{ in}$ . É de realçar que o sistema métrico utilizado para a resolução deste problema é o americano e todas as unidades utilizadas no *software* devem estar no sistema “*U.S. Customary*”. A viga encontra-se encastrada numa das suas extremidades, enquanto é carregada na extremidade oposta ao encastramento por um momento fletor que varia de ensaio para ensaio entre 24 000 lbf.in e 36 000 lbf.in. As propriedades do material da viga são apresentadas na tabela 11.

Tabela 11 – Propriedades do material utilizado na viga [28]

Módulo de Elasticidade, $E$	$3e^7 \text{ psi}$
Coefficiente de Poisson, $\nu$	0.0
Tensão de Cedência no eixo dos $yy$ , $\sigma_{yp}$	36000 $\text{psi}$

A curva tensão-extensão do material proposta para resolver este exercício é a da figura 4.12.

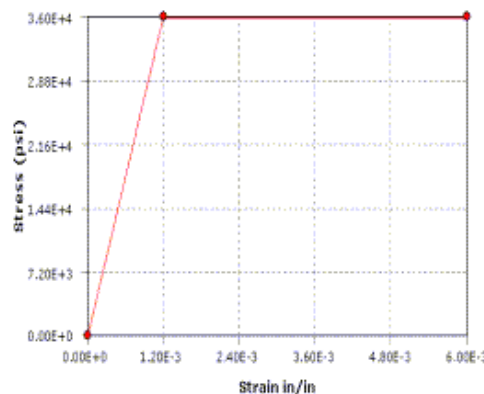


Figura 4.12 – Curva tensão-extensão do material da viga [29]

É visível através da curva demonstrada na figura 4.12 que o material encontra-se no domínio elástico até à tensão de cedência que tem um valor de 36 000 psi, a partir da qual entra no domínio perfeitamente plástico com tensões constantes.

É aconselhado, para obter resultados mais precisos, a utilização da opção de controlo do tamanho do elemento da malha, em que o valor do tamanho recomendado no exercício é de 0.5 in.

Para a análise, é pedido que seja efetuado o carregamento em três incrementos. Numa fase inicial, o momento aplicado deve ser de 24 000 lbf.in, numa fase intermédia, deve ser aplicado um momento de 30 000 lbf.in e numa fase final, um momento de 36 000 lbf.in.

#### 4.2.2. CÁLCULO ANALÍTICO

Para comprovar a veracidade dos resultados numéricos, o problema foi resolvido de forma analítica. Para o cálculo, é necessário considerar a secção transversal retangular da figura 4.3. [27]

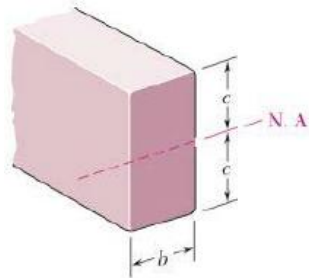


Figura 4.13 – Área de secção transversal de uma viga retangular [27]

Como é visível na figura 4.13, o  $b$  representa a largura da viga que é de 1 in e o  $c$  corresponde à metade da altura da viga. Como a altura da viga é de 2 in, então o  $c$  é 1 in.

Para o cálculo do momento de cedência é utilizada a equação 4.33.

$$M_y = \frac{2}{3}bc^2\sigma_y \quad (4.33)$$

Através desta equação, é possível calcular o momento que, caso seja aplicado na viga, provocará o início da plasticidade da mesma. O momento de cedência é então

$$M_y = \frac{2}{3} \times 1 \times 1^2 \times 36000 = 24\,000 \text{ lbf.in}$$

Este valor demonstra que, para um momento de 24 000 lbf.in, que é o primeiro valor fornecido pelo exercício, a tensão que a viga vai atingir é a de cedência, o que significa que no primeiro ensaio da barra a tensão máxima esperada é de 36 000 psi.

A partir do instante em que a viga atinge a tensão de cedência inicia-se a plasticidade. O momento limite que representa um estado totalmente plástico da viga é calculado através da equação 4.34.

$$M_p = \frac{3}{2}M_y \quad (4.34)$$

Desta forma, o momento plástico é

$$M_p = \frac{3}{2} \times 24000 = 36\,000 \text{ lbf.in}$$

O momento 36 000 lbf.in significa que a partir deste valor, o critério de convergência do Ansys não deve convergir visto que não é possível deformar mais a viga plasticamente.

Como é natural, os momentos 24 000 e 36 000 lbf.in definem o limite dos momentos plásticos. Para analisar o comportamento elásto-plástico do material foi sugerido no exercício a aplicação do momento de 30 000 lbf.in. É notório que para os três momentos aplicados a tensão obtida deva ser 36 000 psi, uma vez que corresponde ao valor constante da tensão ao longo do domínio plástico.

Numa deformação elásto-plástica, a altura da zona elástica é medida através de um parâmetro  $y_y$ , denominado por “metade da espessura do núcleo elástico”, como é visível na figura 4.14.

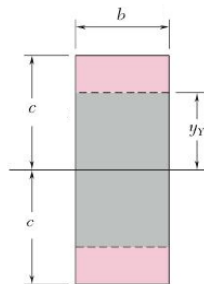


Figura 4.14 – Representação da espessura do núcleo elástico [30]

O cálculo de  $y_y$  é realizado através da equação 4.35.

$$M = M_p \cdot \left(1 - \frac{1}{3} \left(\frac{y_y}{c}\right)^2\right) \quad (4.35)$$

Aplicando a equação 3.5 resulta:

$$30000 = 36000 \times \left(1 - \frac{1}{3} \left(\frac{y_y}{1}\right)^2\right) \leftrightarrow y_y \approx 0,70711 \text{ in}$$

A espessura total do núcleo elástico é o dobro de  $y_y$  que é 1,4142 in. Isto significa que quando aplicado um momento de 30 000 lbf.in, a zona elástica total será 1,4142 in e como a altura da viga é 2 in, a zona deformada plasticamente será de 0,5879 in, aproximadamente.

#### 4.2.3. CÁLCULO NUMÉRICO

Numa fase inicial numa análise estática não-linear no Ansys *Workbench* é necessário definir o material ou materiais a utilizar nos estudos. Neste exercício, para inserir o material é necessário selecionar a opção “*Isotropic Elasticity*”, onde são indicados os valores do módulo de elasticidade e do coeficiente



de *Poisson* que definem o comportamento elástico do material. Numa fase seguinte, para definir o comportamento plástico é selecionada a opção “*Bilinear Isotropic Hardening*” em que é inserido apenas o valor da tensão de cedência, enquanto que o valor do módulo tangente é considerado nulo. Numa parte final na introdução deste material, é necessário definir o valor da tensão de cedência em que para tal é escolhida a opção “*Tensile Yield Strength*”. Os passos adotados para definir o material estão representados na figura 4.15.

Properties of Outline Row 3: Material				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
2	<input type="checkbox"/> Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>
3	Derive from	Young's M...		
4	Young's Modulus	3E+07	psi	<input type="checkbox"/>
5	Poisson's Ratio	0		<input type="checkbox"/>
6	Bulk Modulus	1E+07	psi	<input type="checkbox"/>
7	Shear Modulus	1,5E+07	psi	<input type="checkbox"/>
8	<input type="checkbox"/> Bilinear Isotropic Hardening			<input type="checkbox"/>
9	Yield Strength	36000	psi	<input type="checkbox"/>
10	Tangent Modulus	0	psi	<input type="checkbox"/>
11	<input type="checkbox"/> Tensile Yield Strength	36000	psi	<input type="checkbox"/>

Figura 4.15 – Propriedades do material utilizado no exercício inseridas na base de dados do Ansys *Workbench*

A curva tensão-extensão do material pode ser visualizada através da figura 4.16.

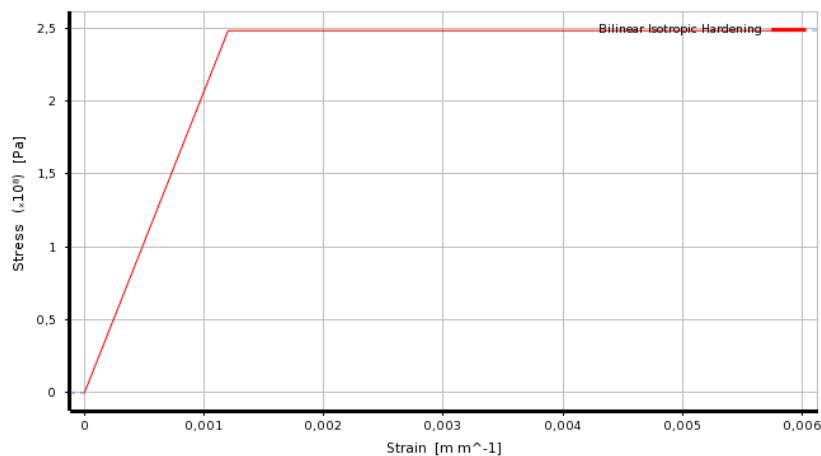


Figura 4.16 – Curva tensão-extensão do material inserido no Ansys

Como já foi referido, o componente em estudo é uma viga com 1 in de largura, 2 in de altura e 10 in de comprimento. Para desenhar o componente, devido à sua geometria simples, foi utilizada a plataforma de desenho do *Ansys Workbench*. A viga desenhada está representada, em vista isométrica, na figura 4.17.

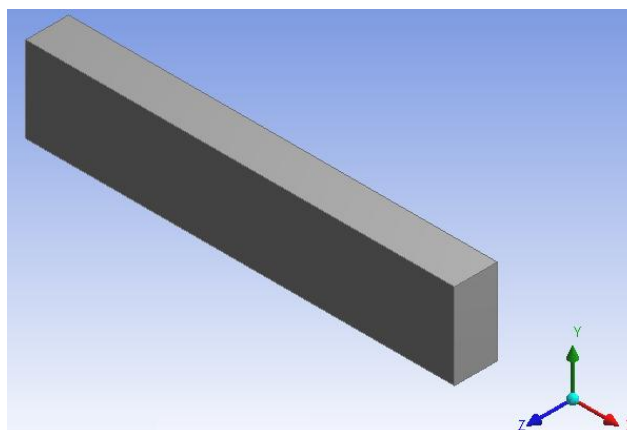


Figura 4.17 – Viga desenhada no Ansys *Workbench*

Após desenhada a estrutura a analisar, são inseridos os parâmetros da malha. Para a obter resultados credíveis, foi introduzido um tamanho dos elementos de malha de 0,5 in, como recomendado no enunciado do problema. A figura 4.18 mostra a distribuição da malha ao longo da viga.

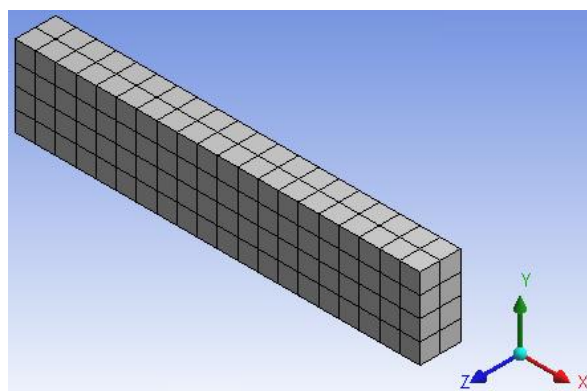


Figura 4.18 – Distribuição da malha ao longo da viga

A malha obtida é utilizada para os três ensaios realizados, o que permite uma comparação qualitativa dos resultados.

Quanto ao suporte, esta é aplicado numa das extremidades da viga. Foi escolhida uma extremidade e foi fixada da mesma forma para os três momentos aplicados, através de um encastramento. A opção escolhida no Ansys para fixação é a “*Fixed Support*”, como é demonstrado na figura 4.19.

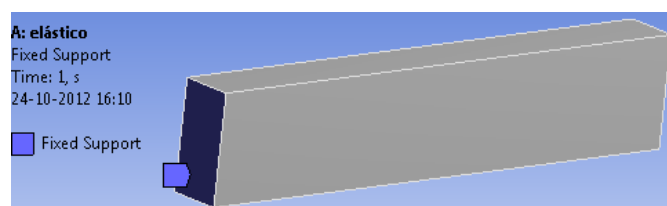


Figura 4.19 – Aplicação das condições de fronteira na viga

Como pedido no enunciado, foi aplicado um momento fletor de 24 000 lbf.in numa das extremidades da viga, como é visível na figura 4.20.



Figura 4.20 – Aplicação do momento fletor de 24 000 lbf.in na viga

O momento fletor foi aplicado segundo o eixo dos *zz*, enquanto que nos restantes eixos, o valor do momento deve ser nulo. A figura 4.21 demonstra a aplicação do valor do momento fletor no eixo dos *zz*. A forma de como o valor do momento fletor é introduzido é igual para os restantes momentos aplicados na viga.

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
Type	Moment
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	0, N-mm (ramped)
<input type="checkbox"/> Y Component	0, N-mm (ramped)
<input checked="" type="checkbox"/> Z Component	2,7116e+006 N-mm (ramped)
Suppressed	No
Behavior	Deformable
Advanced	

Figura 4.21 – Aplicação de um momento fletor no eixo dos *zz*

Após colocadas as condições de fronteira e as cargas na viga, iniciou-se a simulação numérica.

Para o momento fletor de 24 000 lbf.in, a distribuição de tensões obtida está representada na figura 4.22.

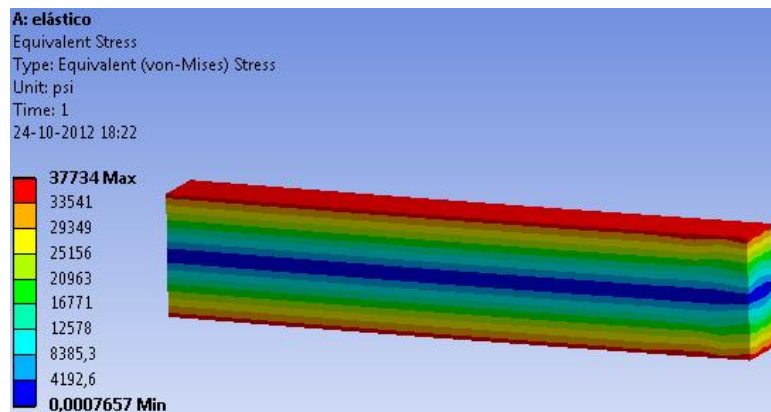


Figura 4.22 – Distribuição de tensões ao longo da viga para um momento fletor de 24 000 lbf.in

Como é possível verificar, a tensão máxima obtida foi de 37 734 psi em vez dos 36 000 psi expectáveis, o que demonstra um erro associado aproximado de 4%. Este erro pode ser explicado pelo tipo de malha escolhido para esta análise. Contudo, a distribuição demonstra que na zona central da viga as tensões são bastante baixas enquanto que as tensões máximas existentes encontram-se nas extremidades da viga, o que corresponde à realidade, como demonstrado anteriormente. O gráfico que demonstra a elasticidade do ensaio numérico, para este caso concreto, é demonstrado na figura 4.23, que é um gráfico tensão-tempo, em que a tensão é expressa em psi.

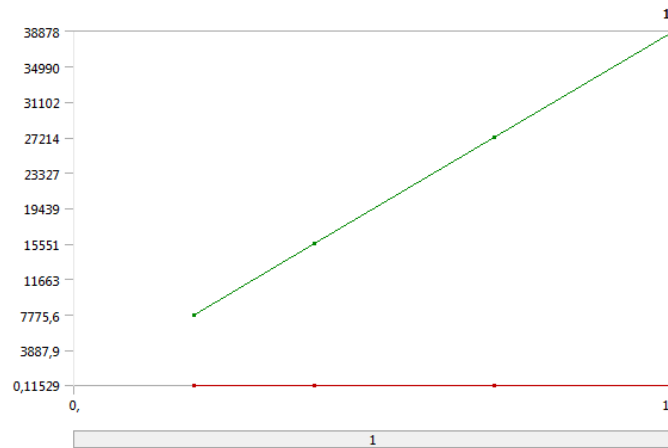


Figura 4.23 – Gráfico tensão-tempo para o momento fletor de 24 000 lbf.in

Como é visível, a relação entre a tensão e o tempo é linear, o que demonstra que a análise decorreu apenas no domínio elástico.

No caso em que o momento fletor aplicado é 30 000 lbf.in, a malha utilizada é igual ao caso anterior. Nesta situação, a opção “*Large Displacement*” é ativada possibilitando o estudo da plasticidade. A distribuição das tensões ao longo da viga para um carregamento de flexão de 30 000 lbf.in é demonstrada na figura 4.24.

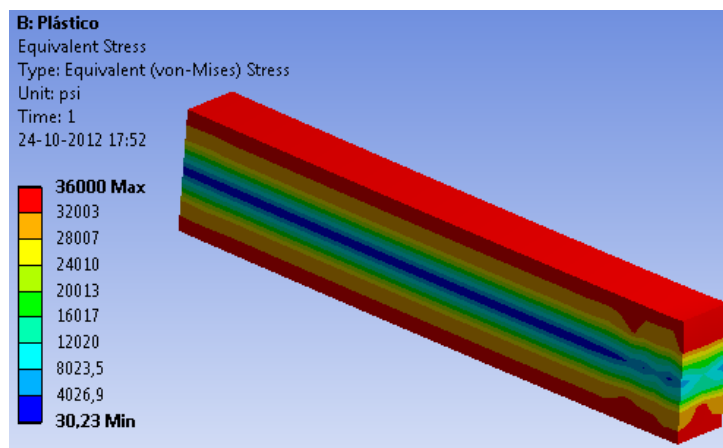


Figura 4.24 – Distribuição de tensões ao longo da viga para um momento fletor de 30 000 lbf.in

É possível verificar que a cor vermelha corresponde às tensões com um valor de 36 000 psi que corresponde às zonas afetadas plasticamente. As restantes cores variam de acordo com a intensidade da tensão e representam as zonas afetadas elasticamente ao longo da viga. Verifica-se, neste caso, que a tensão máxima obtida coincide com a calculada no cálculo analítico o que demonstra a precisão do programa.

O gráfico tensão-tempo da figura 4.25 demonstra o comportamento da viga ao longo da análise.

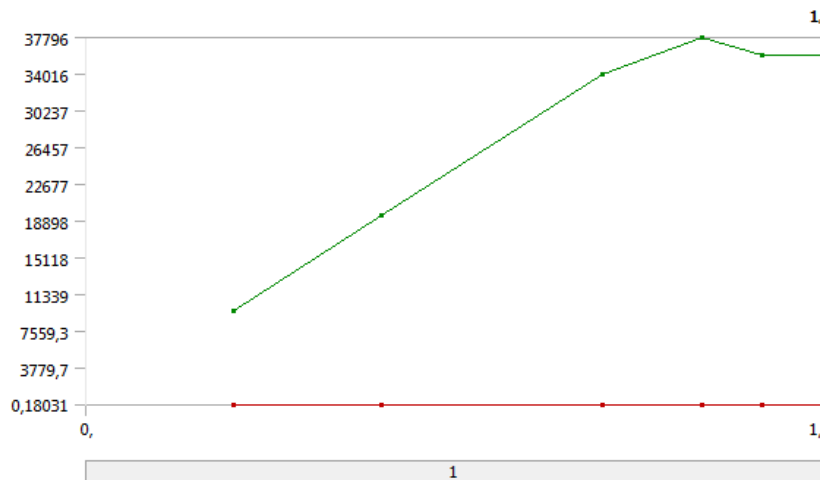


Figura 4.25 – Gráfico tensão-tempo para o momento fletor de 30 000 lbf.in

Como é possível verificar, existe uma zona linear e outra zona plástica claramente identificadas nesta análise, o que demonstra que o domínio plástico foi atingido.

Um outro objetivo do exercício era aplicar um momento de 36 000 lbf.in na viga. Os parâmetros da malha, as condições de fronteira e a aplicação do momento fletor foram feitos da mesma maneira que nos outros casos.

Como foi referido, o limite da plasticidade da viga em estudo é quando um momento fletor com a intensidade de 36 000 lbf.in. Logo, como era expectável, a solução não convergiu.

A figura 4.26 mostra os resultados obtidos na análise para este momento fletor.



Figura 4.26 – Resultados obtidos para um momento fletor de 36 000 lbf.in

Como é possível verificar através da figura 4.27, não houve convergência dos passos na curva tensão-tempo.

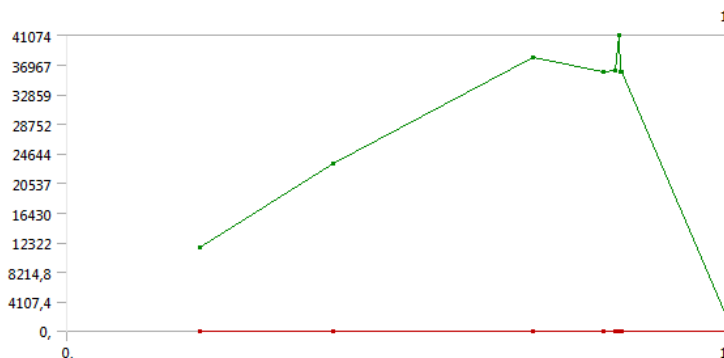


Figura 4.27 – Gráfico tensão-tempo para o momento fletor de 36 000 lbf.in

#### 4.2.4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A simulação do domínio elástico no Ansys não coincidiu com os valores esperados. Um dos motivos para a não convergência dos valores é a sensibilidade que uma malha neste *software* produz nos valores calculados. Quanto às restantes simulações, estas convergiram com a teoria subjacente a esta validação. Quanto ao comportamento do material, comprovou-se que a distribuição das tensões obtidas numericamente corresponde à teoria. A tabela 12 apresenta uma comparação entre os valores obtidos analiticamente e os obtidos numericamente.

Tabela 12 – Comparação dos resultados do cálculo analítico e do cálculo numérico

Momentos [lbf.in]	Analítico		Numérico		Erro (%)
	Estado	Tensão Equivalente (psi)	Estado	Tensão Equivalente (psi)	
24 000	Completamente elástico	36 000	Completamente elástico	37 734	4.82
30 000	Elásto-plástico	36 000	Elásto-plástico	36 000	0.0
36 000	Plástico	Solução não converge	Plástico	Solução não converge	

Para os casos estudados, foram introduzidos vários tamanhos de malha e os resultados obtidos são completamente diferentes consoante o tamanho introduzido. Este parâmetro poderá ser o principal motivo do erro existente na análise elástica (primeiro caso). Conclui-se que o Ansys é um *software* sensível aos parâmetros de malha introduzidos nas análises. Em análises elástico-plásticas o comportamento mecânico simulado pelo *software* corresponde ao esperado. A análise deste exercício permitiu descobrir diferentes opções existentes no Ansys, bem como interpretar de forma qualitativa os resultados obtidos nas análises.

### 4.3. Implementação

Durante o cálculo numérico serão testadas as espumas de células uniformes e as espumas de células *dual-size*. Nos programas de elementos finitos Ansys e no *CosmosWorks* será testada a espuma de alumínio de células uniforme. Após o cálculo numérico, serão determinadas as curvas carga-deslocamento resultantes das simulações e será realizada uma análise comparativa aos resultados. Através da curva carga-deslocamento serão calculados parâmetros como a rigidez e a energia elástica de deformação que são parâmetros que caracterizam as espumas. Só será realizado o estudo elásto-

plástico das espumas, uma vez que a opção “*Static Structural*” do Ansys não contempla modos de rutura, o que não permite analisar a densificação das células das espumas.

#### 4.3.1. CURVA DO MATERIAL

Foi criado um material na biblioteca do Ansys *Workbench* igual ao das espumas em estudo que permita simular corretamente o comportamento destas. Existem várias opções para criar materiais na biblioteca do Ansys para diferentes tipos de ensaios de tração realizados aos provetes. No caso em estudo, para definir o comportamento elástico do material foi utilizada a opção “*Isotropic Elasticity*” em que os valores inseridos foram o módulo de elasticidade e o coeficiente de *Poisson* (figura 4.28).

Properties of Outline Row 3: Alumínio			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	2700	kg m <sup>-3</sup>
3	Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's Mo...	
5	Young's Modulus	5,6659E+10	Pa
6	Poisson's Ratio	0,33	
7	Bulk Modulus	5,5548E+10	Pa
8	Shear Modulus	2,13E+10	Pa
9	Multilinear Isotropic Hardening	Tabular	
10	Scale	1	
11	Offset	0	Pa
12	Tensile Yield Strength	9E+07	Pa

Figura 4.28 – Propriedades do alumínio utilizado nas espumas inseridas no Ansys

Como já foi referido, os valores de tensão posteriores à tensão de cedência definem a zona plástica do material. Neste caso, os valores de tensão superiores a 90 MPa, definem a plasticidade do material. No Ansys, a curva de plasticidade é definida pela opção “*Multilinear Isotropic Hardening*” em que os valores inseridos são a tensão real e a extensão real, recolhidos pelo terceiro provete da terceira tentativa ensaiado à tração, como é visível na figura 4.29.

