



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Caracterização dinâmica de espumas de Alumínio

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Autor

Luís Aires da Silva Inácio

Orientadores

Professor Doutor José Maria Osório de Sousa Cirne

Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro

Júri

Presidente Professora Doutora Maria Augusta Neto
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogal Professor Doutor Paulo Nobre Balbis Reis
Professor Auxiliar da Universidade da Beira Interior

Orientador Professor Doutor José Maria Osório de Sousa Cirne
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Fevereiro, 2014

“A vida é uma peça de teatro que não permite ensaios. Por isso, cante, chore, ria e viva intensamente, antes que a cortina se feche e a peça termine sem aplausos. “

Charles Chaplin

Aos meus pais.

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Professor Doutor José Maria Cirne, orientador da dissertação pela proposta de tema de tese, pela disponibilidade revelada, por todos os esclarecimentos e sugestões facultadas no decorrer deste trabalho.

À Professora Doutora Ana Paula Amaro, orientadora da dissertação, por toda a sua disponibilidade e apoio durante o período de realização deste projeto, assim como pelo desafio lançado neste tema.

Ao Engenheiro João Esteves por toda a colaboração, paciência e conhecimento transmitido assim como todo o auxílio prestado na realização dos ensaios experimentais.

Ao Professor Doutor Nuno Peixinho pela disponibilização dos materiais estudados durante este projeto.

A todos os meus amigos que fizeram deste percurso académico, algo único que para sempre me irá acompanhar.

Para finalizar, agradeço à minha família por sempre me apoiarem ao longo desta saga, por me darem coragem ao atravessar as tormentas e por nunca terem deixado de acreditar.

A vós,

MUITO OBRIGADO

Resumo

As espumas metálicas são materiais ultraleves que possuem propriedades mecânicas únicas tais como elevada rigidez específica e elevado grau de absorção de energia de impacto.

O objetivo deste trabalho visa estudar o comportamento de espumas de alumínio quando solicitadas dinamicamente e analisar o comportamento de estruturas tubulares com enchimento de espuma de células abertas do tipo uniforme e *dual-size*. Pretende-se verificar o comportamento face à variação da densidade relativa e tipo de estrutura celular.

De forma a fazer uma introdução às espumas metálicas, é realizado um enquadramento destes materiais, com uma breve apresentação dos processos de fabrico, os vários tipos de estrutura (células abertas ou fechadas, espumas de célula uniforme e *dual-size* e painéis sanduíche), características mecânicas e físicas, aplicações, bem como algumas técnicas de caracterização dinâmica, com maior ênfase no sistema de barras de Hopkinson, o qual foi utilizado para a realização da componente experimental desta dissertação.

Nesta tese também é descrito todo o equipamento experimental que foi utilizado para ensaiar os provetes de espuma de alumínio, bem como os vários passos tomados para realizar a sua caracterização.

Os resultados revelam que as espumas de alumínio com geometria celular *dual-size* têm maior capacidade de absorção de energia que a geometria celular uniforme. Foi verificado que a densidade relativa influencia o comportamento das espumas de alumínio. Por fim, constatou-se que as espumas produzidas em liga de Alumínio Al6000 tem maior ductilidade e repetibilidade nos ensaios executados que a liga AlSi12.

Palavras-chave: Barra Hopkinson, Espuma Alumínio, Caracterização Dinâmica, Celular Dual-size, Celular Uniforme.

Abstract

Metallic foams are considered ultra-light materials that possess unique mechanical properties such as high specific rigidity and high impact energy absorption, stable deformation modes as well good capacity to adapt the loading conditions during deformation.

The objective of this work is to study the behavior of metallic foams dynamically solicited and analyze the performance of tubular structures with and without foam-filling of uniform and dual-size foam type, in which the density is changed and tested.

So, in the first part it is made a brief presentation of these materials, the manufacturing processes, several types of cellular structures (open and close cells, uniform and dual-size foams and sandwich panels), different mechanical properties, applications, some dynamic characterization techniques, with special regard to the Split Hopkinson Pressure Bar test, which was used in the experimental part of this study.

In this work it is also described the apparatus used for testing the foam samples (SHPB system and data treatment software), as well the several steps that were made to make the characterization.

The experimental results reveal that aluminium foams with dual-size cellular geometry have better impact energy absorption ability than the uniform-size cellular geometry. It was verified that relative density has influence in the behavior of aluminium foams. For last, it was observed that the foams produced with Al6000 aluminium alloy has better ductility and testing repeatability than the AlSi12 aluminium alloy.