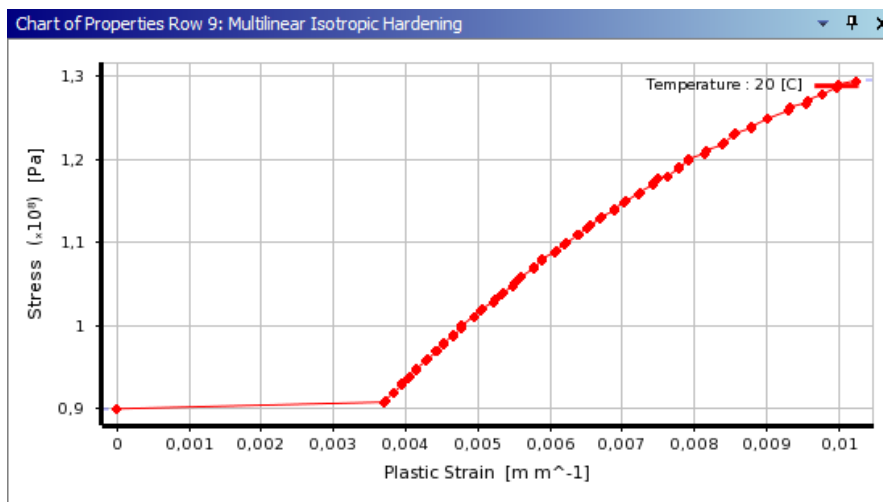


Figura 4.29 – Curva real que define o domínio plástico do alumínio das espumas

A temperatura da realização do ensaio admitida foi a temperatura ambiente, cerca de 20°C. Na figura 4.29 é visível que ao primeiro valor de tensão corresponde uma extensão plástica nula. Esta é uma das limitações do *Ansys Workbench* que obriga a que ao primeiro ponto da tensão na zona plástica corresponda uma extensão nula.

#### 4.3.2. GEOMETRIA

As espumas estudadas foram desenhadas no programa *SolidWorks* uma vez que é um programa muito mais interativo que a plataforma do Ansys. No *Ansys Workbench* 13, que foi o utilizado no estudo, é possível exportar diretamente a geometria dos programas CAD, como por exemplo, o *SolidWorks* ou o *Inventor*, sem que os resultados sejam influenciados pela exportação da geometria.

Para possibilitar uma correta distribuição da carga e fixação da espuma, foram colocadas duas peças de aço nas extremidades da espuma com um diâmetro de 50 mm e uma altura de 20 mm, assegurando que apenas as espumas sofriam efeitos não-lineares. A figura 4.30 mostra a geometria importada diretamente do *SolidWorks*.

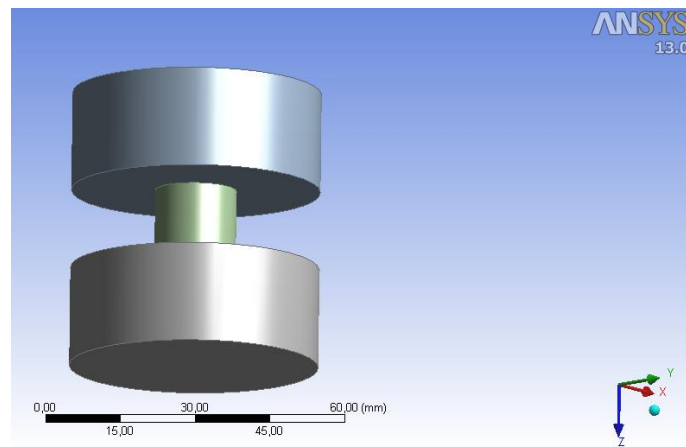


Figura 4.30 – Geometria exportada do *SolidWorks* para o *Ansys Workbench*

#### 4.3.3. MALHA

Neste estudo de espumas metálicas, as malhas foram geradas automaticamente uma vez que devido à geometria bastante complexa das espumas, houve bastantes dificuldades em atribuir tamanhos e tipos de malha. Desta forma, o programa escolheu malhas diferentes para os apoios e para as espumas.



Tanto os apoios como as espumas metálicas as malhas são constituídas por elementos sólidos. Nos primeiros são quadrados, enquanto que nas espumas são triangulares, como é visível na figura 4.31 para a espuma de alumínio de células uniformes.

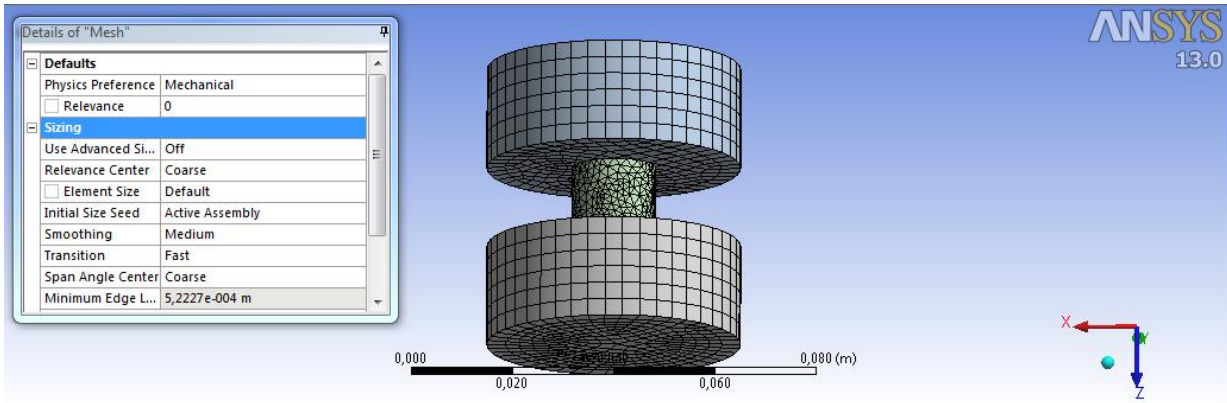


Figura 4.31 – Malha obtida na espuma de células uniformes

Como é visível na figura 4.31, a malha gerada tem um tamanho de elemento mínimo de 0,52227 mm, que corresponde ao tamanho máximo dos elementos utilizados nesta espuma. A figura 4.32 ilustra a malha obtida na espuma *dual-size*.

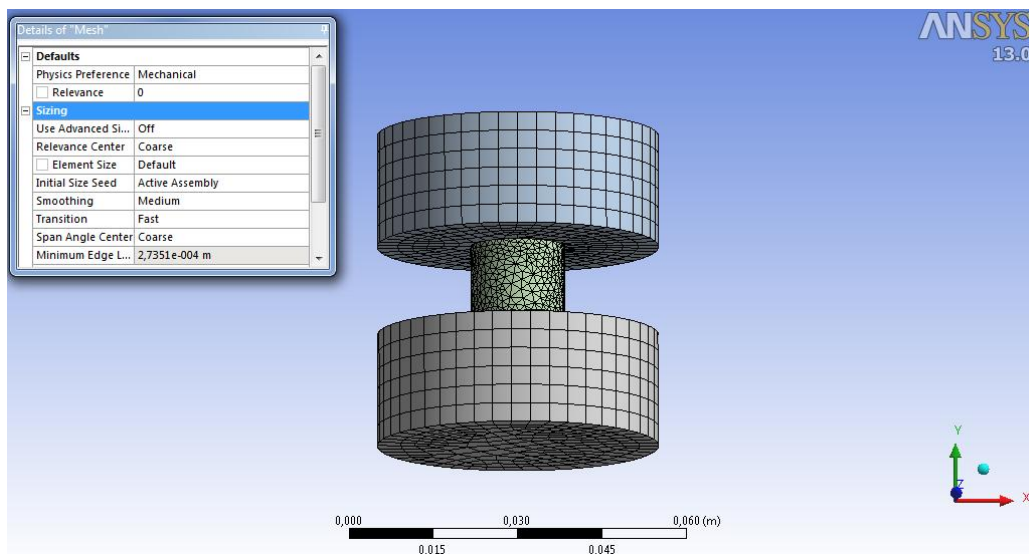


Figura 4.32 – Malha obtida na espuma *dual-size*

Como é visível, a malha obtida nos apoios é exatamente igual à situação anterior. O tamanho mínimo dos nós utilizados na espuma é de 0,27351 mm aproximadamente e o tamanho máximo é de 60 mm. A diferença entre as malhas obtidas na espuma uniforme e na espuma *dual-size* pode ser visualizada através da figura 4.33.

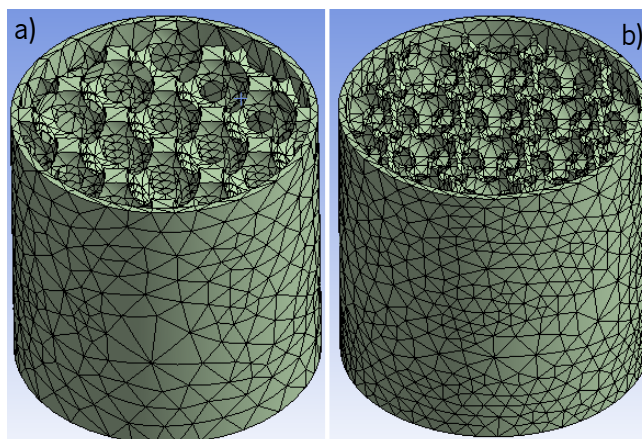


Figura 4.33 – Diferença entre as malhas obtidas nas espumas: a) Uniforme; b) Dual-Size

#### 4.3.4. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

A carga aplicada na espuma de alumínio de células uniformes foi de 2325 N. O contacto da carga com a espuma é feito através da peça de aço colocada na parte superior da espuma em que a carga é aplicada na superfície superior desta peça, garantindo um deslocamento uniforme da espuma, como é visível na figura 4.34.

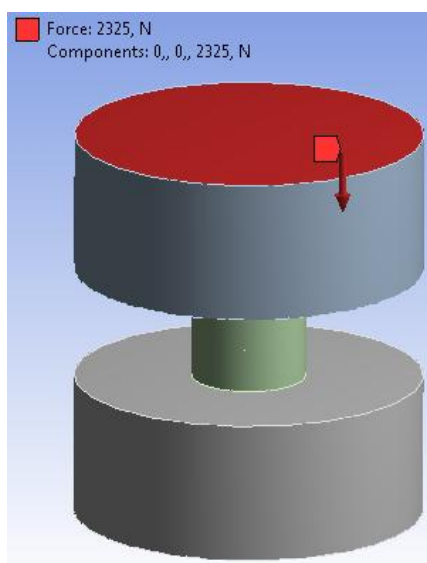


Figura 4.34 – Aplicação da carga na espuma uniforme

Quanto à espuma *dual-size*, a carga é aplicada da mesma forma que na espuma uniforme alterando, apenas a sua intensidade que, no caso da *dual-size* é de 2200 N. A intensidade das cargas aplicadas foram escolhidas por um método tentativa erro porque para valores superiores, a simulação numérica não convergia e não era possível realizar a análise.

Quanto à fixação, esta será efetuada através de um encastramento na peça de aço inferior. Este suporte fixo está representado na figura 4.35.

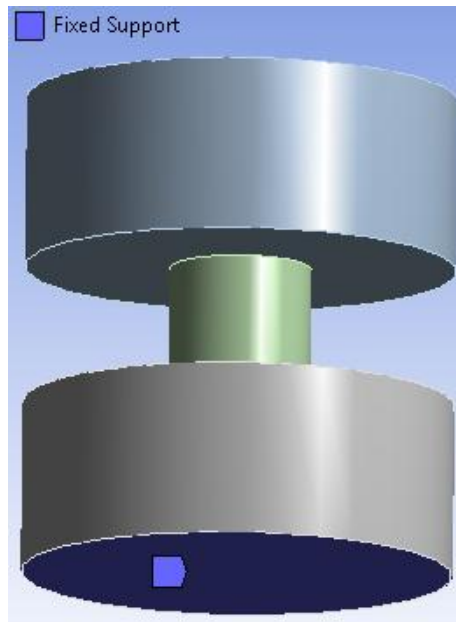


Figura 4.35 – Aplicação das restrições na espuma uniforme

A espuma *dual-size* é fixada exatamente da mesma forma que a espuma uniforme.

A restrição é efetuada na peça em aço para garantir, tal como na aplicação da carga, uniformidade nos resultados obtidos.

#### 4.3.5. OBTENÇÃO DE RESULTADOS

Na opção "*Static Structural*" do Ansys só é possível estudar o comportamento elásto-plástico dos componentes simulados. Por este motivo, apenas será estudado a capacidade de deformação plástica e elástica das espumas. Outra propriedade que é possível estudar é a rigidez das espumas uma vez que esta propriedade depende da carga e do deslocamento calculado.

Para assegurar que há deformação plástica nos componentes em estudo, a opção "*Large Deflection*" no Ansys tem que estar ativa.

Para obter os resultados coerentes, foram colocados 50 passos para determinar o número de pontos correspondentes que possibilita a construção gráfica mais coerente das curvas pretendidas uma vez que cada passo significa um ponto do gráfico.

O deslocamento que, o componente em análise, sofre durante a aplicação da carga é medido através da opção "*Deformation Probe*" do Ansys, onde a superfície selecionada para medir o deslocamento das espumas é a mesma onde é aplicada a carga, como é demonstrado na figura 4.36.

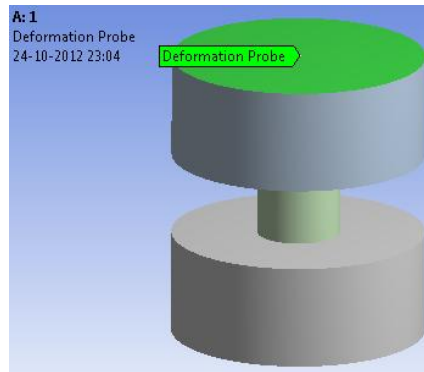


Figura 4.36 – Medição da deformação das espumas

Outro parâmetro importante para estudar o comportamento mecânico das espumas é a carga exercida em cada passo da análise, possibilitando analisar o comportamento da força e, conseqüentemente, determinar os gráficos das curvas carga-deslocamento das espumas. Para possibilitar a leitura da força, a opção disponibilizada pelo Ansys é a “*Force Reaction*” e é colocada no suporte fixo.

Tanto na força como no deslocamento, é necessário referir o eixo é que se pretende medir estes dois parâmetros, em que o eixo tem de ser o mesmo da aplicação da carga pois é onde ocorre o máximo deslocamento e onde se verifica a maior intensidade de força. Estes dois parâmetros também são suficientes para analisar a rigidez de cada espuma, uma vez que esta é a relação entre a carga e o deslocamento.

#### 4.3.6. EXPOSIÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os resultados obtidos são a curva carga-deslocamento que contempla o domínio elástico e o domínio elásto-plástico. Para análise da rigidez, os pontos a retirar da curva devem estar compreendidos no domínio elástico. Desta forma, serão apresentadas as curvas carga-deslocamento completas e, numa fase posterior, serão apresentadas as curvas cargas-deslocamento, no domínio elástico, das duas espumas analisadas para determinar a rigidez de cada espuma. Após determinada a rigidez de cada espuma, foi calculada a energia elástica de deformação que cada espuma absorve quando carregadas com cargas que não ultrapassem o domínio elástico.

A figura 4.37 mostra uma curva típica carga-deslocamento.

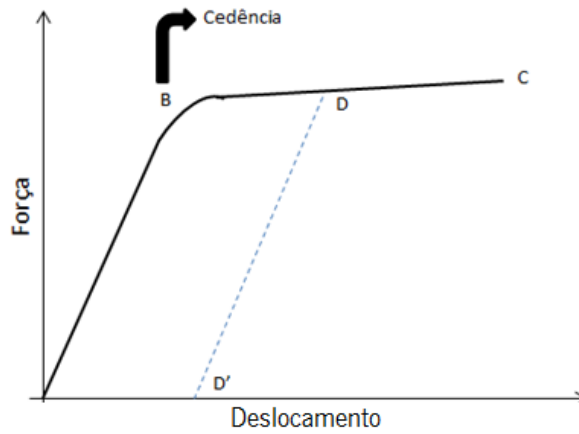


Figura 4.37 – Exemplo de uma curva carga-deslocamento [31]

Através desta curva, é possível definir a região elástica que ocorre quando a carga é aplicada entre o ponto A e o ponto B. Quando a carga é aplicada entre os pontos B e C, existe deformação plástica. Se o material é carregado até ao ponto D e a carga é retirada, então a deformação permanente que resulta deste carregamento é definida pela distância entre os pontos A e D. A resistência do material é indicada pela carga máxima, antes de atingir o ponto de rutura. Em termos de energia, esta é calculada pela área existente abaixo da curva. A rigidez do material é definida pela inclinação da região linear da curva.

Relativamente às simulações das duas espumas, foram realizadas e o gráfico da convergência dos passos, para a espuma uniforme, está representado na figura 4.38, em que o critério de convergência utilizado pelo programa é o critério da força.

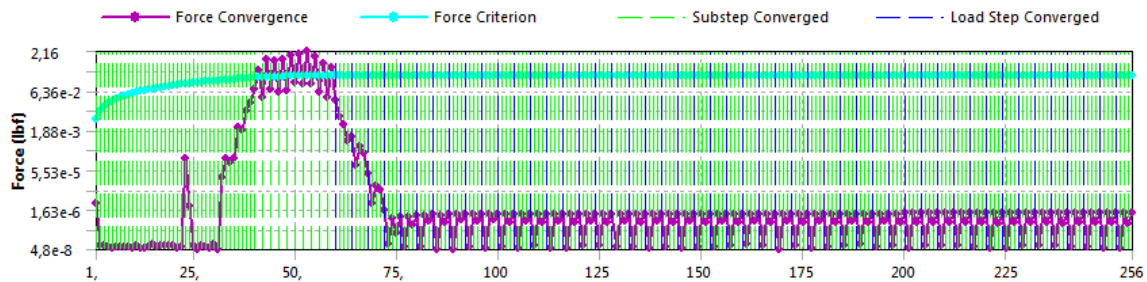


Figura 4.38 – Convergência dos passos para a espuma uniforme

Para a espuma *dual-size*, o critério de convergência é apresentado na figura 4.39.

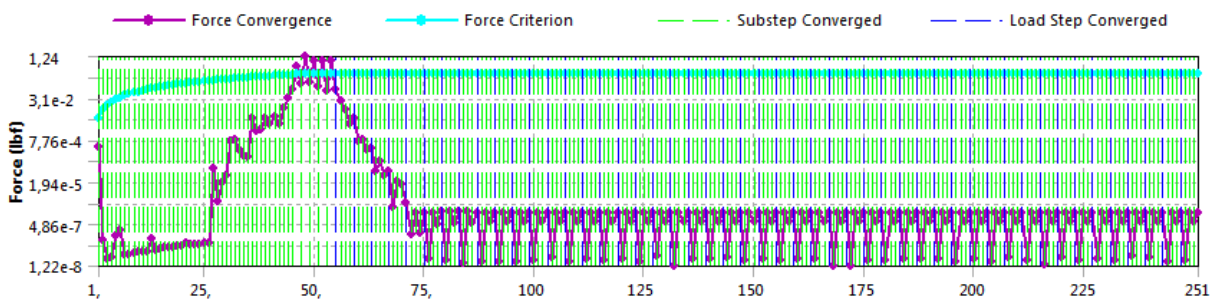


Figura 4.39 – Convergência dos passos para a espuma *dual-size*

Como é visível nas duas figuras, as duas soluções convergiram sem qualquer tipo de erro, o que é um fator determinante na credibilização dos resultados obtidos.

#### 4.3.6.1. Comportamento elásto-plástico das espumas

O comportamento elásto-plástico das espumas de alumínio em estudo será quantificado por uma curva carga-deslocamento. Este tipo de curvas permite determinar propriedades dos componentes em estudo, como por exemplo, a rigidez e, conseqüentemente, a energia de deformação no domínio elástico.

Para determinar o comportamento da espuma de alumínio de células uniformes, como já foi referido, foi aplicada uma carga de 2300 N. A figura 4.40 mostra o deslocamento da espuma de células uniformes e dos apoios ao longo do eixo onde é aplicada a carga, no último passo do ensaio. A não deformação plástica dos apoios é ativada no instante em que se insere o material nos apoios, assegurando que o único componente deformado plasticamente é a espuma.

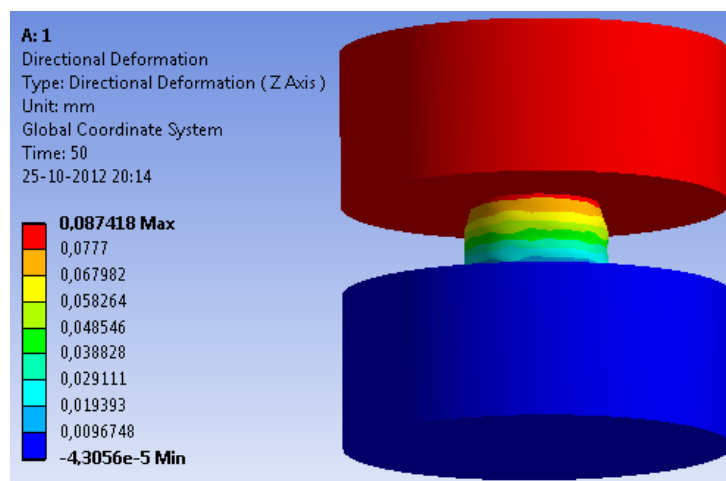


Figura 4.40 – Deslocamento da espuma uniforme ao longo do eixo dos zz

Como é visível através da figura 4.40, o deslocamento final da espuma corresponde a 0,087 mm, aproximadamente. Através desta distribuição do deslocamento da espuma e do gráfico carga-deslocamento é possível verificar a zona deformada plasticamente e a zona deformada elasticamente, uma vez que no gráfico é fornecida o deslocamento de cedência. É possível verificar, também, que o apoio onde é aplicado o suporte fixo não sofreu qualquer deslocamento o que demonstra que este componente não teve influência nos resultados obtidos.

O comportamento carga-deslocamento calculado numericamente no Ansys está representado na figura 4.41.

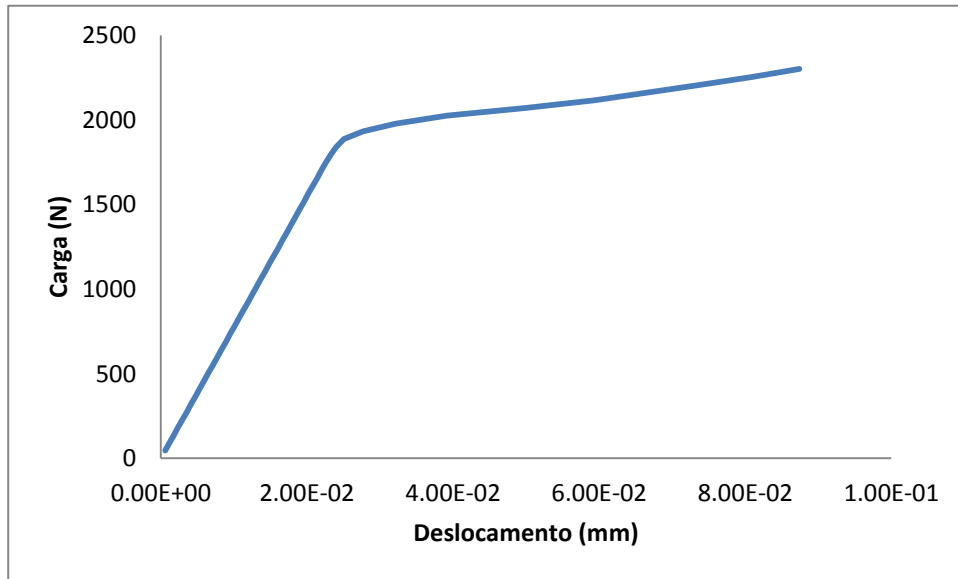


Figura 4.41 – Curva carga-deslocamento numérica da espuma uniforme obtida no Ansys *Workbench*

Como é visível na figura 4.41, a partir de uma carga de 1 800 N a espuma de células uniformes entra no domínio plástico e o deslocamento correspondente é, aproximadamente, 0,024 mm o que demonstra uma capacidade de deformação do material muito baixa. A partir deste valor, a espuma começou a deformar plasticamente até a um deslocamento final de 0,084 mm, aproximadamente resultante da baixa capacidade de deformação do material.

Foi, também, testado a resposta elásto-plástica da espuma de células uniformes no programa *CosmosWorks* e foram comparados os resultados obtidos em Ansys e *Cosmosworks*, como é demonstrado através da figura 4.42. Os passos para a simulação em *CosmosWorks* encontram-se no Anexo V.

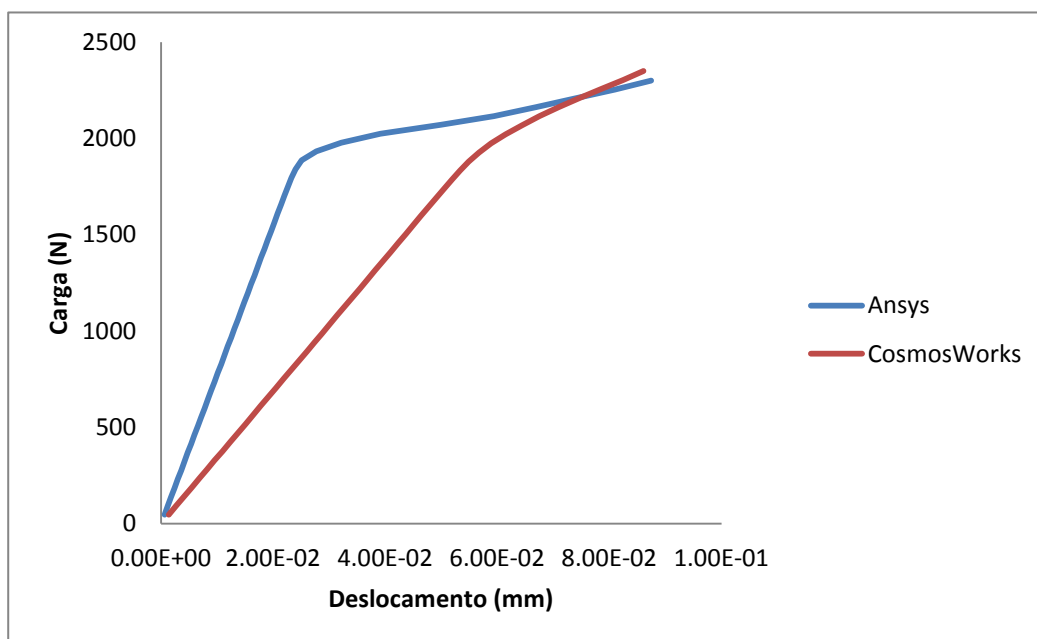


Figura 4.42 – Comparação dos resultados numéricos obtidos no Ansys e no *CosmosWorks*

Como é visível na figura 4.42, existem diferenças nos valores obtidos nos dois programas de cálculo que podem ser explicados pelo tipo de malha utilizado. No *CosmosWorks*, era necessário utilizar elementos de malha mais pequenos do que os escolhidos mas, devido à capacidade de processamento dos dados, foi impossível refinar mais a malha porque as dimensões da espuma em estudo eram relativamente pequenas. A figura 4.43 mostra uma comparação entre as malha obtidas no Ansys Workbench e no *CosmosWorks*.

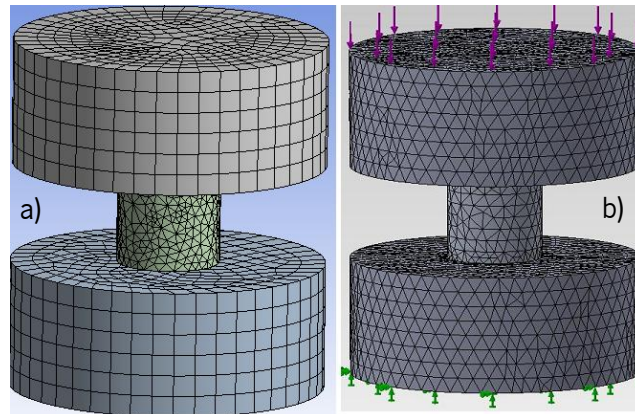


Figura 4.43 – Comparação das malhas obtidas nos dois programas: a) Ansys; b) *CosmosWorks*

Após obtidas as curvas numéricas carga-deslocamento no Ansys e no *CosmosWorks*, para a espuma de células uniformes, são comparados com os resultados numéricos com os experimentais como é visível através da figura 4.44. Nos resultados experimentais, foram utilizados os valores até à carga máxima atingida no ensaio, porque os restantes estão relacionados com a densificação da espuma e não relevantes para esta análise comparativa uma vez que é uma análise elásto-plástico.

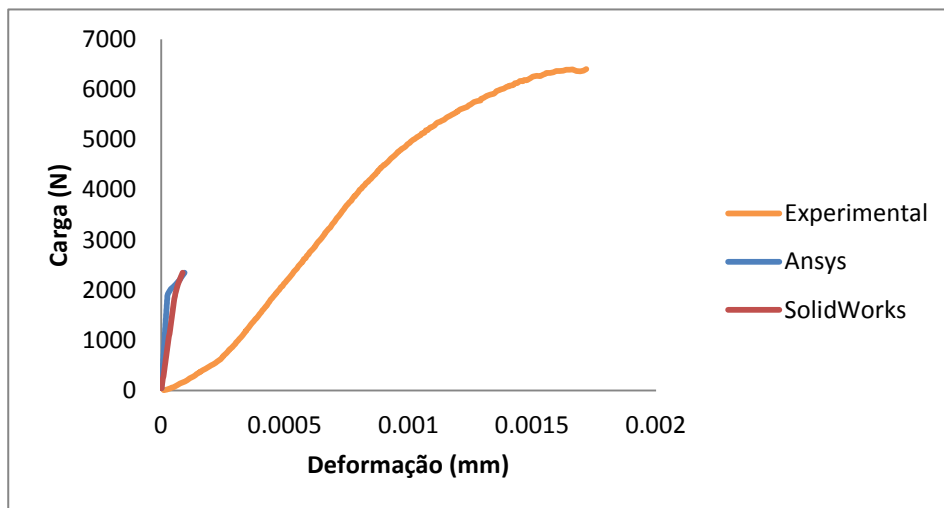


Figura 4.44 – Comparação entre os resultados experimentais e os numéricos para a espuma uniforme

Como é claramente visível, existe uma grande discrepância entre os resultados obtidos experimentalmente e os obtidos numericamente. Um dos fatores que influenciou claramente os resultados é a curva do material inserida nos programas, uma vez os provetes tinham rechupes o que



adultera de forma substancial os resultados obtidos durante o ensaio de tração e, conseqüentemente os resultados obtidos numericamente. Por outro lado, o alumínio escolhido para a produção das espumas também não era o indicado, uma vez que o silício reduz a ductilidade das ligas e, conseqüentemente, das espumas. A presença de gesso no interior da espuma adulterou, também, os resultados obtidos nos ensaios experimentais. Outro fator que teve influência nestes resultados foi a altura da espuma uniforme ensaiada experimentalmente ser diferente da testada numericamente uma vez que, no ensaio experimental, a espuma tinha cerca de 38,5 mm de altura, enquanto que no ensaio numérico a espuma tinha cerca de 16 mm.

Para a espuma *dual-size*, o deslocamento ao longo do conjunto apoios e espuma pode ser consultado na figura 4.45. A força necessária aplicada no estudo para determinar o comportamento da espuma dual size foi de 2100 N e, neste caso específico, foi aplicada na direção do eixo dos *yy*.

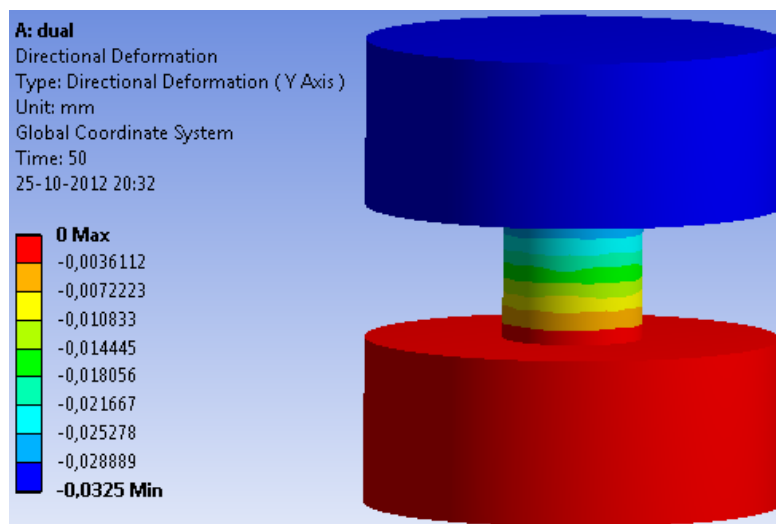


Figura 4.45 – Deslocamento da espuma *dual-size* ao longo do eixo dos *yy*

Os deslocamentos estão dispostos com sinal negativo devido a uma opção do *software*. Como é claramente visível, a capacidade de deformação da espuma *dual-size* é muito menor que a espuma uniforme, o que significa que seja previsível uma maior rigidez da espuma *dual-size*.

Para a espuma dual size a curva carga-deslocamento está representada na figura 4.46.

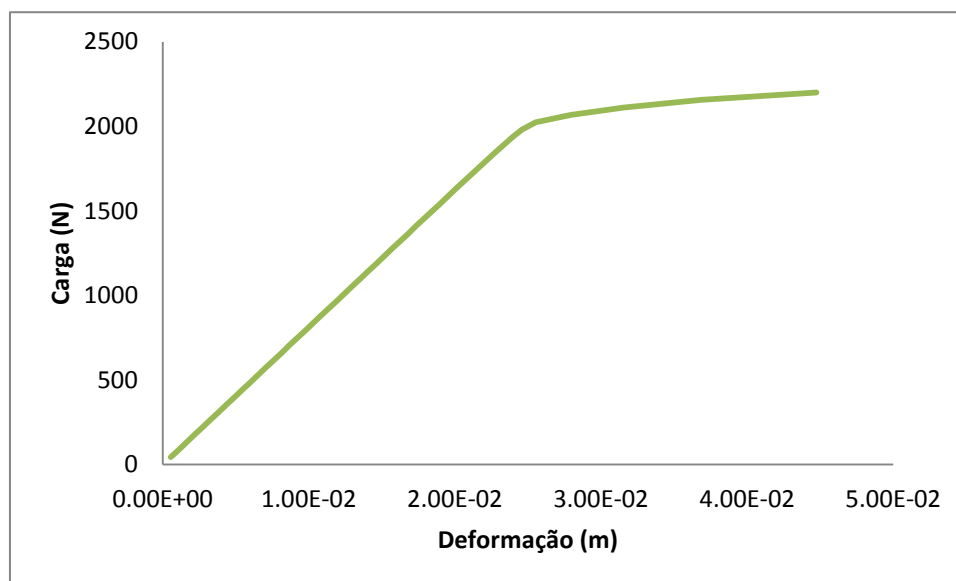


Figura 4.46 – Curva carga-deslocamento numérica da espuma *dual-size* no Ansys

Após determinada a curva carga-deslocamento numérica da espuma *dual-size* é possível comparar os valores numéricos com os experimentais – figura 4.47 que, tal como na comparação dos valores na espuma uniforme, os valores colocados na curva vão apenas até à carga máxima porque os restantes valores correspondem à densificação da espuma que não é alvo de estudo nesta obra.

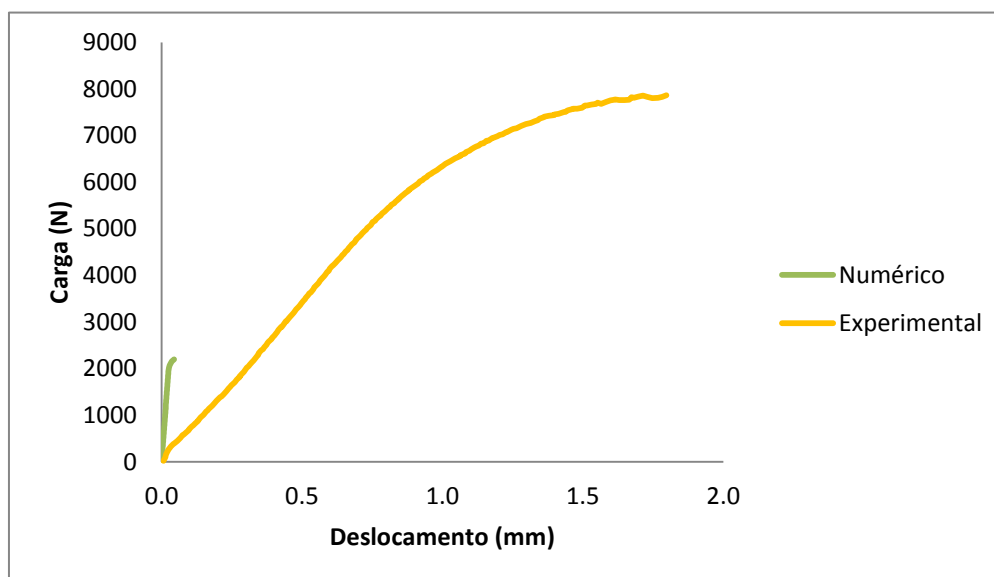


Figura 4.47 – Comparação das curvas carga-deslocamento numéricas da espuma *dual size*

Como é visível, existe muita discrepância entre os resultados obtidos experimentalmente e os obtidos numericamente que, tal como na espuma de células uniformes, são explicados pela curva do material inserida no programa, pela existência de gesso no interior da espuma e pela liga de alumínio escolhida.

Tal como na espuma uniforme, a altura da espuma testada experimentalmente era diferente da espuma testada numericamente, em que na análise experimental a espuma tinha cerca de 38 mm e no estudo numérico a espuma tinha cerca de 16 mm.

Outra análise comparativa possível é entre o comportamento da espuma de células uniformes e da espuma de células *dual-size* (figura 4.48).

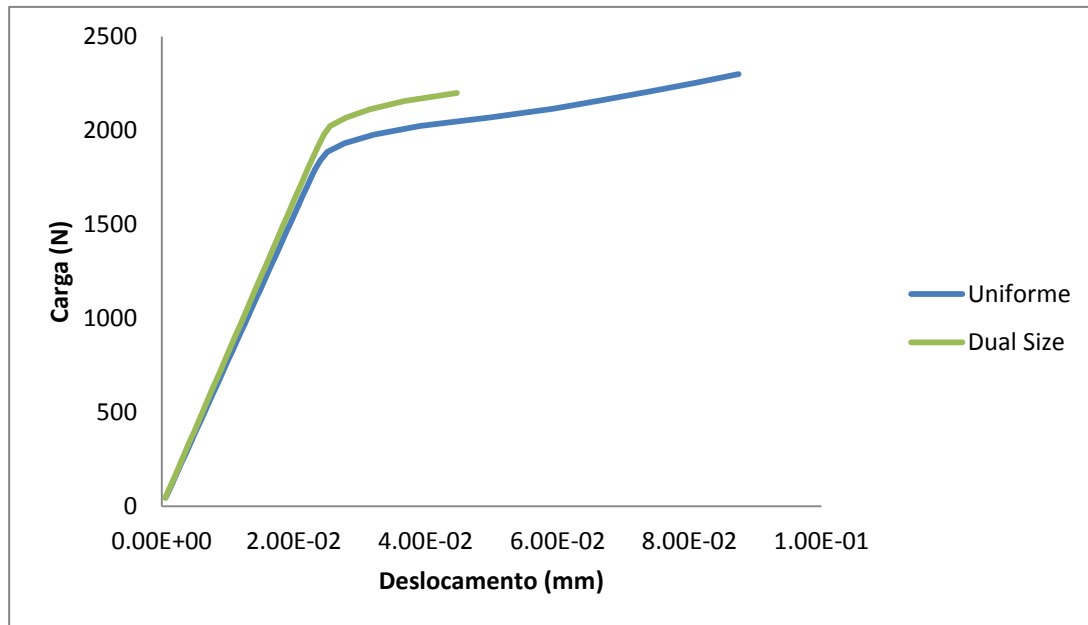


Figura 4.48 – Comparação das curvas carga-deslocamento numéricas das espumas uniforme e *dual size*

É claramente visível que a carga elástica atingida é superior na espuma *dual-size*. Contudo, a capacidade de deformação plástica é bastante superior na espuma uniforme do que na espuma *dual-size*.

#### 4.3.6.2. Rigidez

A rigidez dos estudos numéricos calcula-se da mesma forma que a rigidez das espumas de alumínio ensaiadas experimentalmente (*subcapítulo 3.6*). Desta forma, a rigidez corresponde à inclinação da reta que define a zona linear do material (equação 3.6). Os resultados expressam a rigidez apenas das espumas com parede, como é visível na tabela 13. No caso da rigidez específica, foi calculada a massa de cada espuma metálica ensaiada numericamente (tabela 14).

Tabela 13 – Valores da rigidez e rigidez específica dos ensaios experimentais e numéricos

	<b>Ensaio</b>	<b>Rigidez (N/m)</b>	<b>Rigidez específica (N/m.g)</b>
Uniforme	Numérico	$8 \times 10^7$	$4,9 \times 10^7$
	Experimental	$6 \times 10^6$	$1,46 \times 10^6$
<i>Dual-size</i>	Numérico	$8 \times 10^7$	$5,3 \times 10^7$
	Experimental	$7 \times 10^6$	$1,84 \times 10^6$

Tabela 14 – Massas das espumas ensaiadas numericamente

<b>Espumas</b>	<b>Massa (g)</b>
Uniforme	1,64 g
<i>Dual-size</i>	1,51 g

Como é possível verificar, no ensaio numérico verifica-se uma maior rigidez das espumas de alumínio comparativamente aos ensaios experimentais. Tanto nos resultados numéricos como nos experimentais, verifica-se uma maior rigidez da espuma *dual-size* o que demonstra que para a mesma deformação, é possível obter cargas maiores com a espuma de alumínio de células *dual-size* do que com as de células uniformes.

#### 4.3.6.3. Energia de deformação

No caso do estudo numérico, a energia de deformação a calcular é nos domínios elástico e plástico, uma vez que não é possível determinar o mecanismo de densificação das espumas metálicas. Desta forma, também é calculada a energia de deformação de cada espuma de alumínio com parede, ensaiadas experimentalmente, apenas nos domínios elástico e plástico permitindo uma análise comparativa entre os ensaios numéricos e experimentais.

O método de cálculo da energia de deformação, neste caso, é igual ao apresentado no *subcapítulo 3.7*. A energia de deformação nos domínios elástico e plástico das espumas de alumínio com parede ensaiadas numericamente e experimentalmente estão apresentadas na tabela 15. É apresentado, também, a energia de deformação específica que é calculada através da equação 3.10.

Tabela 15 – Valores da energia e da energia específica das espumas ensaiadas numericamente e experimentalmente

	<b>Ensaio</b>	<b>Energia (J)</b>	<b>Energia específica (J/g)</b>
Uniforme	Numérico	0,081	0,049
	Experimental	3,26	0,8
<i>Dual-size</i>	Numérico	0,039	0,027
	Experimental	4,33	1,14

Neste caso, verifica-se uma menor capacidade de absorção de energia da espuma de alumínio de células *dual-size* testada numericamente o que não corresponde ao comportamento esperado. A menor capacidade de deformação deste tipo de espuma explica a sua menor capacidade de absorção de energia. Também se verifica que as espumas de alumínio ensaiadas experimentalmente têm uma maior capacidade de absorção de energia de deformação do que as ensaiadas numericamente. As explicações encontradas para esta diferença são, como já foi referido, a curva de material inserida no programa de cálculo, o gesso existente no interior da espuma e a diferença de altura das espumas de alumínio ensaiadas experimentalmente e as ensaiadas numericamente.

## **5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

As espumas metálicas poderão ser uma excelente opção em solicitações de impacto devido à sua baixa densidade, elevada resistência e excelente capacidade de absorção de energia à compressão, ou seja, existe uma excelente relação densidade-resistência em que, através destas propriedades, é possível a conceção de estruturas mais leves.

Ao longo desta dissertação, foram estudados dois tipos de espumas de alumínio: de células uniformes e de célula *dual-size*, em que foi estudado e comparado o comportamento elásto-plástico, a rigidez e a energia absorvida por cada espuma numa solicitação à compressão.

Foram realizados estudos experimentais e numéricos às duas espumas, em que a ferramenta de elementos finitos utilizada para modelar o comportamento elásto-plástico das espumas foi o Ansys *Workbench* 13, que é uma ferramenta em desenvolvimento contínuo e cujas potencialidades pretendiam ser exploradas pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho. Foram realizados testes de validação do *software* que se revelaram satisfatórios e demonstraram a potencialidade do programa.

Para possibilitar uma análise exata através de elementos finitos é necessário que o material utilizado no estudo numérico seja igual ao utilizado no modelo experimental. Para tal, é necessário uma curva tensão-extensão uma vez que é a curva que define o comportamento de qualquer material. Foram então efetuados vários ensaios de tração em provetes fundidos com o mesmo alumínio utilizado na espuma. Numa primeira abordagem, utilizaram-se provetes relativamente pequenos que não permitiam a colocação de extensómetros o que conduziu a curvas tensão-extensão incongruentes. Uma das formas para tentar solucionar este entrave foi a alteração da área útil que, no caso anterior, não era uma área linear. Após novos ensaios de tração comprovou-se que a extensão medida pela máquina envolvia a deformação do provete e a deformação de todo o conjunto de amarração, o que conduz a uma leitura incorreta dos resultados e, conseqüentemente, a uma curva tensão-extensão incoerente. Foi consultada a norma portuguesa de ensaios de tração e foram fundidos provetes com as dimensões recomendadas pela norma de forma a, numa tentativa final, determinar a curva tensão-extensão do material utilizado na espuma. Comprovou-se que a leitura da extensão foi feita corretamente, porém, a presença de rechupes resultantes da má fundição dos provetes alterou as propriedades da liga testada. Quanto aos resultados obtidos neste ensaio, verificou-se que a capacidade de deformação da liga era muito baixa, o que traduziu uma menor capacidade de deformação das espumas no programa de elementos finitos. Esta menor capacidade de deformação da liga utilizada é explicada pelo silício

uma vez que reduz a ductilidade do material devido à microestrutura acicular que este elemento concede numa liga de alumínio.

Na simulação experimental das espumas os ensaios decorreram sem problemas. Contudo, houve defeitos no fabrico das espumas uma vez que no interior destas existia gesso o que influenciou os resultados práticos obtidos e não permitiu uma comparação exata com os resultados obtidos no cálculo numérico. Foram testadas, também, os dois tipos de espumas mas sem a parede exterior o que permitiu a extração do gesso que existia no interior das mesmas. Após realizados os ensaios comprovou-se um melhor comportamento elásto-plástico das espumas *dual-size* visto que nestes ensaios, estas espumas metálicas, para o mesmo deslocamento, suportou cargas mais elevadas. Foram calculados os valores da rigidez e da energia de deformação das espumas de alumínio com e sem parede ensaiadas experimentalmente e comprovou-se uma maior rigidez e capacidade de absorção de energia das espumas *dual-size* nas duas situações, o que demonstra uma maior aptidão deste tipo de espumas metálicas do que as de células uniformes para carregamentos à compressão. A energia específica da espuma de alumínio de células *dual-size* é o dobro do da espuma de células uniformes o que significa que é possível obter estruturas mais leves com espumas metálicas de células *dual-size*, para o mesmo tipo de carregamento.

No estudo numérico, devido à complexidade da geometria das espumas testadas no *Ansys Workbench* e, também, devido à complexidade do programa, foram realizados inúmeros testes numéricos às espumas de forma a tentar identificar os erros obtidos em cada análise. Um dos vários parâmetros que foram alvo de estudo foi a dimensão dos elementos de malha. Porém, devido aos constantes erros que surgiam das análises de diferentes tamanhos de elementos de malha, foi optado pela escolha automática do programa do tamanho e do tipo de elementos a utilizar no *software*. Nos estudos foram aplicadas cargas na parte superior das espumas e determinou-se a deformação que as espumas sofriam consoante a carga aplicada, determinando-se os gráficos carga-deslocamento.

Nos resultados obtidos numericamente, comprovou-se que a capacidade de deformação plástica da espuma *dual-size* é inferior à da uniforme devido às ligações da primeira serem mais pequenos do que os da segunda, o que provoca tensões maiores nas ligações da *dual-size*. Foi efetuada uma comparação entre o *Ansys Workbench* e o *CosmosWorks*, que são duas ferramentas bastante utilizadas em análises numéricas e verificou-se que a curva carga-deslocamento obtida no *CosmosWorks* é ligeiramente diferente da curva obtida no *Ansys*, explicada pela malha mais grosseira adotada neste *software*. Verificou-se, também, que existiram divergências relativamente aos resultados obtidos experimentalmente que são explicadas pela má conceção das espumas ensaiadas experimentalmente

e pela dificuldade existente na definição da curva do material. Outro motivo para a discrepância dos resultados experimentais e numéricos é as diferentes alturas das espumas testadas numericamente e as espumas testadas experimentalmente.

Quanto à rigidez do cálculo numérico das duas espumas metálicas, comprovou-se que a espuma de alumínio de células *dual-size* tem uma rigidez superior do que a de células uniformes o que significa que para o mesmo valor da deformação, a espuma de alumínio *dual-size* suporta cargas superiores do que a de células uniformes o que vai de encontro à teoria existente sobre o comportamento destas duas espumas (*Kou et al* [16]). Quanto à capacidade de absorção de energia verificou-se que a espuma de alumínio de células uniformes, no estudo numérico, tem uma maior capacidade do que a *dual-size* o que contradiz os resultados obtidos experimentalmente. Esta contradição é explicada pela menor capacidade de deformação plástica da espuma de alumínio de células *dual-size*, no estudo numérico. Através destas incongruências deduz-se que o grau de confiança nos resultados numéricos é baixo.

Para desenvolvimentos futuros, numa primeira fase, deve ser escolhida outra liga de alumínio para o fabrico das espumas, uma vez que esta não é a mais indicada para este tipo de solicitações mecânicas. A escolha desta liga para esta aplicação prendeu-se com a boa fluidez e diminuição da contração do material durante o arrefecimento que o silício utilizado nesta liga confere ao fundido. Contudo, como já foi explicado, o silício não é benéfico para solicitações mecânicas. A melhor liga para esta aplicação é a A356 uma vez que apresenta uma boa fluidez e uma boa ductilidade.

Numa segunda fase, é aconselhável o melhoramento do processo de fundição das espumas de alumínio, para que não haja gesso no interior das espumas e que os resultados obtidos experimentalmente não sejam adulterados pelo gesso existente no interior das espumas.

Nos ensaios efetuados houve diferenças entre as alturas das espumas ensaiadas experimentalmente e as espumas ensaiadas numericamente (no cálculo numérico as espumas tinham cerca de 16 mm, enquanto que nos ensaios experimentais tinham 38 mm). Para possibilitar uma boa análise comparativa entre os resultados numéricos e os resultados experimentais, a altura das espumas deve ser a mesma.

Propõem-se que seja realizada uma análise de sensibilidade ao módulo de elasticidade da curva do material inserida nos dois programas de cálculo e, de que modo, este parâmetro influencia a rigidez e a energia de deformação das espumas.

Nos ensaios efetuados no programa de elementos finitos *CosmosWorks*, a malha utilizada não foi a mais indicada, provocando diferenças nos resultados obtidos entre este *software* e o Ansys. Para solucionar esta diferença, a malha deve ser mais refinada.

A análise de elementos finitos realizada às espumas foi feita apenas no domínio elásto-plástico (opção "*Static Structural*" do Ansys *Workbench*) o que não permitiu fratura das ligações da espuma metálica e, conseqüentemente, não possibilitou a análise dos mecanismos de densificação de espuma. Um dos grandes fatores na escolha de espumas metálicas é a sua resposta a solicitações dinâmicas explicada pelo seu comportamento de densificação das ligações. Portanto, uma análise dinâmica poderá trazer respostas mais conclusivas quanto ao comportamento mecânico das espumas.

Deverá ser analisado e comparado com o modelo utilizado neste estudo, a utilização de um modelo numérico simplificado em que deve ser inserida uma curva de resposta da espuma metálica e, posteriormente, ser assumido que um cilindro maciço tendo um comportamento igual ao da espuma metálica.



## **6. BIBLIOGRAFIA**

1. *Cellular Metals*. **Evans, Anthony G., Hutchinson, John W. and Ashby, Michael F.** Cambridge : s.n., 1998.
2. *A continuum plasticity model for the constitutive and indentation behaviour of foamed metals*. **Miller, Ronald E.** Canada : ScienceDirect, 1998.
3. **Sosnik, Benjamin.** *Process For Making Foamlike Mass of Metal*. Estados Unidos, Maio 8, 1948.
4. *Characterisation of aluminium matrix syntactic foams under static and dynamic loading*. **Altenaiji, M., Schleyer, G. K. and Zhao, Y. Y.** Liverpool : s.n., 2011.
5. *International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology*. **Banhart, J., Ashby, M. F. and Fleck, N. A.** Bremen : s.n., 2001.
6. *Espumas Metálicas: Potencial de Inovação na Construção Naval*. **Figueiras, Fábio G. N.** Aveiro : s.n., 2006.
7. *Effects of heat treatment on compressive properties of AZ91 Mg and SG91A Al foams with open-cell structure*. **Yamada, Y., et al.**
8. *Potencial de Inovação na Construção Naval*. **Rizov, Victor Iliev.** Bulgaria : ScienceDirect, 2006.
9. **Gibson, Lorna J. and Ashby, Michael F.** *Cellular solids*. Cambridge : s.n., 1997.
10. *Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams*. **Banhart, John.** Bremen, Germany : Pergamon, 2000.
11. *Metallic foams: challenges and opportunities*. **Banhart, John.** Germany : s.n., 2000.
12. **Barbosa, Joaquim.** *Processos de Fundição*. Guimarães : Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, 2003.
13. Georgia College of Tech Engineering. [Online] [www.mse.gatech.edu](http://www.mse.gatech.edu).
14. Metal Foam. [Online] <http://metalfoam.net/>.
15. *The Strain Rate Effect of an Open Cell Aluminum Foam*. **Han, Fusheng, et al.** China : s.n., 2004.
16. *Mechanical behavior of open-cell metallic foams with dual-size cellular structure*. **Kou, D. P., et al.** China : ScienceDirect, 2008.
17. *Constitutive modeling of aluminium foam including fracture and statistical variation of density*. **Reyes, A., et al.** Norway : ScienceDirect, 2003.
18. *Elasto-plastic constitutive model of aluminum alloy foam subjected to impact loading*. **Zhi-hua, Wang, Lin, Jing and Long-mao, Zhao.** China : ScienceDirect, 2010.
19. **Ansys.** *Ansys Mechanical APDL and Mechanical Applications Theory Reference*. 2010.

20. *Experimental and numerical studies of foam-filled sections.* **Santosa, Sigit P., et al.** Norway : Pergamon, 1999.
21. *Partition energy absorption of axially crushed aluminum foam-filled hat sections.* **Song, Hong-Wei, et al.** China : ScienceDirect, 2004.
22. *Numerical simulation of drop weight impact behaviour of closed cell aluminium foam.* **Rajendran, R., Moorthi, A. and Basu, S.** India : Elsevier, 2008.
23. Joinville. [Online]  
<http://www.joinville.ifsc.edu.br/~paulosergio/Tecnologia%20dos%20Materiais%20II/APOSTILA%20TMA%20II.pdf>.
24. Feup. [Online] [http://paginas.fe.up.pt/~mcnunesQMAR0708propr\\_mec\\_QM.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~mcnunesQMAR0708propr_mec_QM.pdf).
25. **International, ASM.** *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials.*
26. Ipen. [Online] <http://www.ipen.br/biblioteca/2008/cbecimat/13292.pdf>.
27. **Beer, Ferdinand P., et al.** *Mechanics of Materials.* New York : McGraw-Hill Companies, 2009.
28. Kxcad. [Online] <ftp://kxcad.net/ANSYS/Ansys%20Mechanical.pdf>.
29. **Ansys.** *Verification Manual for Workbench Release.* 2009.
30. **Timoshenko, S.** *Elementary Theory and Problems.* Toronto, New York and London : D. Van Nostrand Company, Inc, 1940.
31. GrupMec. [Online] <http://grupomec.tripod.com/Material.htm>.
32. **SolidWorks.** *Help Simulation: Static Analysis.*
33. Ipb. [Online] <http://www.ipb.pt/~mnvalente/2005-1sem/MA2/MA2-Introducao.pdf>.
34. *High-velocity impact experiment of aluminum foam sample using powder gun.* **Tanaka, Shigeru, et al.** Japan and Slovenia : Elsevier, 2011.
35. *Stress-Strain Curves.* **Roylance, David.** Cambridge : s.n., 2001.
36. **Branco, Carlos A. G. de Moura.** *Mecânica dos Materiais.* Coimbra : Fundação Calouste Gulbenkian, Lda., 2006.
37. **Dias, F. Teixeira, et al.** *Método dos Elementos Finitos: Técnicas de Simulação Numérica em Engenharia.* Lisboa : Lidel - edições técnicas, Lda, 2010.
38. **Morais, José Manuel de Simões.** *Desenho Técnico Básico.* Porto : Gráficos Reunidos, Lda, 2011.

## **A. ANEXOS**

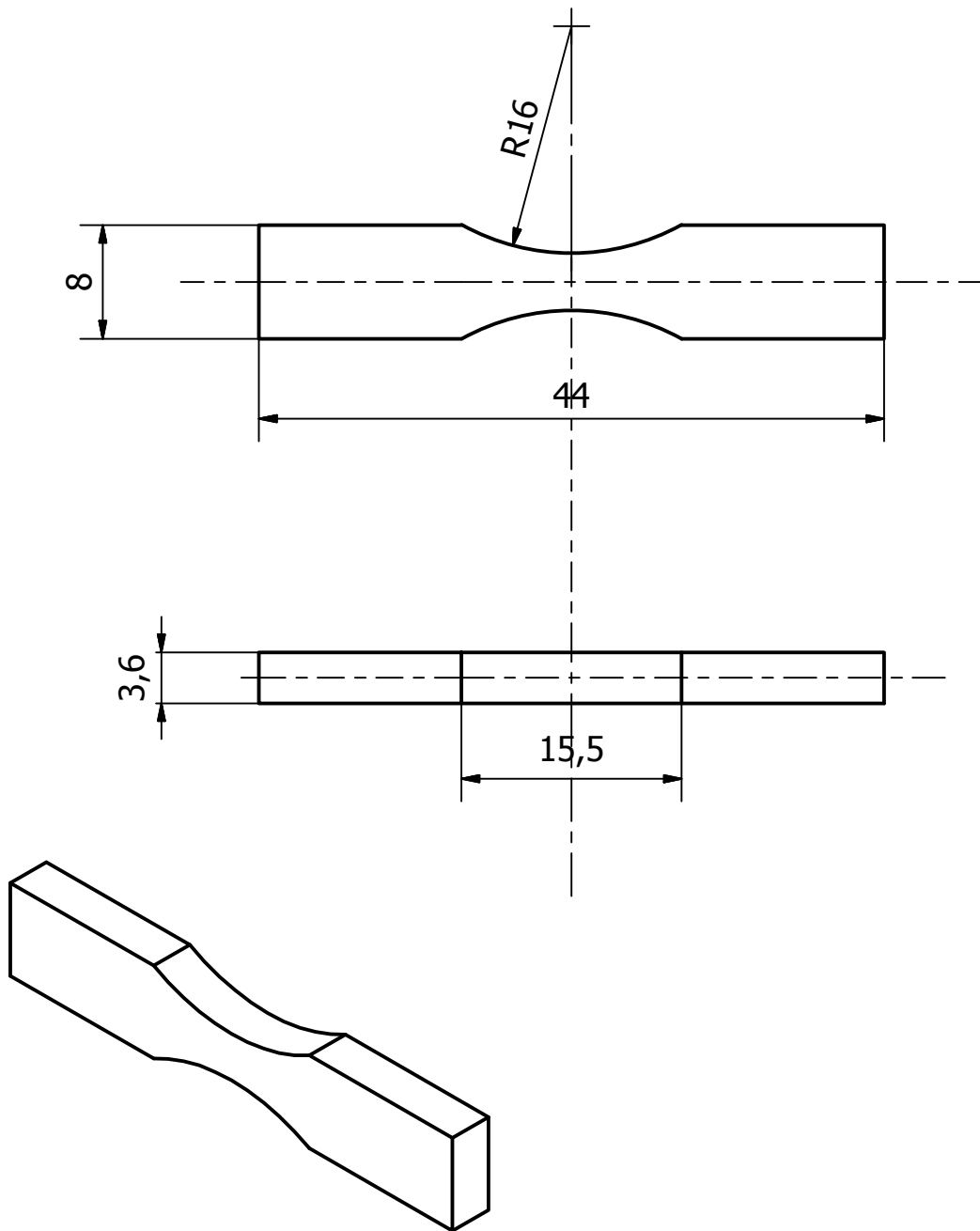
Anexo I .....	109
Anexo II .....	111
Anexo III .....	115
Anexo IV .....	119
Anexo V .....	131
Anexo VI .....	141
Anexo VII .....	157



## **Anexo I**

Provetes do Ensaio de tração

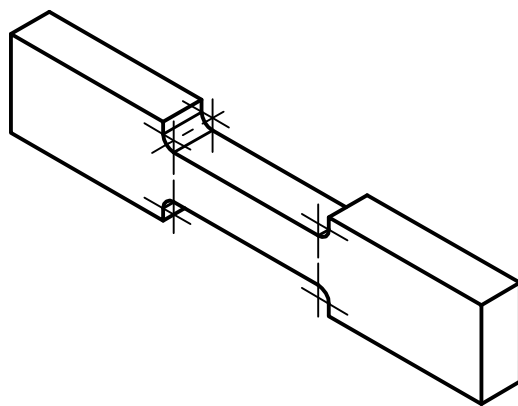
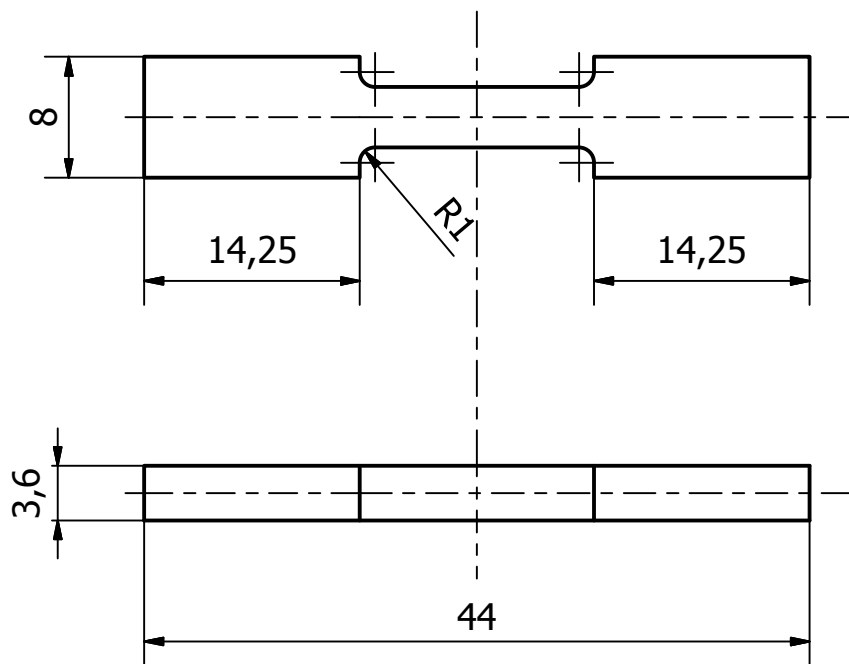




Projec.			UNIVERSIDADE DO MINHO Departamento de Engenharia Mecânica	Dissertação				
Desenh.				Cristiano Carvalho, 52790				
Copiou								
Verific.								
Escala	1ª Tentativa							
2:1								
Toler.								
				Substituído por:				
				Substituído por:				

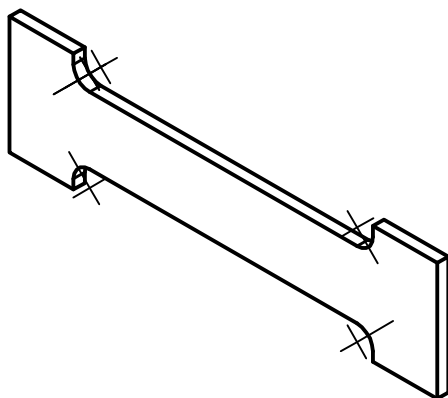
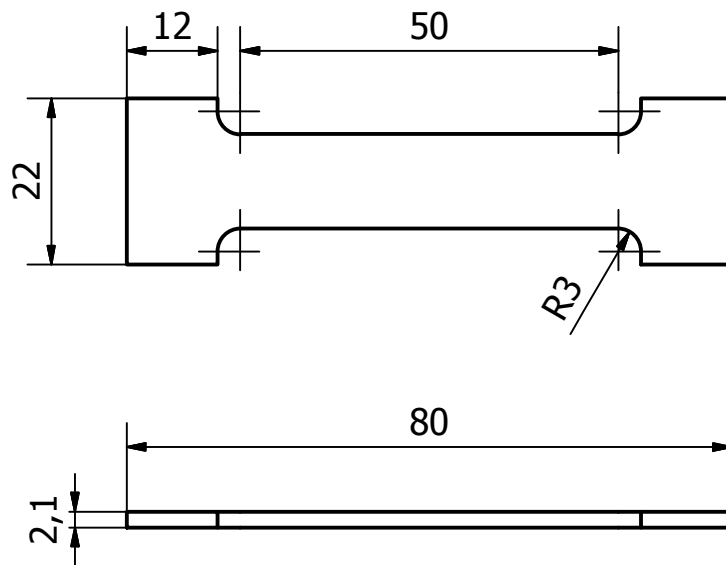






Projec.			UNIVERSIDADE DO MINHO Departamento de Engenharia Mecânica	Dissertação																				
Desenh.				Cristiano Carvalho, 52790																				
Copiou				2ª Tentativa																				
Verific.																								
Escala	2:1			<table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td colspan="8">Substituído por:</td> </tr> </table>													Substituído por:							
Substituído por:																								
Toler.																								





Projec.			UNIVERSIDADE DO MINHO Departamento de Engenharia Mecânica	Dissertação				
Desenh.				Cristiano Carvalho				
Copiou				3ª Tentativa				
Verific.								
Escala	1:1							
Toler.								
				Substituído por:				
				Substituído por:				



## **Anexo II**

Propriedades mecânicas para a liga de alumínio utilizada



As propriedades da liga A413.1, que é a liga utilizada nas espumas de alumínio, foram consultadas no livro ASM. As propriedades diferem de liga para liga. Neste caso, as propriedades estão apresentadas na tabela 16.

Tabela 16 – Propriedades típicas de um ensaio de tração para uma liga A413.1 fundida a diferentes temperaturas [33]

Temperatura (°C)	Tensão de Rutura (MPa)	Tensão de Cedência (MPa)	Alongamento (b) %
- 195	360	160	1.5
- 80	310	145	2
-28	303	145	2
24	295	145	2.5
100	255	140	5
150	220	130	8
205	165	105	15
260	90	60	30
315	50	30	35
370	30	15	40

A densidade mássica desta liga à temperatura ambiente (20°C) é de 2.657 g/cm<sup>3</sup>. A variação do módulo de elasticidade com a temperatura para esta liga está representado na figura a.1.

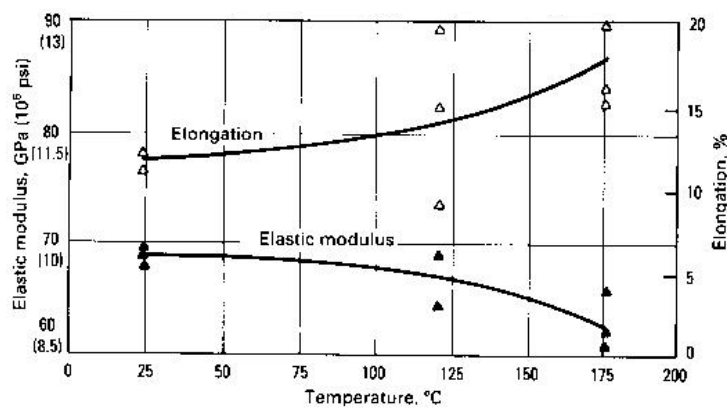


Figura A.1 – Variação do módulo de elasticidade e do alongamento com a temperatura [33]





### **Anexo III**

Pontos da curva real para inserir nos programas



Tabela 17 – Pontos da curva de plasticidade utilizados nos programas de elementos finitos

<b>Extensão (mm/mm)</b>	<b>Tensão (Mpa)</b>	<b>Extensão (mm/mm)</b>	<b>Tensão (Mpa)</b>
0	90	⋮	⋮
0.003715542	90.80877777	0.006237326	110.036924
0.00372844	91.11275209	0.006392057	110.9543168
0.003834754	91.95908901	0.006411033	111.0740119
0.003852566	92.04585436	0.006529355	111.9160161
0.003952503	92.98125952	0.006562303	112.1251617
0.003955375	93.17088365	0.006703082	112.9885531
0.004056464	93.83996364	0.006719328	113.1975283
0.004060525	94.00688622	0.006893637	113.8608447
0.00415873	94.63598642	0.006898538	114.1601422
0.004167753	95.006798	0.007046421	114.9970311
0.004298685	95.83515719	0.007057334	115.0533784
0.004319813	96.10071797	0.007228413	115.951773
0.004430906	96.96744602	0.007251136	116.1513353
0.004446643	97.10389444	0.007426323	116.9887017
0.004541179	97.90446995	0.007438179	117.3182348
0.004544977	98.06231777	0.007513455	117.8276515
0.004660103	98.886071	0.007627223	118.0170228
0.004680013	99.0019048	0.007786635	118.9576927
0.004783449	99.71714812	0.007800144	119.1281929
0.004789642	100.1085855	0.007919697	119.9430371
0.004951786	100.9015698	0.007933464	120.1561498
0.004949983	101.2153955	0.00815992	120.7838621
0.005040889	101.9273689	0.008170514	121.1738284
0.005061432	102.1177659	0.008406279	121.8318984
0.005220235	102.8806906	0.008415098	122.1140328
0.005251352	103.3689468	0.008552283	122.9969431
0.005333741	103.8807121	0.008570248	123.1880794
0.005357338	104.0229962	0.008787627	123.8201951
0.005491885	104.8404411	0.008793228	124.0068979
0.005510877	105.1663075	0.009018237	124.9659442
0.005594289	105.7838091	0.009032603	125.0149449
0.005613706	106.0025811	0.009310802	125.9475734
0.005781286	106.9482479	0.009325682	126.3571943
0.005787592	107.0649442	0.009561011	126.876006
0.005887737	107.8813489	0.009570456	127.2089355
0.005897739	108.1244607	0.009780511	127.9029155
0.006085391	108.969911	0.009989271	128.7902496
0.006098709	109.1811712	0.00999234	129.0785744
0.006216121	109.9327021	0.01025566	129.5618376
⋮	⋮		



## **Anexo IV**

Teoria do *CosmosWorks*



No *CosmosWorks*, numa fase inicial é definido o critério de cedência. Neste programa, o critério utilizado em materiais metálicos é o de *Von Mises* e é escrito através da equação 1. [34]

$$F = \sqrt{3}\bar{\sigma} - \sigma_y = 0 \quad (1)$$

Em que  $\bar{\sigma}$  é a tensão efetiva e  $\sigma_y$  é a tensão de cedência de um teste uniaxial. No caso de utilização deste modelo, a opção "*large strain*" está disponível, ou seja, é possível fazer análises plásticas. Uma regra de fluxo é assumida como associativa, tanto a opção endurecimento "*isotropic*" como "*Kinematic*" e pode ser introduzida uma curva bilinear ou multilinear.

Tal como no *Ansys*, a opção que permite fazer análises plásticas é a "*large strain*".

## 1. ANÁLISE PLÁSTICA

Na teoria da plasticidade "*large strain*", uma medida logarítmica da deformação é medida pela equação 2.

$$\varepsilon = \ln[U] \quad (2)$$

Em que  $[U]$  é o tensor da extensão ("*stretch tensor*") usualmente obtido através da decomposição polar do gradiente da deformação (equação 3).

$$F = R \cdot U \quad (3)$$

Em que  $R$  é o tensor rotação. O logaritmo incremental é estimado pela equação 4.

$$\Delta\varepsilon = B(n + 1/2) \cdot \Delta u \quad (4)$$

$B(n + 1/2)$  é a matriz deformação-deslocamento para  $n + 1/2$  e  $\Delta u$  é o vetor de deslocamentos incrementais. A taxa de tensão é tomada como a taxa de Green-Naghdi de modo a tornar modelo constitutivo de um sistema invariante ou objetivo. A transformação da taxa de tensão num sistema global é efetuada através de um sistema-R (equação 5).

$$\dot{\sigma}_R = R^T \cdot \dot{\sigma}^* \cdot R \quad (5)$$

A entidade do modelo constitutivo é idêntica à teoria "*small strain*". Na plasticidade é aplicada o critério de *Von Mises*, regra de fluxo associada e endurecimento isotrópico ou cinemático (bilinear ou

multilinear). O algoritmo retorno-radial é usado nesta teoria. A ideia básica é aproximar o vetor normal  $N$  através da equação 6.

$$\xi_{n+1}^{tr} = (\sigma_{n+1}^{tr} - \alpha_n)' \quad (6)$$

A equação 3.38 pode ser traçada num espaço de tensões como é visível na figura a.2.

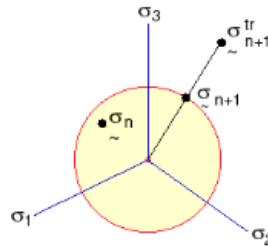


Figura A.2 – Espaço de tensões [34]

O elemento vetor força e a matriz de rigidez são calculadas baseadas na formulação Lagrangiana atualizada. O tensor de Cauchy, o logaritmo de deformações e a espessura corrente (elementos tipo *Shell*) são registados num ficheiro de *outputs*. A elasticidade é modelada através de um modelo hiperelástico e assume pequenas deformações elásticas, mas permite deformações plásticas arbitrárias. Para problemas elásticos de “*large strain*” (borrachas), é possível utilizar modelos de materiais hiperelásticos como o de *Mooney-Rivlin*. [34]

No caso particular da história da tensão influenciar um carregamento proporcional, em que componentes como o tensor de tensões varia monotonamente num rácio constante com qualquer outro, as deformações podem ser expressas em termos do estado final das tensões através das equações 7 e 8.

$$\sigma = D' \varepsilon \quad (7)$$

$$D' = D(E', \nu) \quad (8)$$

Em que  $D$  é a matriz secante do material,  $E'$  é o modulo secante e  $\nu$  é o coeficiente de *Poisson*. O vetor de deformações totais  $\varepsilon$  é usado para calcular a deformação efetiva  $\bar{\varepsilon}$  para obter o modulo secante através da definição da curva do material. Para um caso tridimensional utiliza-se a equação 9.



$$\begin{aligned} \varepsilon^2 = & \frac{1 - \nu}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)} (\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \varepsilon_{zz}^2) \\ & + \frac{1 - 2\nu}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)} (\varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{yy}\varepsilon_{zz} + \varepsilon_{zz}\varepsilon_{xx}) \\ & + \frac{1}{2(1 + \nu)} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{xz}^2) \end{aligned} \quad (9)$$

A curva tensão-deformação do terceiro (compressão) ao quarto quadrante (tração) é aplicável neste modelo em elementos de duas e três dimensões com algumas modificações. Um método de interpolação é utilizado para obter a secante e a tangente do módulo do material. É definido um rácio  $R$  que é função de uma deformação volumétrica  $\Phi$ , da deformação efetiva e do coeficiente de *Poisson* (equação 10). [34]

$$R = \frac{\Phi}{\varepsilon(1 - 2\nu)} \quad (10)$$

O módulo secante  $E^s$  e o módulo  $E^t$  tangente são expressos pela equação 11.

$$E^{s,t} = \frac{[E^{s,t}(c) + E^{s,t}(t)]}{2} + R \frac{[E^{s,t}(t) - E^{s,t}(c)]}{2} \quad (11)$$

É de notar que  $R = 1$  representa o caso de tração e  $R = -1$  representa o caso de compressão (figura a.3).

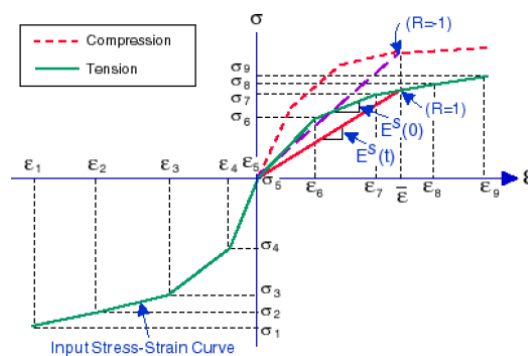


Figura A.3 – Curva típica tensão-deformação de modelo material não-linear [34]

## 2. CONCEITO DA CURVA TEMPO

Em análises estáticas não-lineares, as cargas são aplicadas em passos incrementais através de curvas tempo. A curva tempo descreve como a curva ou as restrições mudam durante a solução dos passos. Para análises não-lineares dinâmicas e estáticas com propriedades do material dependentes do tempo (fluência), tempo representa o tempo real associado com aplicações de carga. [34]

Existem diferentes procedimentos numéricos que podem ser incorporados em problemas não-lineares usando o método de elementos finitos. Um procedimento eficaz deve incluir uma técnica de controlo capaz de controlar o progresso do cálculo ao longo dos caminhos de equilíbrio do sistema, um método iterativo para resolver um conjunto de equações não-lineares simultaneamente governadas por um estado de equilíbrio ao longo do(s) conjunto(s) e sistemas de término para finalizar o processo de solução. [34]

Existem diferentes técnicas de controlo para descrever uma análise não-linear. O controlo da força (figura a.4) é uma técnica em que as cargas aplicadas no sistema são usadas para descrever variáveis. Cada estado (ponto) num passo de equilíbrio é determinado através da interceção da superfície ( $F=\text{constante}$ ) com diferentes passos para determinar os parâmetros da deformação. [34]

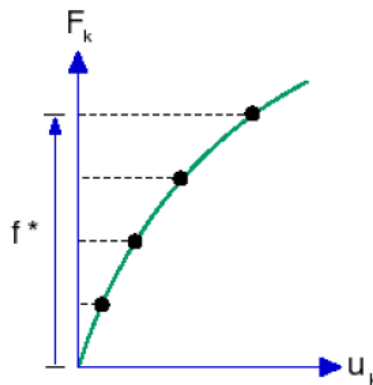


Figura A.4 – Controlo da força [34]

Na adaptação desta técnica para uma análise por elementos finitos, as cargas são aplicadas incrementalmente através da associação de curvas tempo. Na técnica de controlo por deslocamentos, um ponto num caminho de equilíbrio é determinado pela interceção de uma superfície por um parâmetro de deformação constante ( $U=\text{constante}$ ) com uma curva de solução idêntica à da figura a.5. [34]

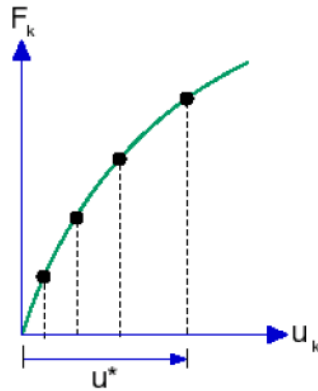


Figura A.5 – Controle de deslocamentos [34]

Para incorporar esta técnica numa análise de elementos finitos, um modelo de cargas aplicadas é proporcionalmente incrementado (usando um único multiplicador de forças) para encontrar o equilíbrio sob o controle de um grau de liberdade específico. Este controle do grau de liberdade é especificado pela seleção de um vértice ou de um ponto de referência e é incrementado usando a curva tempo. [34] Outra técnica de controle é a “*arc-length*” em que um parâmetro especial é prescrito por meio de uma equação de restrição (auxiliar) em que é adicionada para o conjunto de equações que regem o equilíbrio do sistema. No sentido geométrico, o parâmetro de controle pode ser visto por “*arc length*” de caminhos de equilíbrio como é mostrado na figura a.6.

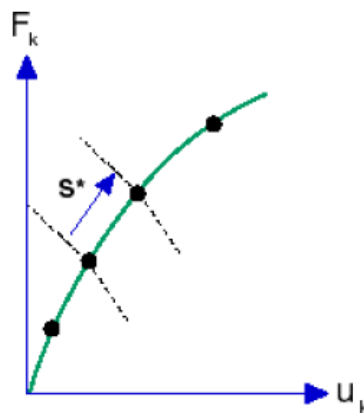


Figura A.6 – Controle por “arc-length” [34]

Para usar esta técnica numa análise por elementos finitos, uma parte das cargas aplicadas são incrementadas proporcionalmente (usando um único multiplicador de forças) para achar o equilíbrio entre o controle de um arco de comprimento específico no passo de equilíbrio. O “*arc length*” é calculado automaticamente pelo programa, não requerendo a curva tempo. [34]

O controle por forças e deslocamentos vai falhar na vizinhança de um ponto da curva, como é visível na figura a.7. [34]

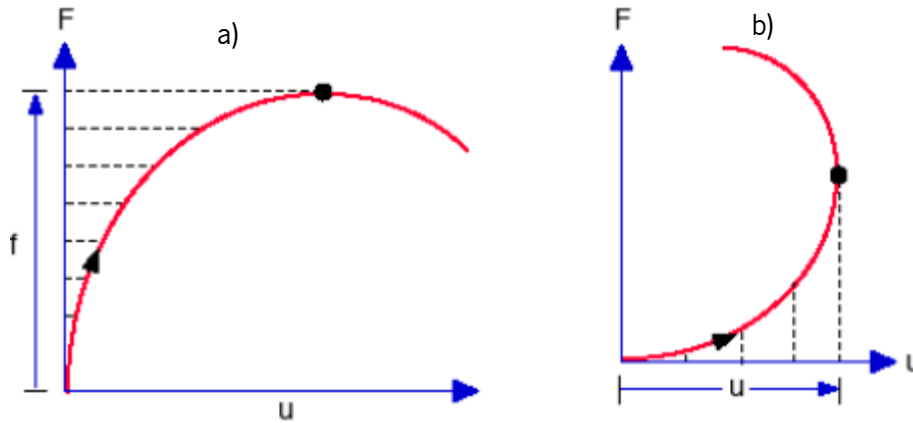


Figura A.7 – a) Falha do critério da força e b) Falha do critério de deslocamentos [34]

Estas dificuldades, normalmente são resolvidas pelo controlo por “arc-length” (figura a.8).

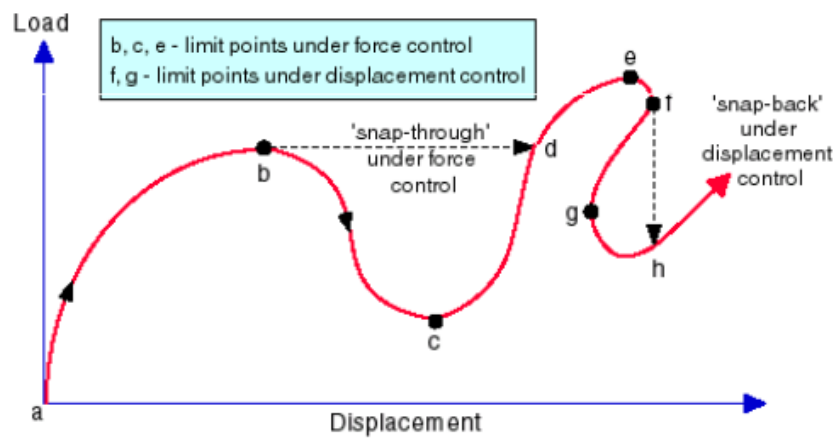


Figura A.8 – Falha dos critérios da força e deslocamento [34]

### 3. MÉTODO DE SOLUÇÕES ITERATIVAS

Numa análise não-linear estática, as equações básicas utilizadas na resolução de qualquer passo de tempo  $t + \Delta t$  é da forma da equação 12.

$$\{R\}^{t+\Delta t} - \{F\}^{t+\Delta t} = 0 \quad (12)$$

Em que  $\{R\}^{t+\Delta t}$  é o vetor das cargas externas aplicadas nos nós e  $\{F\}^{t+\Delta t}$  é o vetor interno das cargas geradas nos nós.

As cargas internas nos nós dependem dos deslocamentos dos nós para o tempo  $t + \Delta t$ ,  $\{U\}^{t+\Delta t}$ , logo um método iterativo pode ser utilizado. As equações 13, 14, 15, 16 e 17 são utilizadas para resolver o método iterativo num passo de tempo  $t + \Delta t$ .

$$\{\Delta R\}^{(i-1)} = \{R\}^{t+\Delta t} - \{F\}_{(i-1)}^{t+\Delta t} \quad (13)$$

$$[K]_i^{t+\Delta t} \cdot \{U\}_i^{t+\Delta t} = \{\Delta R\}_{(i-1)} \quad (14)$$

$$\{U\}_i^{t+\Delta t} = \{U\}_{i-1}^{t+\Delta t} + \{\Delta U\}_i \quad (15)$$

$$\{U\}_0^{t+\Delta t} = \{U\}^t \quad (16)$$

$$\{F\}_0^{t+\Delta t} = \{F\}^t \quad (17)$$

Em que  $\{F\}_{(i-1)}^{t+\Delta t}$  é o vetor das forças internas geradas nos nós na iteração ( $i$ ),  $\{\Delta R\}_{(i-1)}$  é o vetor da falta de equilíbrio das cargas na iteração ( $i$ ),  $\{\Delta U\}_i$  é o vetor incremental dos deslocamento dos nós na iteração ( $i$ ),  $\{U\}_i^{t+\Delta t}$  é o vetor dos deslocamentos totais na iteração ( $i$ ) e  $[K]_i^{t+\Delta t}$  é a matriz Jacobiana na iteração ( $i$ ). [34]

Existem diferentes formas para calcular as diferentes iterações. Neste programa, as utilizadas são o método de *Newton-Raphson* e o método de *Newton-Raphson modificado*.

No método de *Newton-Raphson*, a matriz Jacobiana é formada e decomposta em cada iteração com um passo particular como é mostrado na figura a.9. O método NR tem a melhor taxa de convergência em que esta taxa é quadrática. Contudo, desde que a matriz Jacobiana é formada e decomposta em iterações, que pode ser extremamente grande para modelos largos (plasticidade), logo opta-se por outros modelos para análises não-lineares estáticas. [34]

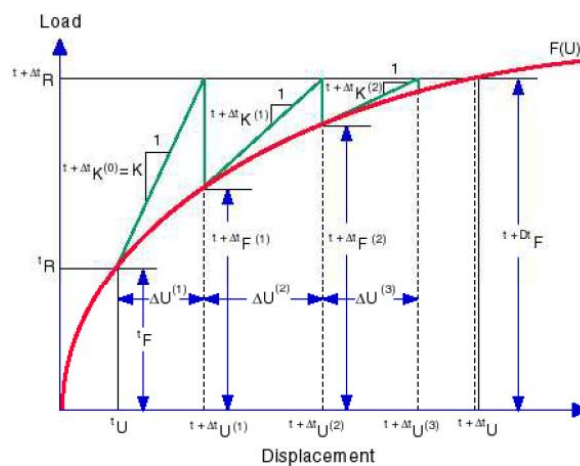


Figura A.9 – Método iterativo de Newton-Raphson [34]

No método de *Newton-Raphson modificado*, a matriz tangencial é formada e decomposta no início de cada passo (ou é especificada quando são definidas as propriedades do estudo) e é usada ao longo das iterações como é possível verificar na figura a.10.

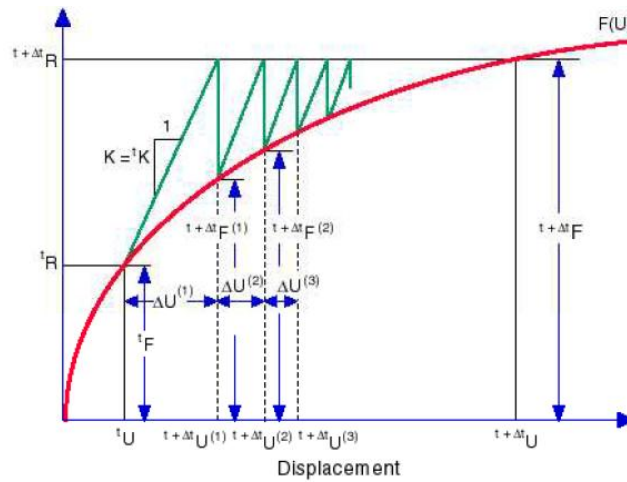


Figura A.10 – Método de Newton-Raphson modificado [34]

#### 4. DISCRETIZAÇÃO

Neste *software* não existe muita informação relacionado com a discretização de elementos de malha. Um dos possíveis motivos é o pouco número de estudos numéricos realizados com este programa. Quando um modelo é discretizado, o *software* gera uma mistura automática de elementos sólidos, casca, mola e elementos de contacto baseados na geometria, ou seja, o programa cria automaticamente as seguintes malhas: [34]

- Malha de sólidos: é efetuada através de um elemento sólido tetraédrico 3D para componentes sólidos. É adequado para objetos maciços.
- Malha de elementos casca: é utilizada em chapas metálicas com espessura uniforme (exceto em solicitações de impacto) e geometrias de superfícies. Para chapas metálicas é criada automaticamente a superfície média (figura a.11). O programa retira a espessura da casca da espessura da folha de metal.

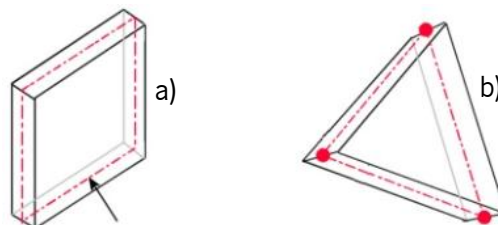


Figura A.11 – a) Superfície média de uma folha de metal é realçada b)Elemento casca criado pela superfície média com os nós [34]

Para superfícies, o programa localiza a malha na superfície (plano médio de casca), como é representado na figura a.12.

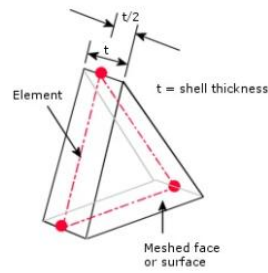


Figura A.12 – Representação do elemento casca [34]

- Malha tipo viga: o programa identifica automaticamente juntas para tocar ou não e interferir nos membros da estrutura com uma certa tolerância. Um elemento viga é uma linha definida por dois extremos e uma secção transversal. Estes elementos suportam cargas axiais, flexão, corte e torsão. As treliças resistem apenas a cargas axiais. [34]





## **Anexo V**

Passos para a simulação não-linear efetuada no *CosmosWorks*



Neste anexo são apresentados os passos adotados na simulação não-linear efetuada no *CosmosWorks*. O primeiro passo foi a escolha do estudo a realizar (figura a.13). Neste caso, foi escolhido o tipo “*Non Linear*” e a opção “*Static*”.

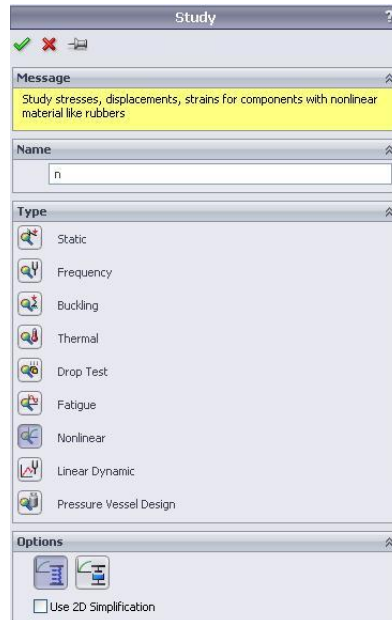


Figura A.13 – Escolha do tipo de estudo numérico

Posteriormente, são aplicados os materiais aos diversos componentes presentes no estudo – figura a.14.

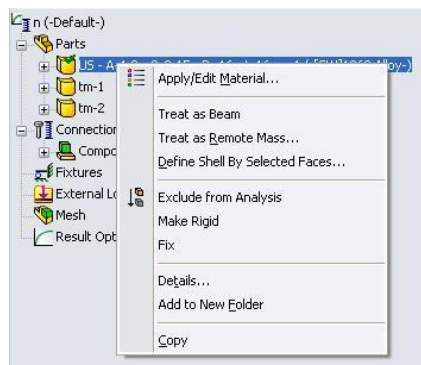


Figura A.14 – Escolha do material para os componentes

Para a espuma de células uniformes, que é a espuma utilizada neste estudo, é necessário inserir a mesma curva de material inserida no Ansys. Neste programa, para análises não-lineares, foi escolhida a opção “*Plasticity – von Mises*” para caracterizar o material, como é demonstrado na figura a.15.

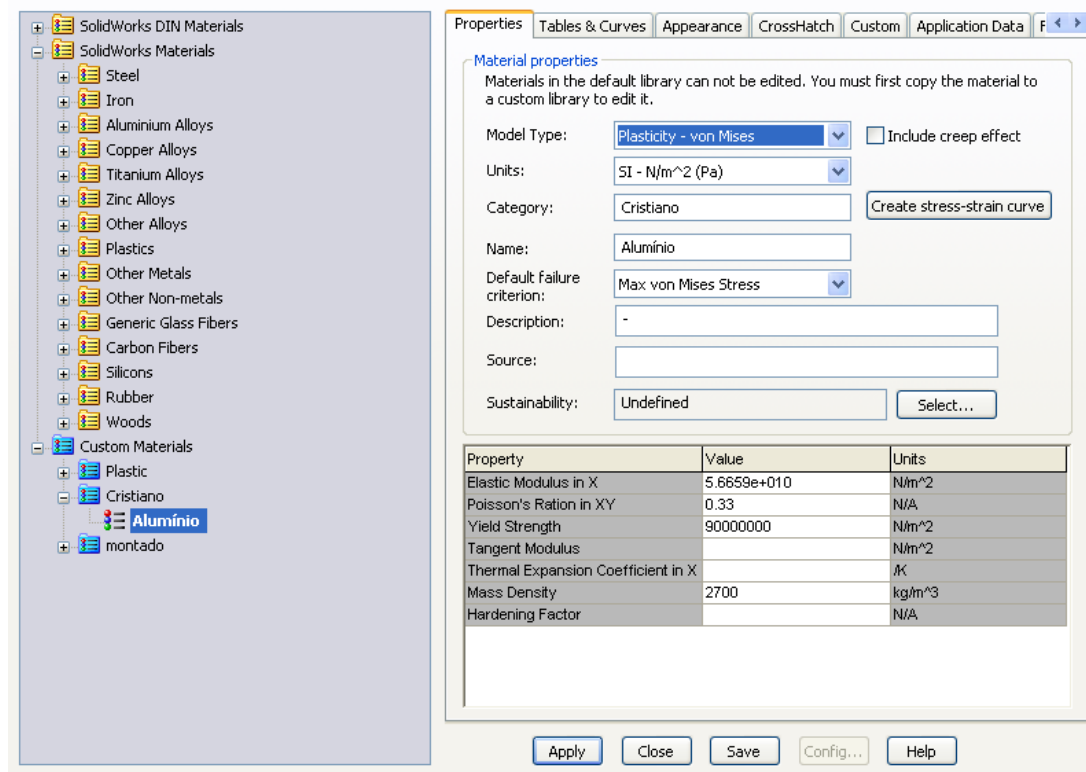


Figura A.15 – Caraterização do material da espuma

Após definidos os parâmetros do material, é inserida a curva tensão-extensão verdadeira do material desde a tensão de cedência até à rotura – figura a.16.

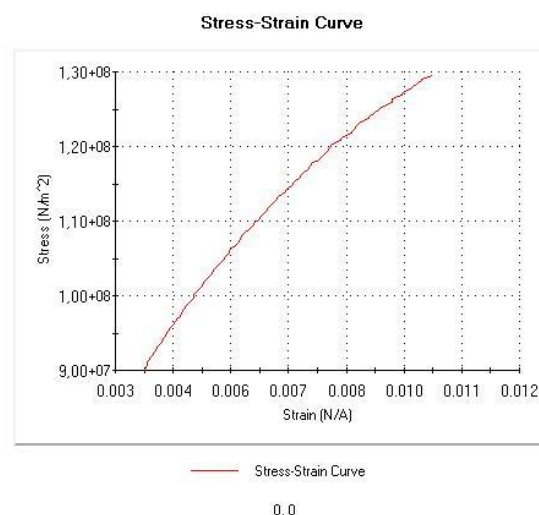


Figura A.16 – Curva tensão-extensão inserida no programa

Posteriormente é definido o material utilizado nos apoios. Este material deve ser inserido apenas com a opção de linearidade uma vez que não é admissível deformação plástica dos apoios. Neste caso concreto, foi escolhido um aço comum existente na biblioteca do *CosmosWorks* – figura a.17.

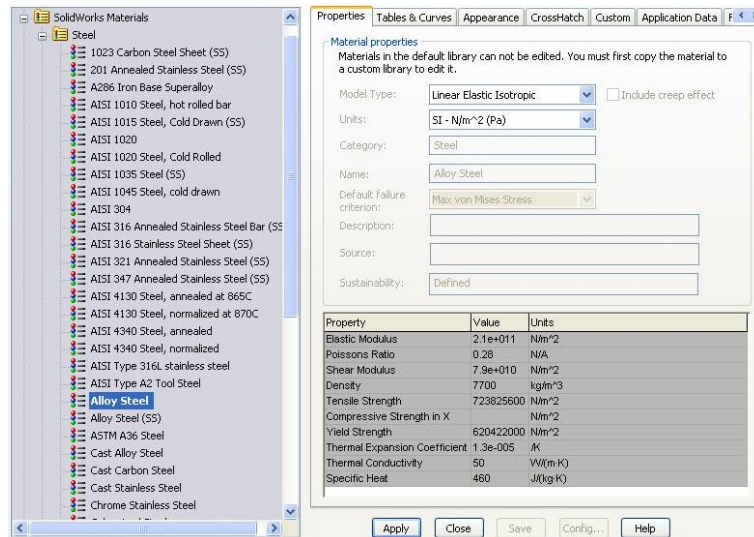


Figura A.17 – Escolha do material para os apoios utilizados no estudo

Após definidos os materiais dos componentes utilizados nos estudos, são definidas as condições de fronteira – figura a.18. Neste caso, foi escolhida a opção “*Fixed Geometry*” que corresponde a um encastramento.

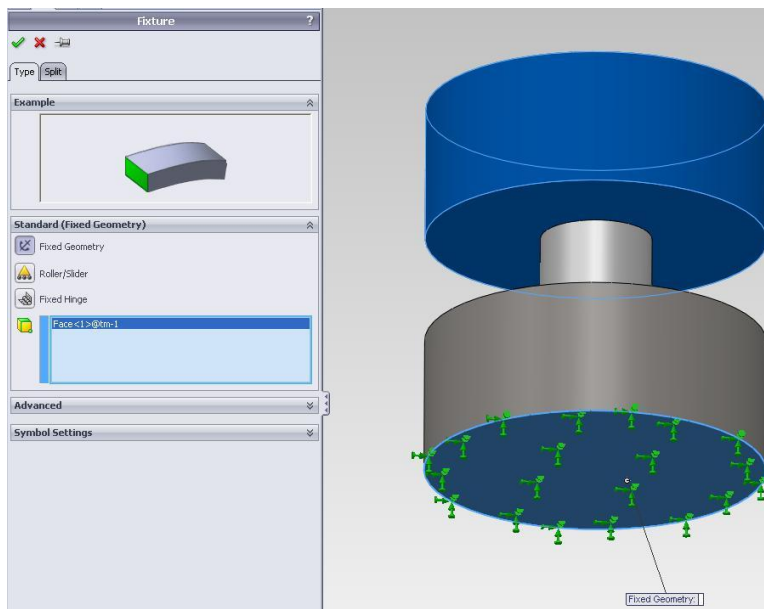


Figura A.18 – Aplicação das condições de fronteira

Foi aplicada uma carga uniforme no apoio superior com uma intensidade total de 2350 N, como é visível através da figura a.19.

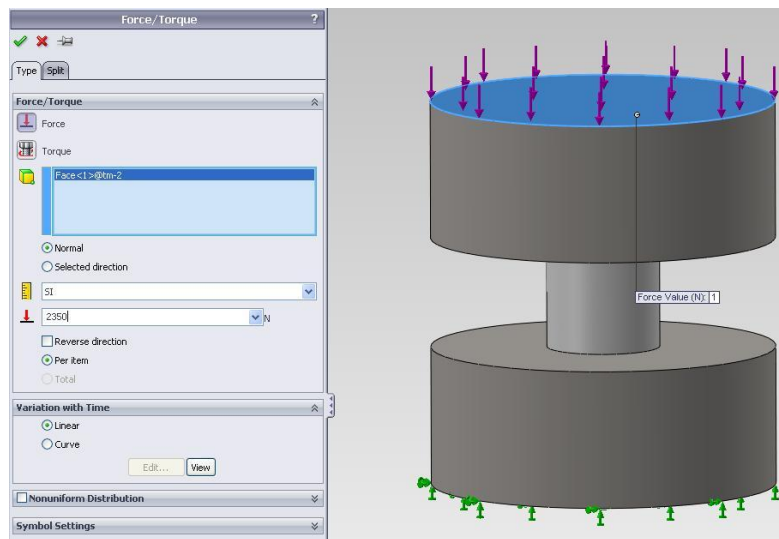


Figura A.19 – Aplicação da carga

Numa fase intermédia dos parâmetros do estudo, é definida a malha a utilizar. Neste caso, a malha foi gerada automaticamente pelo *software* – figura a.20.

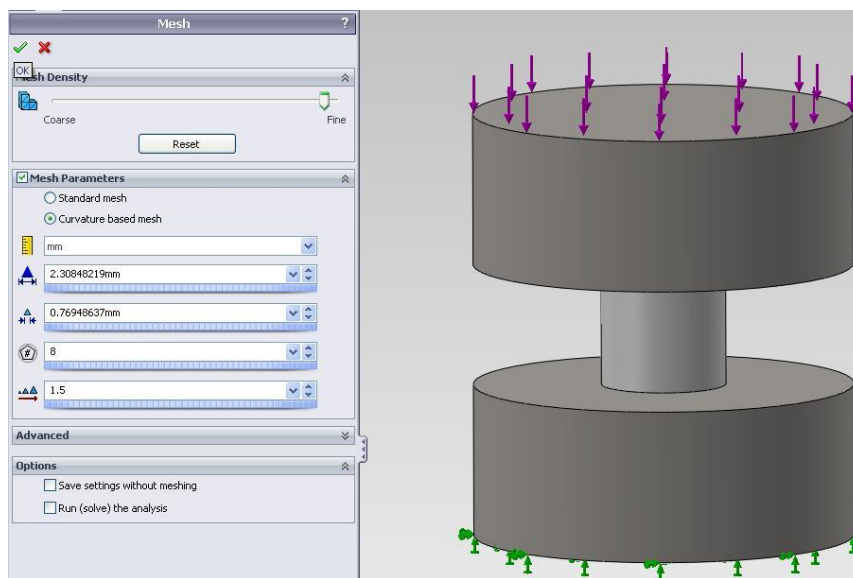


Figura A.20 – Parâmetros da malha gerados no programa

A malha obtida está representada na figura a.21.

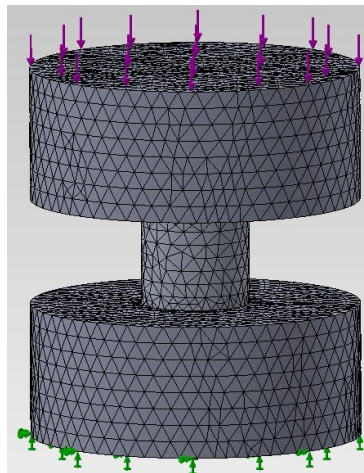


Figura A.21 – Malha gerada pelo software

Nas propriedades do estudo, é possível colocar o número de iterações pretendidas. Neste caso foram colocadas 50 iterações, o mesmo que foram colocadas no Ansys, como é visível na figura a.22.

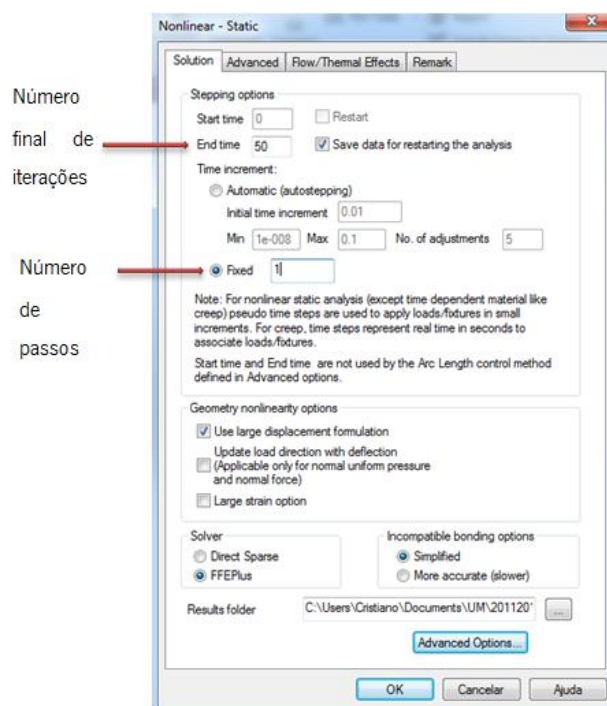


Figura A.22 – Inserção do número de iterações no *CosmosWorks*

Numa fase final dos parâmetros inseridos no estudo, deve ser ativada a opção de analisar todas as soluções em cada passo, para permitir retirar os pontos em cada iteração – figura a.23.



Figura A.23 – Ativação da opção da análise dos resultados em todos os passos

Após inseridos os parâmetros, a simulação é corrida e são obtidos os resultados. A figura a.24 mostra o deslocamento final existente no componente em estudo.

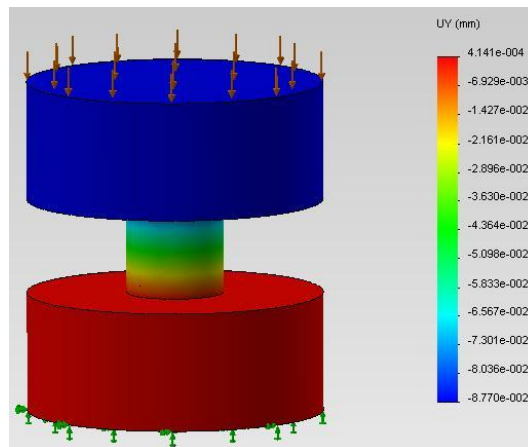


Figura A.24 – Deslocamento final do componente em estudo



É visível que o deslocamento está com valores negativos, explicada pelo sentido da medição da deslocamento (sentido oposto ao eixo dos  $y$ ).

Para determinar a deformação em cada passo da análise é necessário criar um novo “*Displacement Plot*” e seleccionar o número de cada passo em que se pretende retirar o valor – figura a.25.

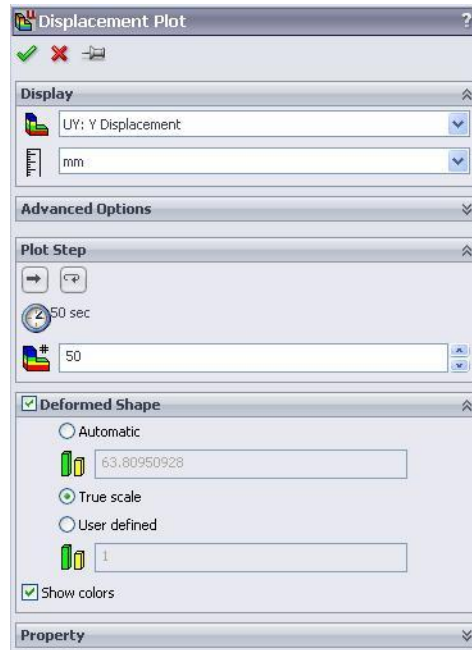


Figura A.25 – Inserir novo gráfico com a deslocamentoo medida em cada passo da análise

Para a força, tal como no deslocamento, é necessário criar um “*Displacement Plot*” e retirar o valor da “*Force Reaction*” para cada passo da solução – figura a.26.

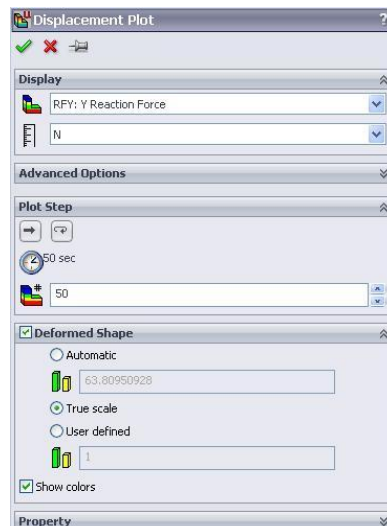


Figura A.26 – Inserir novo gráfico com a reacção da força medida em cada passo da análise

Através destes passos, é possível obter a curva carga-deslocamento pretendida na análise.



## **Anexo VI**

### Tutorial Ansys *Workbench*



Neste anexo são demonstrados os passos principais para uma análise estática não-linear no Ansys *Workbench*.

No menu inicial do Ansys *Workbench* (figura a.27), o operador escolhe o tipo de análise que pretende fazer em que o tipo de análise é apresentado na caixa “*Toolbox*” do lado esquerdo do ambiente de trabalho.

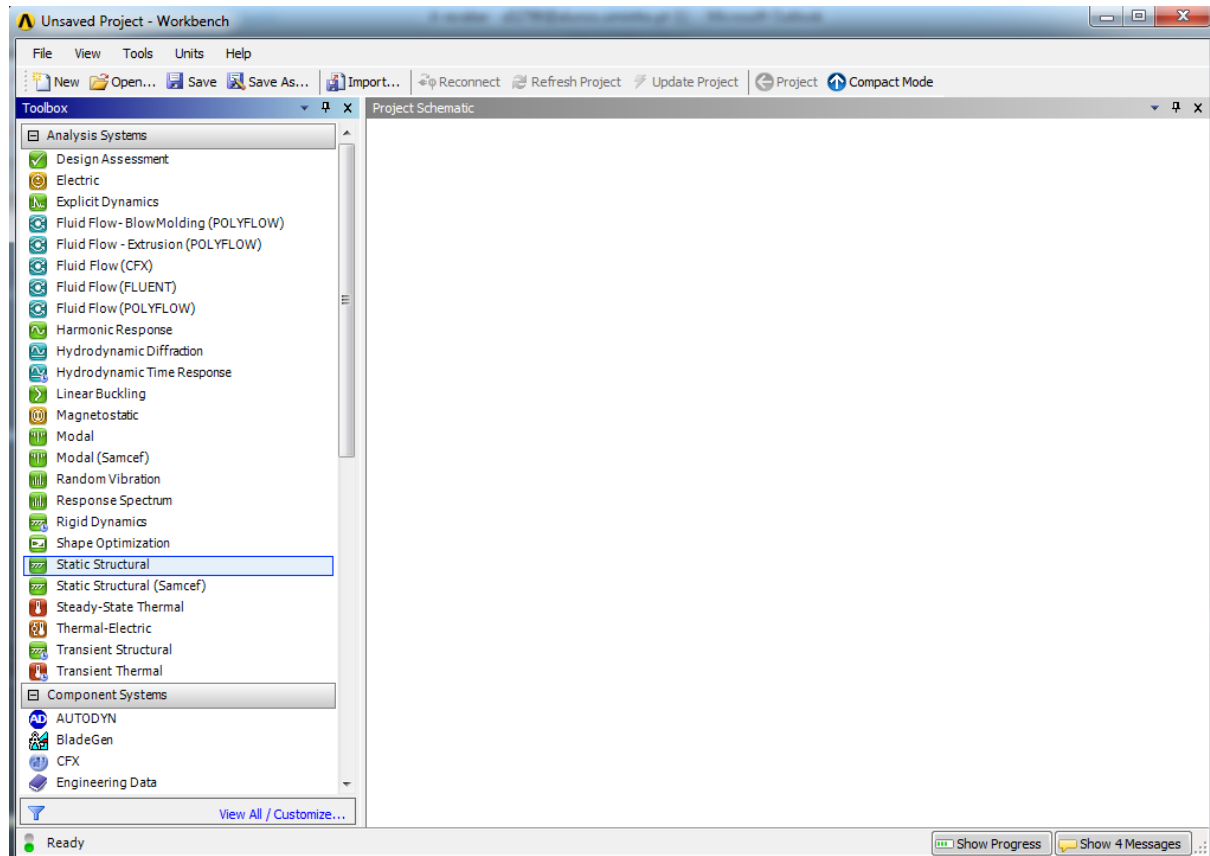


Figura A.27 – Ambiente de trabalho do Ansys *Workbench*

Clicando duas vezes na opção desejada, que neste caso é a “*Static Structural*”. Será aberta uma nova janela que permitirá colocar todos os passos da análise (figura a.28), que serão a especificação do material, geometria, tratamento do modelo e obtenção de resultados.

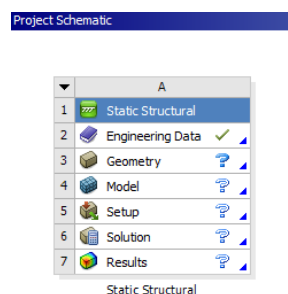


Figura A.28 – Janela do projeto

A primeira opção existente na janela do projeto é “*Engineering Data*” que é onde se escolhe o material ou conjunto de materiais a utilizar na análise. Efetuando um duplo clique nesta opção, será aberta a janela da figura a.29.

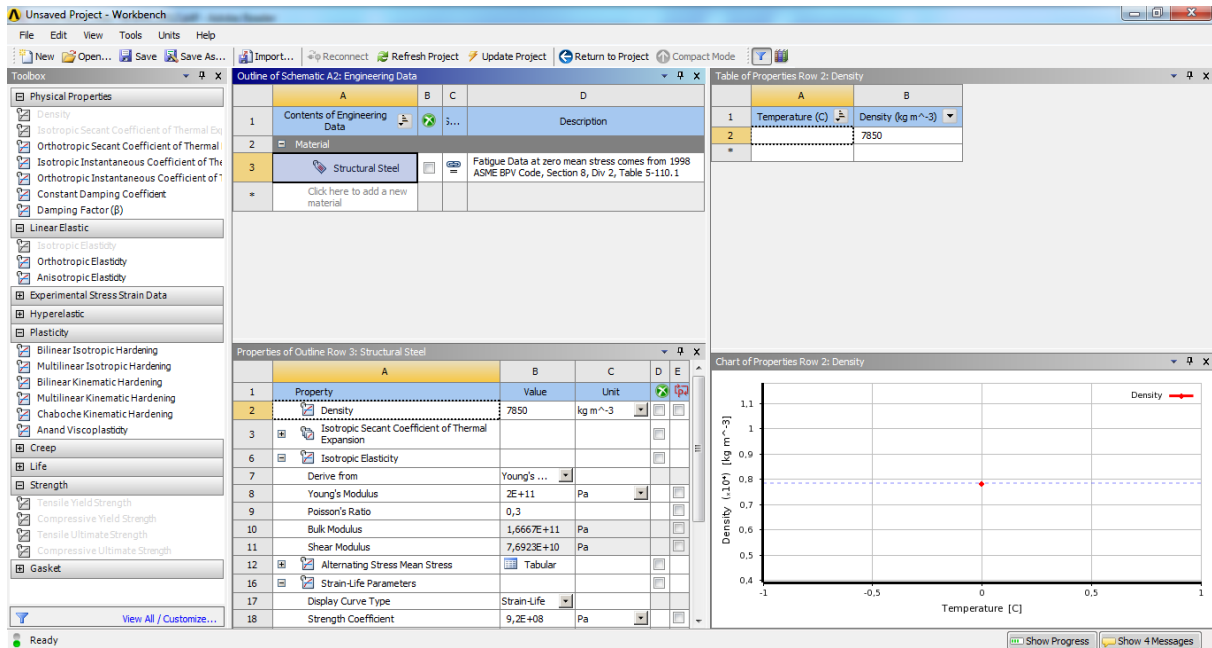


Figura A.29 – Janela de escolha dos materiais e de inserção das propriedades

A expansão dos materiais existentes na biblioteca do Ansys Workbench é efetuada através do botão representado na figura a.30.



Figura A.30 – Ícone de acesso à biblioteca (direita)

É, então, aberta uma nova janela com diversas secções para vários tipos de materiais, como é visível na figura a.31. Como se trata de uma análise elástico-plástica, a secção a consultar deve ser a “*General Non-linear Materials*”.

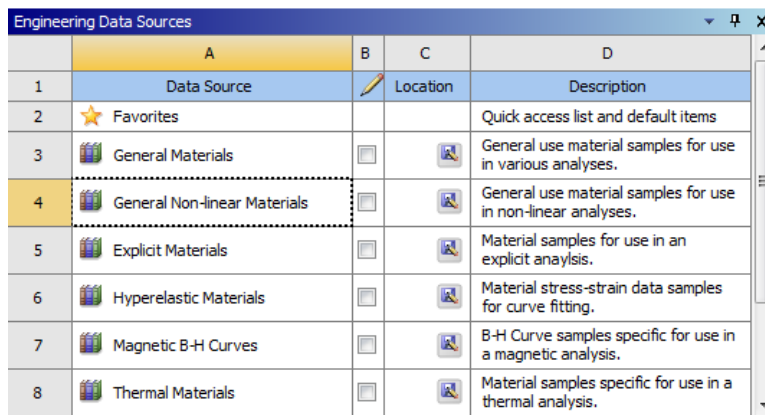


Figura A.31 – Lista de bibliotecas disponibilizadas pelo Ansys Workbench

Para criar um novo material, é necessário seleccionar a opção de modificação, clicando na caixa representada por um lápis existente em cada livreria. Será aberta, então, uma nova janela onde são listados todos os materiais dessa livreria e onde é possível adicionar novos materiais (figura a.32). Para utilizar um dos materiais disponibilizados pelo *software*, basta clicar no botão “+”, à frente do material desejado. Para criar um novo material é necessário clicar, no fundo da janela aparecerá uma opção “Click here to add a new material”.

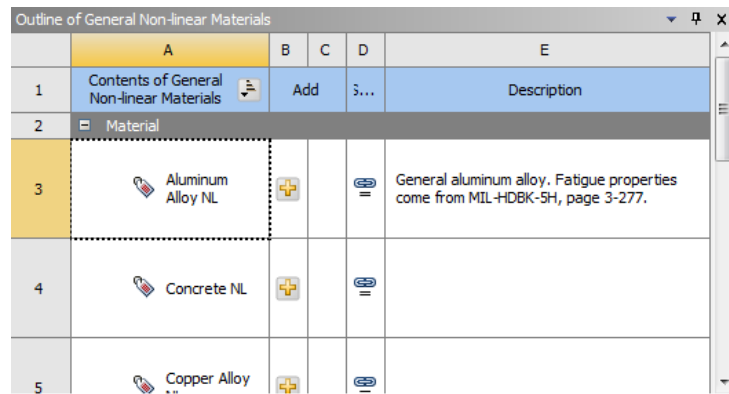


Figura A.32 – Listagem dos materiais existentes na livreria “General Non-linear Materials”

Depois de inserir o nome do novo material é necessário inserir as suas propriedades. O Ansys *Workbench* disponibiliza uma listagem com grande variedade de opções para caracterizar o material, como é visível através da figura a.33. Para este estudo, foram utilizadas as seguintes opções:

- “*Density*”: Define a densidade mássica do material;
- “*Isotropic Elasticity*”: Permite inserir o módulo de elasticidade e o coeficiente de *Poisson*;
- “*Multilinear Isotropic Hardening*”: Define a curva tensão-extensão real do material no domínio plástico;
- “*Tensile Yield Strength*”: Define a tensão de cedência;
- “*Tensile Ultimate Strength*”: Define a tensão de rotura.

Ao inserir os dados, é necessário ter em atenção as unidades das propriedades inseridas, pois terão bastante influência nas análises realizadas.

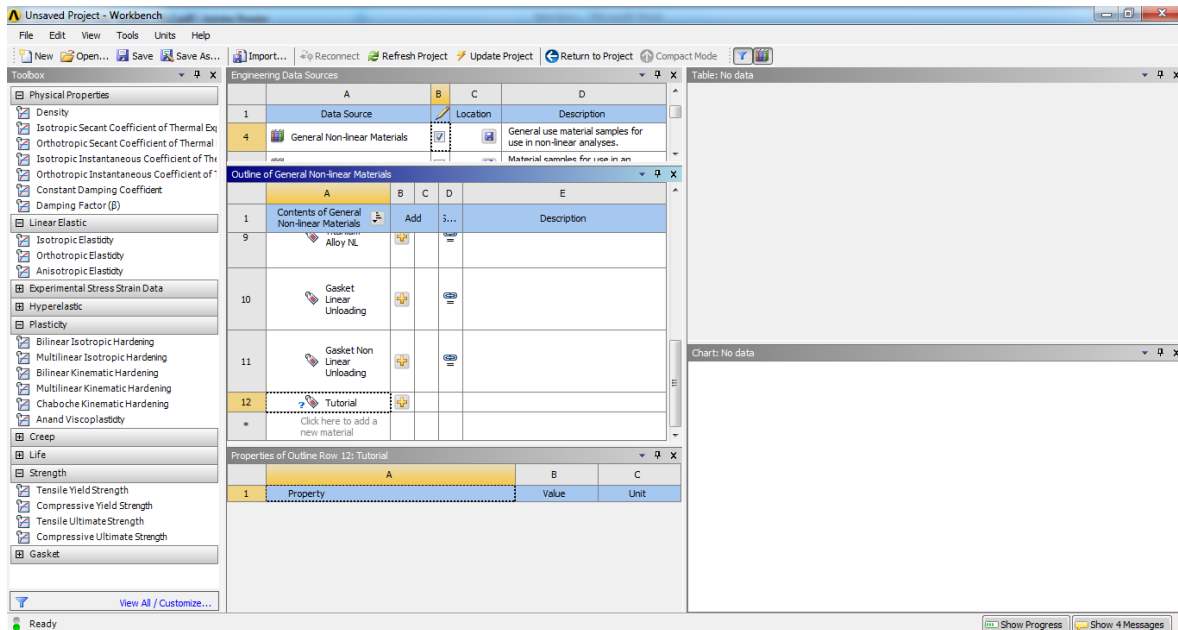


Figura A.33 – Inserir novo material no Ansys *Workbench*

Caso exista um erro ao inserir um material, aparecerá um ponto de interrogação do lado esquerdo do nome do material, como é visível na figura a.33.

Após todas as propriedades do material estarem definidas, basta clicar no botão “+” e gravá-lo na base de dados do Ansys, que será possível depois de retirada a seleção da caixa representada por um lápis mostrada na figura a.31.

Para sair da biblioteca de materiais do Ansys Workbench, deverá ser clicado no botão da figura a.34.

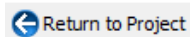


Figura A.34 – Botão que permite regressar ao ambiente de trabalho do Ansys *Workbench*

Após definido os materiais a utilizar nas análises, é necessário definir a geometria, clicando na opção “*Geometry*”. É aberta uma janela do “*DesignModeler*” do Ansys Workbench que permite ao utilizador desenhar os seus componentes ou exportar ficheiros de desenho externos.

Para desenhar nesta plataforma é obrigatório escolher o plano em que se pretende desenhar. Posteriormente são apresentadas as ferramentas de desenho disponibilizadas no Ansys *Workbench*, que estão listadas no separador “*Sketching*” (figura a.35).



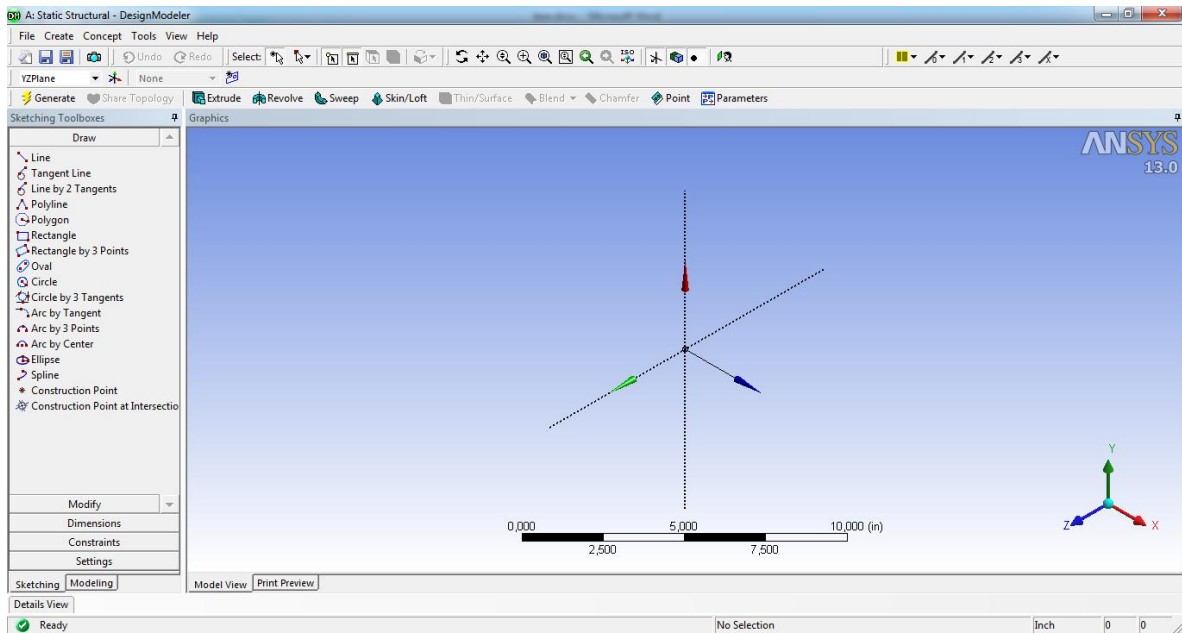


Figura A.35 – Ferramentas de desenho disponíveis no *DesignModeler*

Também é possível exportar geometrias diretamente de outras ferramentas CAD, como por exemplo, o *SolidWorks* ou o *Inventor*, caso o *Ansys Workbench* seja a versão 13 ou superior. Caso não seja possível exportar diretamente destas ferramentas CAD, é possível fazê-lo através de uma extensão “.step” ou “x\_b”. Contudo, caso seja importado um conjunto de peças, deve ser evitada a importação direta da ferramenta CAD, uma vez que provocará problemas para definir conexões. Os passos para exportar as geometrias estão visíveis na figura a.36.

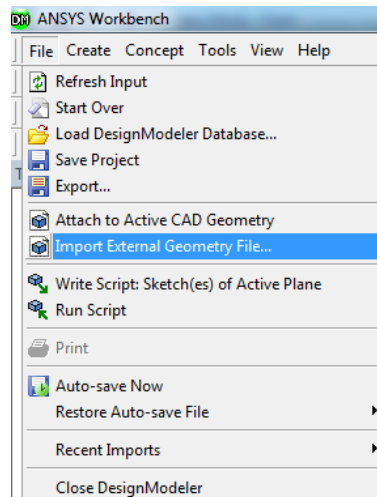


Figura A.36 – Passos para importar geometrias

Após importar a geometria e antes de gerá-la, é possível adicionar diversas opções que podem ser simplificações de geometria ou outro tipo de parâmetros da peça importada (figura a.37) através da opção “*Details View*” existente no canto inferior esquerdo.

Details View	
Details of Import2	
Import	Import2
Source	provete_ensaio_curva_aluminio....
Base Plane	XYPlane
Operation	Add Material
Process Solid Bodies	Yes
Process Surface Bodies	Yes
Process Line Bodies	No
Import Parameters?	Yes
Parameter Key	DS
Import Material Properties?	No
Import Coordinate Systems?	No
Import Attributes?	No
Import Named Selections?	No
Import Points?	No
Save Modified Part File?	No
Simplify Geometry?	No
Heal Bodies?	Yes
Clean Bodies?	Yes
Mixed Import Resolution	None

Figura A.37 – Janela de detalhes de geometria

Caso a geometria esteja de acordo com as especificações definidas pelo utilizado, é possível gerá-la clicando no botão “*Generate*” igual ao da figura a.38.

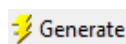


Figura A.38 – Ícone que permite gerar a geometria exportada

No final de gerar a peça, fecha-se a janela do “*DesignModeler*” e volta-se ao ambiente de trabalho do *Ansys Workbench*.

O próximo passo é clicar duas vezes na opção “*Model*” e será aberta a janela “*Multiphysics*”, como é visível através da figura a.39.

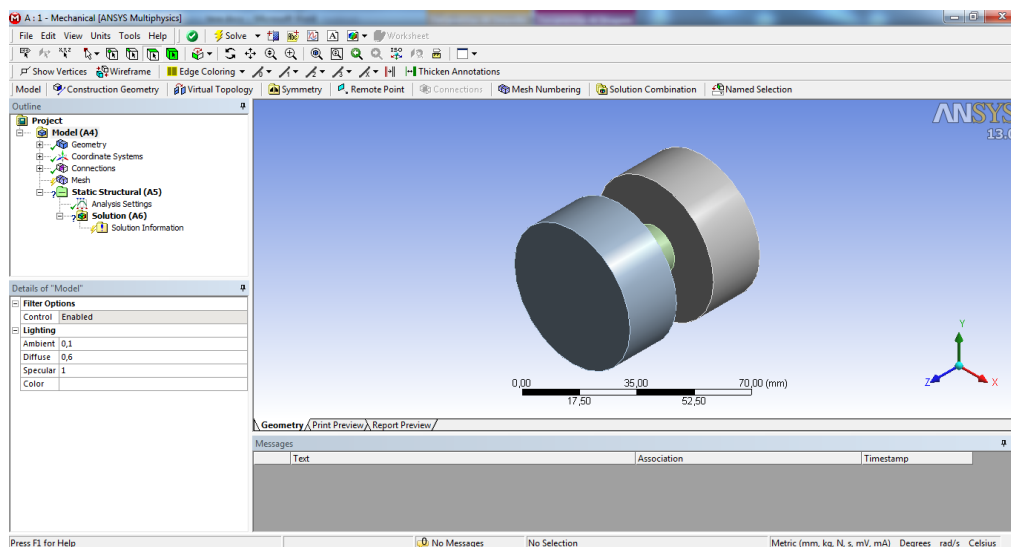


Figura A.39 – Aspetto geral da plataforma *Multiphysics* do *Ansys Workbench*

Uma breve referência para o botão “*Solve*” que é o botão que inicia a simulação. Será futuramente abordado.

Outra capacidade do Ansys *Workbench* é a de identificar diferentes componentes através da importação de um único ficheiro, uma vez que no desenho CAD os componentes foram montados separadamente e, numa fase posterior, foram montados.

Na parte esquerda da plataforma “*Multiphysics*” são separados todos os elementos que compõem a estrutura em análise e clicando em cada um deles irá abrir uma janela de detalhes abaixo da árvore de projetos (figura a.40).

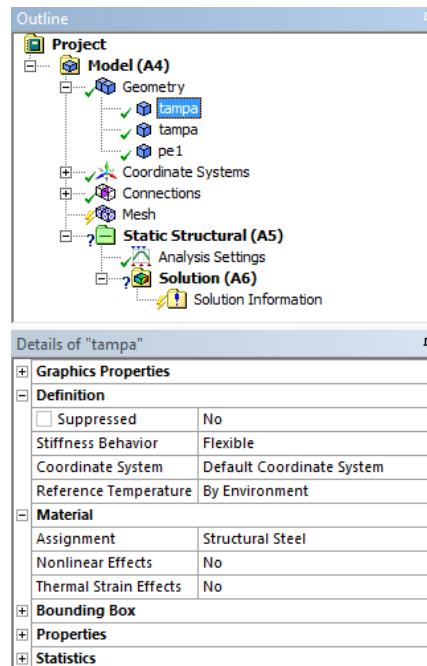


Figura A.40 – Janela com detalhes do conjunto de componentes em análise

A opção “*Assignment*” possibilita a troca de material e a opção “*Nonlinear Effects*” permite ativar ou desativar comportamentos não-lineares nos componentes da análise. É possível atribuir um material diferente a cada peça, sendo que para isso é obrigatório a escolha mais do que um material no primeiro passo.

Na secção “*Connections*” é possível definir o tipo de ligações existentes nos componentes do estudo, como é visível através da figura a.41.

Por defeito, o Ansys *Workbench* assume um tipo ligação, “*Bonded*”, que significa ligado. Em “*Type*” (figura a.41), é possível alterar o tipo de contacto em análise, assim como o seu comportamento em “*Behavior*” como simétrico ou assimétrico. Outros contactos existentes são o “*No Separation*” (sem separação), “*Frictionless*” (sem fricção), “*Rough*” (forte) e “*Frictional*” (com fricção). Nas opções avançadas poderão ser alteradas algumas propriedades da ligação ou do comportamento da ligação.

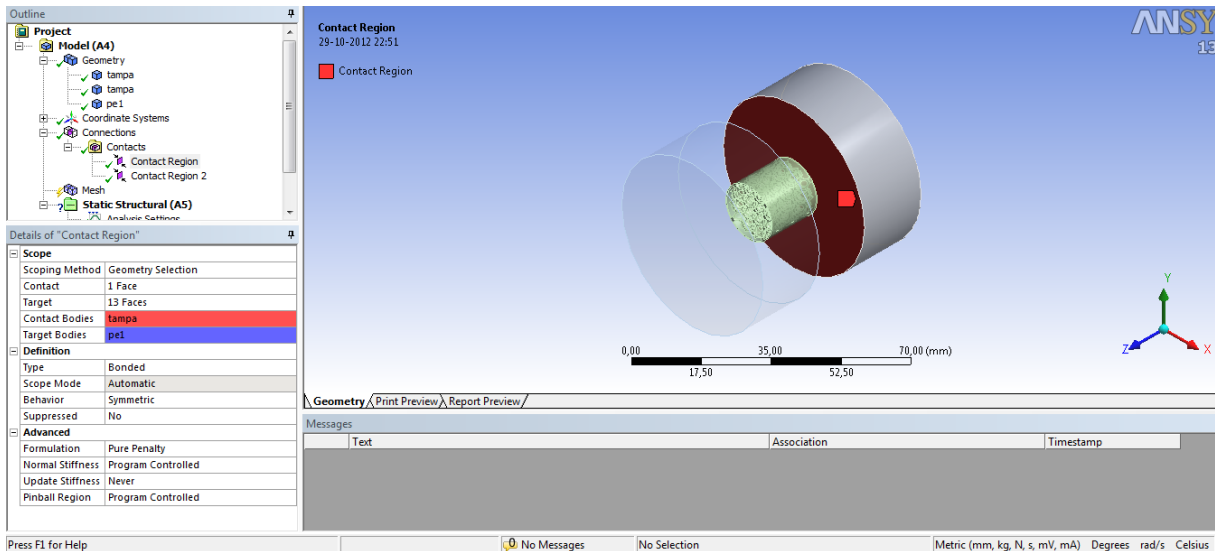


Figura A.41 – Janela com os detalhes da ligação

O passo seguinte é definir a malha, que é um dos passos mais importantes de um projeto. O Ansys *Workbench* é um *software* capaz de gerar uma boa malha com boa qualidade e sem grande necessidade de alterações. Ativando o botão “*Update*” o programa vai gerar uma malha que acha adequada à estrutura que pretendemos analisar, embora exista algumas situações em que não acontece.

Contudo, o operador pode alterar os parâmetros de malha. Na janela de detalhes (figura a.42), em “*Relevance*” é possível alterar a espessura da malha em que elementos com valores abaixo de 0 vão gerar uma malha com elementos mais espaçados enquanto que, no sentido oposto, obtém-se uma malha com elementos mais próximos.

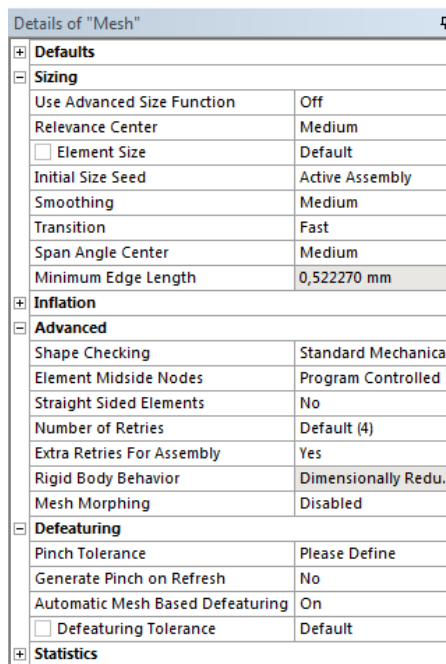


Figura A.42 – Detalhes da malha

É possível, também, especificar o tamanho dos elementos de malha através da opção “*Element Size*” na secção “*Sizing*”, bem como definir o tipo de malha pretendida, seja ela fina ou grosseira, na opção “*Relevance Center*”.

Para alterações mais profundas, o utilizador terá de adicionar um método a este parâmetro de análise, recorrendo à barra de tarefas, clicando na opção “*Mesh Control*” e seguidamente em “*Method*”. Nesta opção é possível escolher o tipo de elementos a utilizar, como triangulares (“*Tetrahedrons*”), quadrados (“*Hex Dominant*”) ou até mesmo elementos indicados para análise de elementos de casca (“*Sweep*”).

Após definida a malha, são inseridas todas as opções para iniciar o estudo estático não linear. Para ativar estudos não-lineares é obrigatório a ativação da opção “*Large Deflection*” no campo “*Analysis Settings*” (figura a.43).

Para determinar curvas, como por exemplo, a carga-deslocamento, é necessário escolher mais do que um passo par análises obtendo-se, desta forma, um número de pontos igual ao número de passos inseridos. Para colocar o número de passos, é necessário colocar a opção “*Auto Time Stepping*” em “*Step Controls*” em “*Off*” e definir o número de passos pretendidos em “*Number of Substeps*”.

Details of "Analysis Settings"	
[-] <b>Step Controls</b>	
Number Of Steps	50,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	Off
Define By	Substeps
Number Of Substeps	50,
[-] <b>Solver Controls</b>	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Large Deflection	On
Inertia Relief	Off
[+] <b>Restart Controls</b>	
[+] <b>Nonlinear Controls</b>	
[+] <b>Output Controls</b>	
[+] <b>Analysis Data Management</b>	
[+] <b>Visibility</b>	

Figura A.43 – Ativar da opção “*Large Deflection*”, inserir número de passos na análise e outros parâmetros para a análise

Para adicionar uma força no componente, o utilizador terá que clicar com o botão do lado direito do rato na opção “*Analysis Settings*”, “*Insert*” e escolher a opção “*Force*”. Em “*Magnitude*” é definido o valor da força, em “*Geometry*” é escolhida a(s) face(s) onde vai ser aplicada a carga e em “*Direction*” é definida a direção da força (figura a.44).

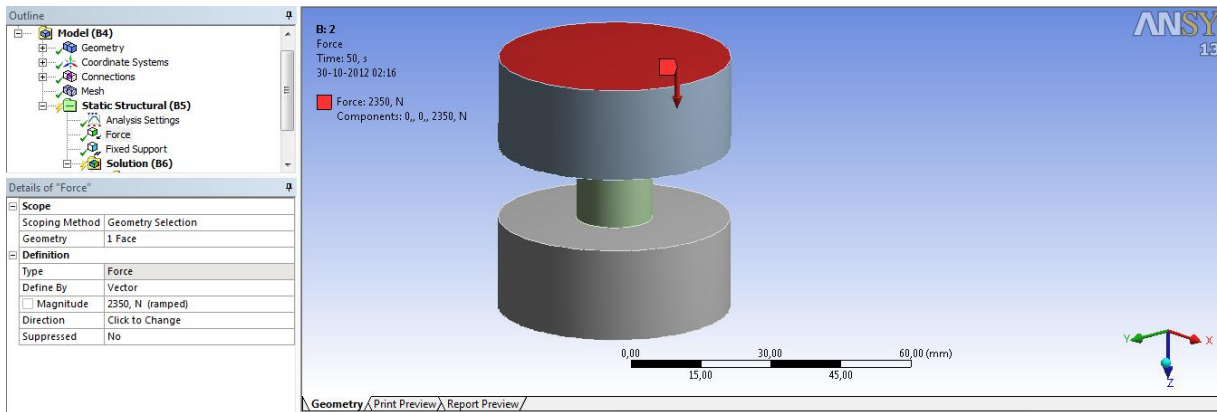


Figura A.44 – Aplicação da carga

É possível, também, aplicar a carga num eixo clicando na opção “*Defined By*” e mudar de “*Vector*” para “*Componentes*” e, posteriormente, colocar o valor da carga no eixo pretendido.

Para definir as condições de fronteira, tal como na força, o utilizador terá que clicar com o botão do lado direito do rato na opção “*Analysis Settings*”, “*Insert*” e escolher uma opção das apresentadas na figura a.45.

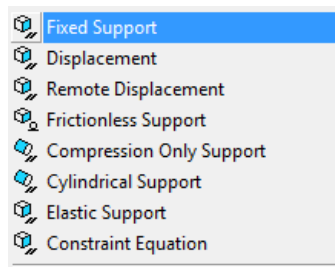


Figura A.45 – Escolha das condições de fronteira

Ao aplicar a opção “*Fixed Support*” numa determinada face de uma estrutura, essa face não terá qualquer grau de liberdade (figura a.46). Para escolher a face para aplicar as condições de fronteira, o utilizador deverá clicar na opção “*Geometry*” e escolher a respetiva face.

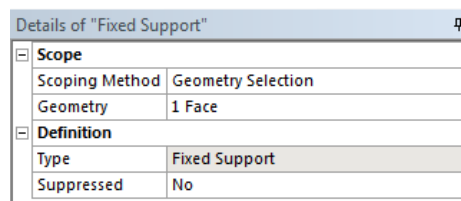


Figura A.46 – Detalhes da opção “*Fixed Support*”

Quanto à opção “*Remote Displacement*” permite retirar deslocamentos em determinados eixos (figura a.47).

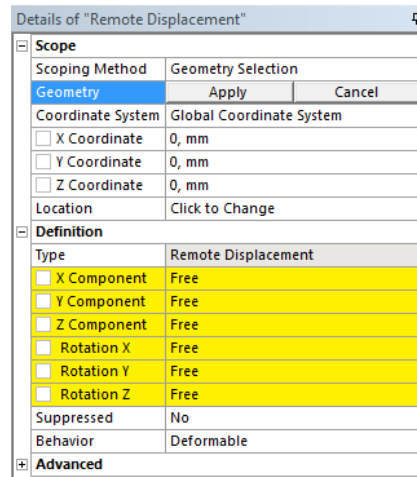


Figura A.47 – Detalhes da opção “Remote Displacement”

A escolha da face é realizada da mesma forma que na opção anterior. Para retirar o deslocamento pretendido, a opção “Free” existente em cada grau de liberdade deverá ser alterada para “Constant”. Finalmente, são escolhidos os tipos de resultados que pretendemos obter no ensaio. Clicando com o botão do lado direito do rato em “Solution” aparecem diversas opções, como representadas na figura a.48.

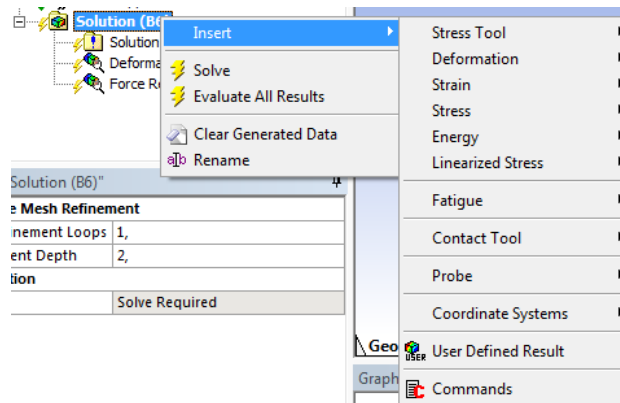


Figura A.48 – Escolha do tipo de soluções

É possível escolher o tipo de estudo: Deslocamento (“Deformation”), Extensões (“Strain”) e Tensões (“Stress”).

Para permitir resultados mais precisos é utilizada a opção “Probe” para cada parâmetro a estudar (figura a.49).

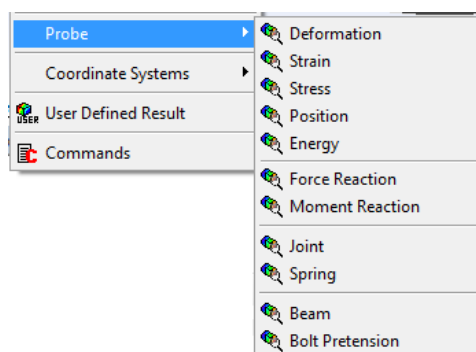


Figura A.49 – Ativar a opção “Probe”

Foi escolhida, então, “*Deformation*” na opção “*Probe*” (figura a.50) em que é escolhida a face onde é pretendida a medição da deslocação (normalmente é na face onde é aplicada a carga) e selecionado o eixo em que é pretendida a medição de resultados em “*Options*” e “*Result Selection*”.

Details of "Deformation Probe"	
<b>Definition</b>	
Type	Deformation
Location Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Orientation	Global Coordinate System
<b>Options</b>	
Result Selection	Z Axis
Display Time	End Time
Spatial Resolution	Use Maximum
<b>Results</b>	
<b>Maximum Value Over Time</b>	
<input type="checkbox"/> Z Axis	8,7418e-002 mm
<b>Minimum Value Over Time</b>	
<input type="checkbox"/> Z Axis	5,9467e-004 mm
<b>Information</b>	

Figura A.50 – Detalhes da opção “*Deformation Probe*”

Para permitir determinar a curva carga-deslocamento falta retirar os valores da carga. Para tal, é utilizada a opção “*Force Reaction*” existente em “*Probe*”. Normalmente a face escolhida para medir a reação da força é a face onde é aplicada o suporte fixo. A escolha do eixo para retirar os resultados é efetuada da mesma forma que no caso anterior – figura a.51.

Details of "Force Reaction 2"	
<b>Definition</b>	
Type	Force Reaction
Location Method	Boundary Condition
Boundary Condition	Fixed Support
Orientation	Global Coordinate System
<b>Options</b>	
Result Selection	Z Axis
Display Time	End Time
<b>Results</b>	
<b>Maximum Value Over Time</b>	
<input type="checkbox"/> Z Axis	-46, N
<b>Minimum Value Over Time</b>	
<input type="checkbox"/> Z Axis	-2300, N
<b>Information</b>	

Figura A.51 – Detalhes da opção “*Force Reaction*”

Após todos estes passos, é possível arrancar com a simulação clicando no botão “*Solve*” (figura a.52).

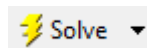


Figura A.52 – Botão “*Solve*”

Enquanto a simulação está a correr, é possível acompanhar os cálculos efetuados pelo programa, clicando na opção “*Solution Information*” – figura a.53.



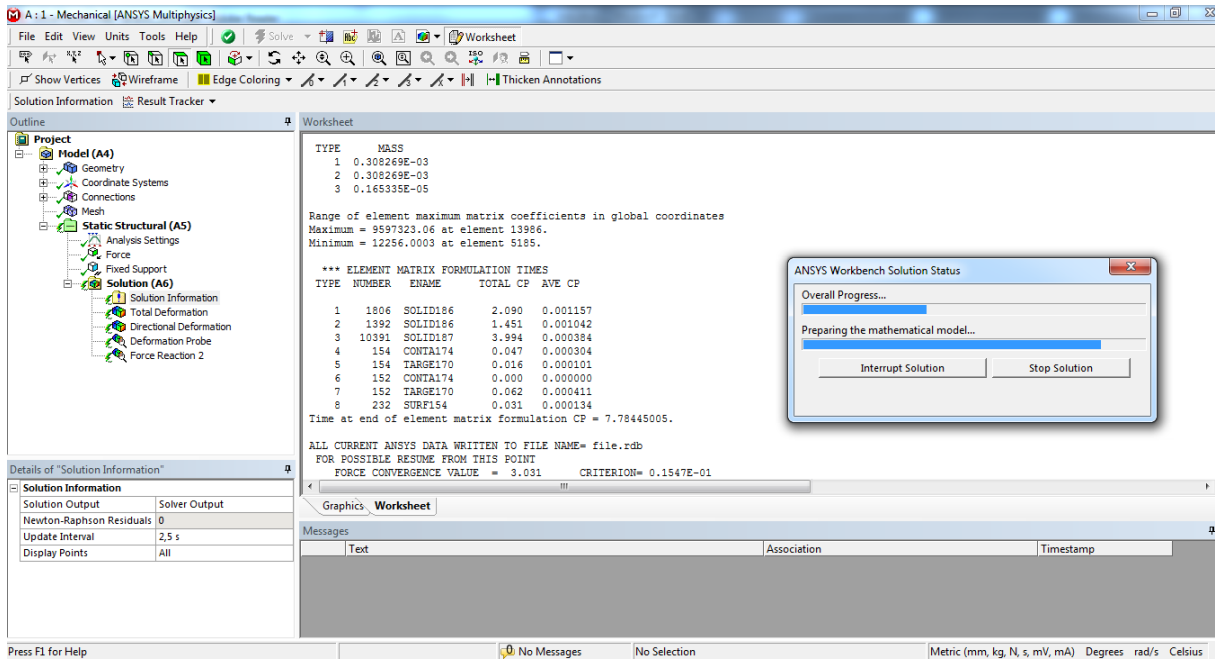


Figura A.53 – Janela de informação do ensaio em decurso

Outra informação disponibilizada pelo *software* durante o cálculo das iterações é o gráfico de convergência da força, que pode ser exibido alterando a opção “*Solution Output*” para “*Force Convergence*”. Para obter uma solução válida, a linha roxa (força convergente) tem de se manter abaixo da linha azul (força critério), em cada iteração (figura a.54).

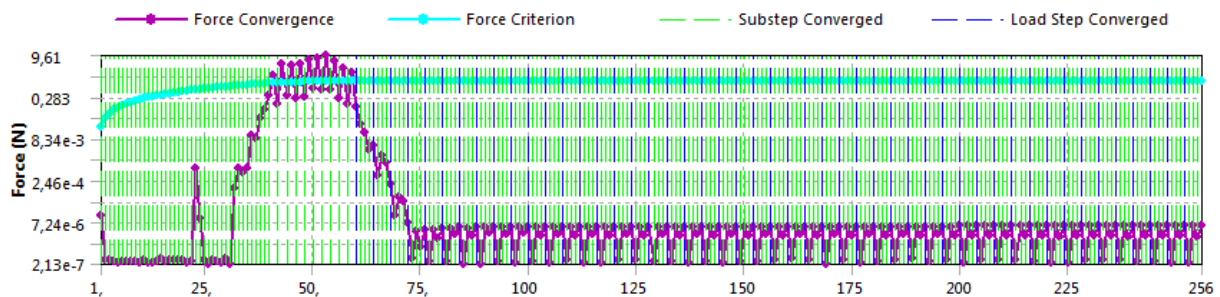


Figura A.54 – Comportamento da convergência da força

Terminado o ensaio, resta-nos recolher os resultados obtidos. Abaixo da janela onde a nossa peça se encontra, temos uma série de separadores onde está distribuída a informação. Em “*Tabular Data*” podemos ler as deformações da estrutura ao longo dos passos definidos para o ensaio (figura a.55). Em “*Graph*” temos a representação gráfica do comportamento dos valores de deslocamento. Estes dados diferem consoante o “*Probe*” ou tipo de teste que tivermos selecionado na árvore de passos.

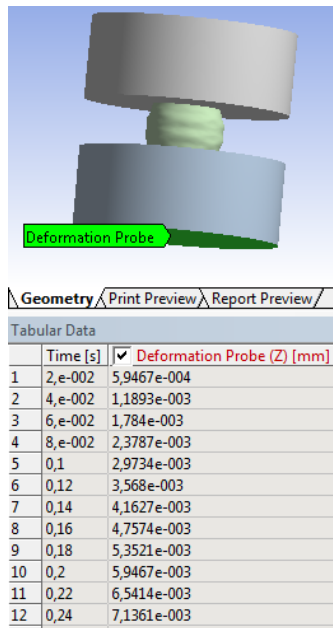


Figura A.55 – Valores obtidos, para cada passo, na opção “*Deformation Probe*”

É possível exportar os dados para uma folha de cálculo do Microsoft Excel, clicando nos valores com o botão do lado direito do rato e na opção “*Export*” (figura a.56).

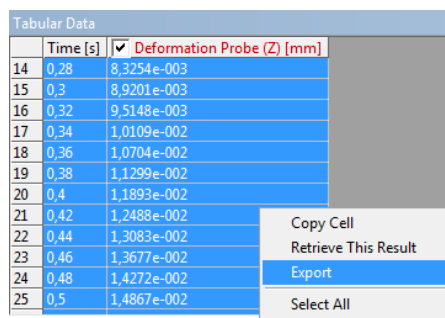


Figura A.56 – Exportação dos dados

O erro mais comum que apareceu durante as várias tentativas de análise foi:

*“The solver engine was unable to converge on a solution of a nonlinear problem.”*

Para resolver este problema, caso apareça, o operador deverá verificar se a carga aplicada é de um valor razoável ou verificar se a malha não é demasiado grosseira, principalmente na zona dos contactos.

## **Anexo VII**

Artigo



# ELASTIC-PLASTIC BEHAVIOR OF METALLIC FOAMS

C. Carvalho, N. Peixinho

Department of Mechanical Engineering, University of Minho, Campus of Azurém,  
4800-058 Guimarães, Portugal

a52790@alunos.uminho.pt (corresponding author), peixinho@dem.uminho.pt

**Keywords:** *Elastic-plastic, Metallic foams, Aluminum, strain energy, stiffness.*

**Abstract.** *This study analysis the behavior of metal foams in compression through a experimental study. It was tested two types of metal foams, with and without wall and it was analyzed the stiffness and the absorption strain energy of metal foams. The characterization of this material is very important since, because of its excellent relationship weight-density may be used in components subject to impact or compression efforts*

## 1. Introduction

Metallic foams emerge as a new range of materials with great potential due to its excellent strength-density ratio which shows a great potential in the development, conception and production of parts and components for the transport industry, such as the automobile sector. In this industry its high absorption capacity and its low energy density increase the passive safety and reduce fuel consumption of vehicles, respectively. [1]

Reducing vehicle weight is a major factor in the transport industry since with its decrease fuel consumption also decreases. However, the decrease in vehicle weight cannot reduce passenger safety meaning that the materials used in the manufacturing thereof cannot interfere with the safety of the vehicle. Thus, it is important to correctly determine the behavior and properties of materials to be used in vehicles. [2]

Due to its low density, high strength and excellent energy absorption in compression, the use of metal foams in requests impact has increased in order to increase the passive safety. Due to this excellent performance, there is need for continuous improvement and to refine their manufacturing processes and production, in addition to the need to characterize mechanically. [3]

The metal foams can be distinguished in two ways as to its cellular structure - open or closed (figure 1). The mechanical characteristics and the type of application alter depending on the structure type of metal foams.

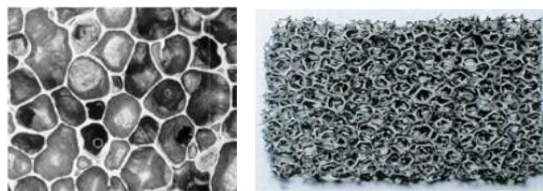


Figure 1 – Metal foams with: a) Closed cell b) Open Cell [4]

The mechanical behavior of metal foams depends on the structure of cells, density and properties of the base material they are made. The efficiency obtained in the use of metallic foams in structural applications requires a detailed characterization of its

deformation behavior for different loads and different geometries. The size and shape of the cells or pores determine their properties, namely their behavior depends on how the solid is distributed in the porous structure. [5]

There are several ways to manufacture metal foams. Some techniques using processes identical to polymeric foams, others use novel techniques taking advantage of the characteristic properties of metals. Depending on the manufacturing process the type of structure, application and mechanical behavior of the metal foams differ. Figure 2 shows some manufacturing processes of metal foams. [1]

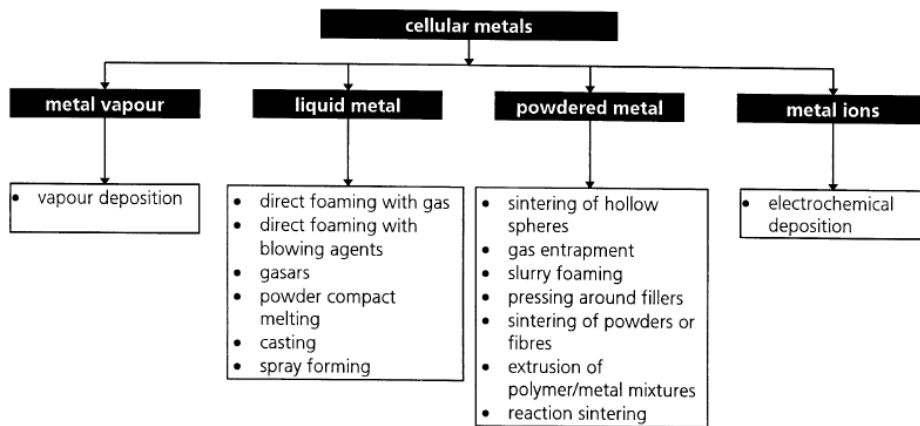


Figure 2 – Most important manufacturing process of metal foams [1]

Although the relative density is the most dominant factor in determining the behavior and resistance of a metal foam, other parameters such as compression, distribution and configuration of the cells also have great influence on the mechanical behavior. *Kou et al [6]* propose two types of open-cell foams that are uniform cells and dual-size. Uniform cell metal foam, they have a spherical shape and closely compact. It is assumed that the cellular structure has a face-centered cubic arrangement. Dual-size foams have fillers forming a secondary link that is disposed in voids existing in uniform foam. [6]

The distance between two adjacent centers of large fillers is  $a$ , the radius of large fillers and secondary fillers are  $R$  and  $r$ , respectively. [6]

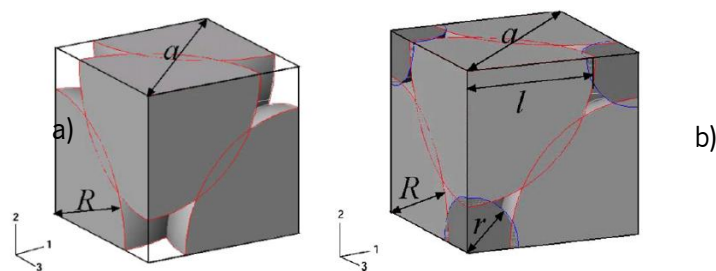


Figure 3 – Compacted structures of fillers in open-cell arrangements: a) uniform-size structure b) dual-size structure [6]

According to the authors, the behavior of foams with dual-size structures is improve regarding uniform structures. It is found that the yield strength of a foam cell structure with dual-size is considerably higher than foam with uniform cell structure for an equivalent density. Regarding the rigidity, this increases as the ratio of the radius of the wide fillers and secondary. [6]

## 1. Experimental procedure

The objective of this project is to study the behavior in compression of two types of open-cell aluminum foams: uniform cell and dual-size cell.

Compression tests are performed to study aluminum foams with and without wall (the wall has 0,4 mm thickness). Through the load-displacement curves obtained in the experimental tests of aluminum foams are analyzed stiffness, specific stiffness, strain energy and specific strain energy of the foams and the results are compared.

Figure 4 shows the metal foam with uniform cells used in the study. Where the distance between two adjacent centers of large fillers,  $a$ , in this case are 1,38 mm and the radius of large fillers,  $R$ , are 7,5 mm.

The metal foam with dual-size cells used in the study is shown in figure 5 where, for this metal foam,  $a$  are 3,71 mm,  $R$  are 2 mm and  $r$  (the radius secondary fillers) are 0,85 mm.

These metal foams are manufactured by a process of investment casting.

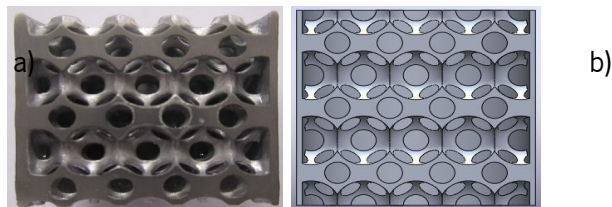


Figure 4 – Model of the aluminum foam of uniform cells: a) Real b) CAD

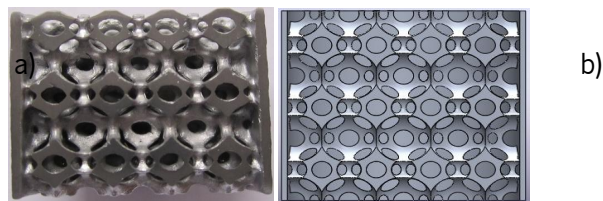


Figure 5 – Model of the aluminum foam of dual-size cells: a) Real b) CAD

The metal foams have been experimentally tested in compression on *Instron 8870 servo-hydraulic machine*. To be able to perform the test, two steel plates at the ends of the foams as is visible in figure 6. Also, compression tests were made to the metal foams without the outer wall, using the fixation system presented previously.



Figure 6 – Disposition of uniform metal foam in compression test

## 2. Results and discussion

The curves obtained in the experimental tests of metal foams are load-displacement. For the metal foams tested with the outer wall the results are shown in figure 7.

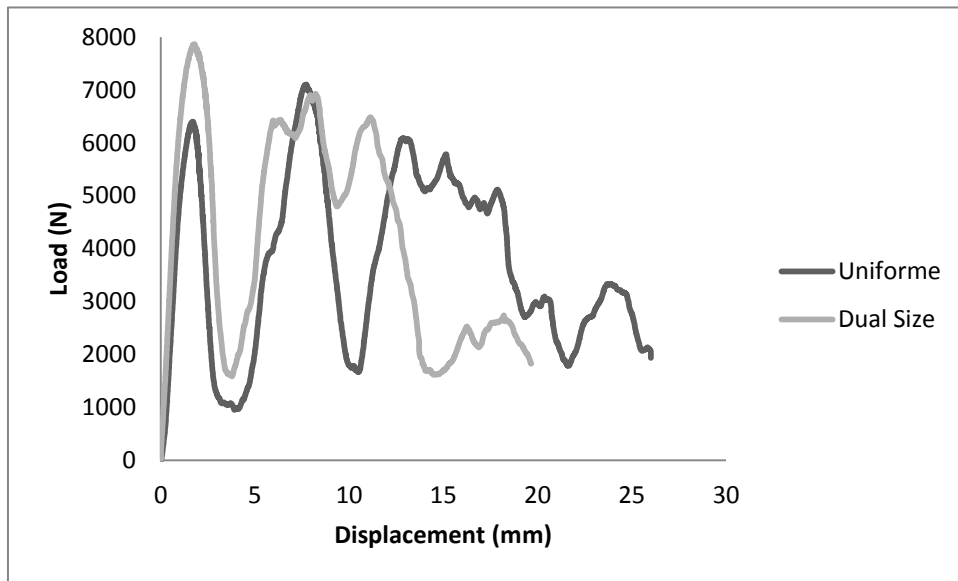


Figure 7 – Load-displacement curves for aluminum foams of uniform and dual-size cells with wall

It is observed that the aluminum foam with dual-size cells supports greater loads, to the same strain, than the uniform cells, which shows greater stiffness.

However, these metal foams have plaster inside them resulting from the casting process which influenced the results. To solve these problem, was removed the outer wall from metal foams and were carried new experimental tests to metal foams without the outer wall.

The results obtained in aluminum foams of uniform cells are shown in figure 8.

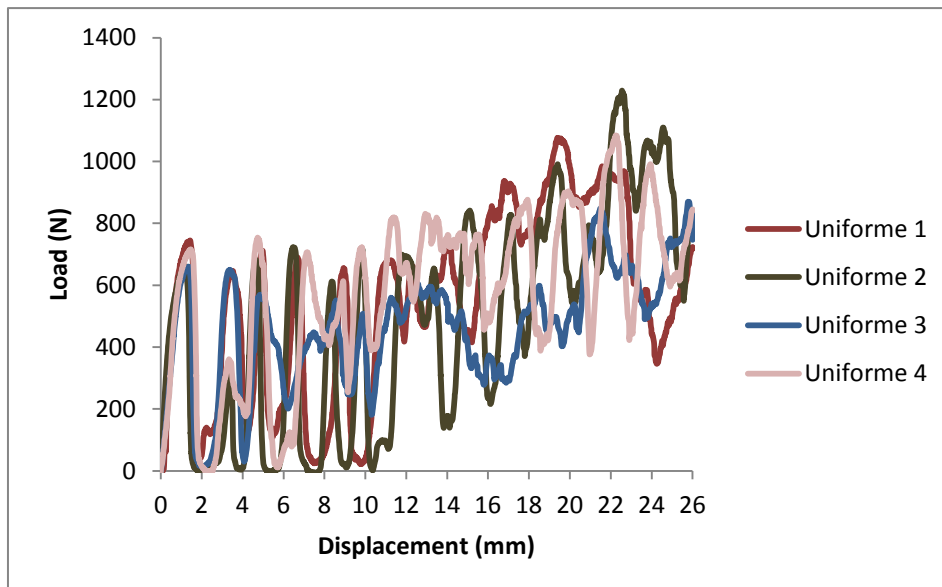


Figure 8 – Load-displacement curves for aluminum foams of uniform cells without wall

For aluminum foams of dual-size cells, the results obtained are showed in figure 9.



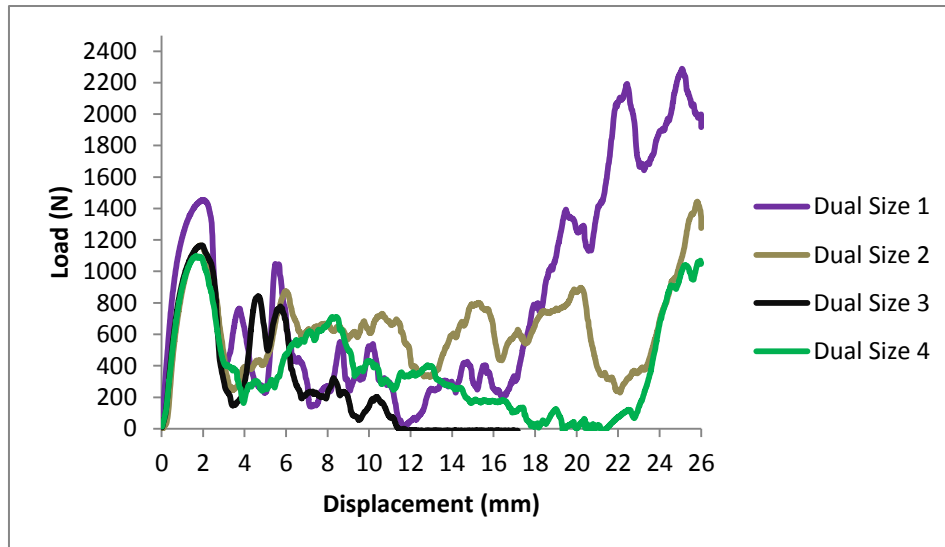


Figure 9 – Load-displacement curves for aluminum foams of dual-size cells without wall

Through the load-displacement curves it is possible to determine the stiffness of the components under analysis.

The stiffness of a material,  $\kappa$ , is the capacity of an solid element or structural element have to support efforts without acquiring large deformations or displacements and is defined by the slope of the linear load-displacement curve. This is expressed by the equation 1.

$$\kappa = \frac{P}{\delta} \quad (1)$$

Where  $P$  is load and  $\delta$  is displacement. The results obtained to stiffness and specific stiffness are presented in table 1.

Table 1 – Values of stiffness and specific stiffness for aluminum foams with and without outer wall

	<b>Metal foam</b>	<b>Stiffness (N/m)</b>	<b>Specific stiffness (N/m<sup>g</sup>)</b>
With wall	Uniform	$6 \times 10^6$	$1,46 \times 10^6$
	Dual-size	$7 \times 10^6$	$1,84 \times 10^6$
Without wall	Uniform 1	$1,18 \times 10^6$	$5,62 \times 10^5$
	Uniform 2	$1,1 \times 10^6$	$5,24 \times 10^5$
	Uniform 3	$7 \times 10^5$	$3,33 \times 10^5$
	Uniform 4	$8 \times 10^5$	$3,81 \times 10^5$
	Dual-Size 1	$1,5 \times 10^6$	$9,38 \times 10^5$
	Dual-Size 2	$1,23 \times 10^6$	$7,69 \times 10^5$
	Dual-Size 3	$1,32 \times 10^6$	$8,25 \times 10^5$
	Dual-Size 4	$1,23 \times 10^6$	$7,69 \times 10^5$

It is apparent that the values of stiffness obtained in the experimental tests performed without wall foams are relatively close. As for the difference between the stiffness obtained dual-size foams and uniform foams there is, as was expected, a higher stiffness of dual-size. However, this difference is greater for foams with wall than without wall. To better quantify the difference in stiffness values of the foam shall be determined the stiffness per unit mass (equation 2).

$$\dot{\kappa} = \frac{\kappa}{m} \quad (2)$$

The mass was determined by the density of aluminum is 2.7 g/cm<sup>3</sup>. As shown, the dual-size metal foam has a greater stiffness than the metal foam of uniform cells which demonstrates that using of the first is lighter structures can be obtained for the same kind of loading.

The strain energy,  $U$ , is the energy expended by the action of external forces on the deformation, i.e. the deformation energy corresponding to the work done by a load  $P$  is applied on a given structure. Graphically, the strain energy is the area that lies below the load-displacement curve of the metal foam. The results of strain energy and specific strain energy are shown in table 2.

Table 2 – Values of strain energy and specific strain energy for aluminum foams with and without outer wall

	<b>Metal foam</b>	<b>Energy (J)</b>	<b>Specific Energy (J/g)</b>
With wall	Uniform	41,2	10,1
	Dual-size	22,5	5,9
Without wall	Uniform 1	5,1	2,4
	Uniform 2	3,8	1,8
	Uniform 3	4,1	1,95
	Uniform 4	5,2	2,5
	Dual-Size 1	5,4	3,33
	Dual-Size 2	6,3	3,9
	Dual-Size 3	2,6	1,6
	Dual-Size 4	3,8	2,5

It appears that the dual-size aluminum foam has more capacity of absorption strain energy than uniform aluminum foam. Also, the stiffness of dual-size aluminum foam is greater than uniform aluminum foam.

### 3. Conclusions

The aluminum selected for the manufacture of these metallic foams was not the most adequate since in its constitution silicon exists in large amounts (between 11 and 14%). As this alloying element decreases the ductility of the material, the choice was not the most appropriate.

The extraction of the outer wall of aluminum foam allowed removing the plaster from the interior of these. In this way more reliable experimental tests were performed at aluminum foams.

The results obtained show that the aluminum foam with dual-size cells has a better behavior than uniform, to compressive loads, since the stiffness and strain energy of this foam are greater than the uniform. For a better comparison between the values of stiffness and strain energy, the specific values were calculated and were found a significant gain in the behavior of dual-size foam. For the foam without aluminum wall there was a 34% gain in stiffness, 76% in specific stiffness, 22% in strain energy and 66% in specific strain energy.

It appears that through of aluminum foams with dual-size cells structures it is possible to obtain lighter components for the same load than using uniform cells. This is quite important in applications such as transportation, in which weight reduction is a preponderant factor.

## References

1. *Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams.* Banhart, John. Bremen, Germany : Pergamon, 2000.
2. *Partition energy absorption of axially crushed aluminum foam-filled hat sections.* Song, Hong-Wei, et al. China : ScienceDirect, 2004.
3. *Metallic foams: challenges and opportunities.* Banhart, John. Germany : s.n., 2000.
4. *Espumas Metálicas: Potencial de Inovação na Construção Naval.* Figueiras, Fábio G. N. Aveiro : s.n., 2006.
5. *Deformation and fracture of aluminium foams.* Olurin, O. B., Fleck, N. A. and Ashby, M. F. Cambridge : Elsevier, 2000.
6. *Mechanical behavior of open-cell metallic foams with dual-size cellular structure.* Kou, D. P., et al. China : ScienceDirect, 2008.
7. *Cellular Metals.* Evans, Anthony G., Hutchinson, John W. and Ashby, Michael F. Cambridge : s.n., 1998.
8. *The Strain Rate Effect of an Open Cell Aluminum Foam.* Han, Fusheng, et al. China : s.n., 2004.
9. International, ASM. *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials.*
10. *Elasto-plastic constitutive model of aluminum alloy foam subjected to impact loading.* Zhi-hua, Wang, Lin, Jing and Long-mao, Zhao. China : ScienceDirect, 2010.