Keywords Hopkinson Bar, Aluminium foam, Dynamic characterization, dual-size, uniform-size.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xii
Simbologia e Siglas	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos.....	2
2. ESPUMAS METÁLICAS.....	5
2.1. Processos de Fabrico.....	6
2.1.1. Fundição de precisão	7
2.1.2. Fundição de dois materiais, um solúvel.....	8
2.1.3. Expansão direta do metal fundido	8
2.1.4. Solidificação eutética de sólido-gás	9
2.1.5. Pulverotecnologia	9
2.2. Estrutura das Espumas	10
2.2.1. Estrutura celular uniforme e <i>dual-size</i>	11
2.2.2. Estrutura sanduíche metálica	13
2.3. Propriedades Mecânicas	15
2.3.1. Densidade	16
2.3.2. Módulo de Young.....	17
2.3.3. Resistência à compressão/ tração	19
2.3.4. Absorção de energia	21
2.4. Aplicações.....	24
2.5. Caracterização Dinâmica de Materiais	25
2.5.1. Ensaaios a baixa taxa de deformação	26
2.5.2. Ensaaios a média taxa de deformação	27
2.5.3. Ensaaios a elevada taxa de deformação	27
3. ANÁLISE EXPERIMENTAL	31
3.1. Material e Processo de Fabrico	31
3.2. Montagem Experimental.....	33
3.2.1. Sistema SHPB do DEM.....	33
3.2.2. <i>DAVID</i> ® - Software de tratamento de dados	36
3.2.3. <i>PHOTRON</i> - Análise em câmara de alta velocidade	37
3.3. Procedimento experimental	39
3.4. Descrição dos provetes e velocidade de ensaio	40
3.4.1. Geometria Uniforme.....	40
3.4.2. Geometria <i>Dual-size</i>	42
3.4.3. Espuma com parede US e DS.....	43
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	45
4.1. Ensaaios em Espumas de Alumínio.....	46
4.1.1. Geometria Uniforme.....	46

4.1.2. Geometria <i>dual-size</i>	51
4.1.3. Comparação das duas geometrias.....	52
4.2. Ensaios em Tubos com Espuma	56
5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
5.1. Conclusões	61
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
ANEXO A	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Componentes de absorção de energia para industria automóvel.	1
Figura 1.2. Provetes US (a) e DS (b) com densidade relativa de 20%.	3
Figura 2.1. Exemplos de espumas (metálica, cerâmica e polimérica).	5
Figura 2.2. Espumas metálica de células fechadas (à esq.) e abertas (dta).	5
Figura 2.3. Espumas de Alumínio Comerciais - Módulo de Young Vs. Densidade (Ashby et al., 2000).	6
Figura 2.4. Processos de fabrico e respetiva gama de densidades (Tavares, 2008).	7
Figura 2.5. Resistência à compressão de espuma de alumínio com orientação de expansão paralela e perpendicular (Duarte, 2005).	11
Figura 2.6. Estrutura compacta de célula aberta a) Uniforme e b) Dual-Size (Kou et al., 2008).	12
Figura 2.7. Desenho 3D de Tubo com Espuma a) Uniforme e b) Dual-Size (Carvalho, 2012).	13
Figura 2.8. Painel sanduíche de alumínio submetido a impacto (Fraunhofer, Bremen).	14
Figura 2.9. a) Painel sanduíche e viga I; b) Distribuição de tensões à flexão.	15
Figura 2.10. Relação entre espessura, resistência e rigidez em painéis sanduíche (Gundberg, 2013).	15
Figura 2.11. Gráfico comparativo da densidade em vários tipos de espuma de célula fechada (Duarte, 2005)	17
Figura 2.12. Modelos teóricos para os módulos de Young em espumas metálicas (Duarte et al., 2005).	18
Figura 2.13. Módulo de Young vs Densidade relativa em espumas de alumínio (Ashby et al., 2000).	19
Figura 2.14. Curva padrão de uma espuma metálica a) à compressão; b) à tração (Duarte et al., 2005).	19
Figura 2.15. Curvas tensão-deformação para espumas de alumínio de diferentes densidades (Gibson et al., 1997).	21
Figura 2.16. Comportamento de um absorvedor de energia ideal sujeito a carregamento axial (Ahmad, 2009).	22
Figura 2.17. Energia absorvida por unidade de volume em espuma de alumínio AlSi12 (Baumeister et al., 1997).	23
Figura 2.18. Tipos de Ensaios aplicáveis às várias gamas de taxa de deformação (ASM Handbook, 2000).	26
Figura 2.19. Esquema de montagem experimental do SHPB (Esteves,2011).	28

Figura 2.20. a) Diagrama exemplificativo das ondas de choque; b) Visualização no Osciloscópio (Esteves, 2011).	29
Figura 3.1. Etapas da fundição por ceras perdidas das espumas de alumínio (Carvalho, 2012).	31
Figura 3.2. Provetes a)US20% e b)DS20%.	32
Figura 3.3. Vista geral da zona de ensaios da SHPB e respetivo equipamento eletrónico (Esteves,2011).	33
Figura 3.4. Velocímetro (6 e 7), Saída do Projétil (8), Consola de Disparo (10) e Reservatório de Ar (9) (Esteves, 2011).	34
Figura 3.5. Vista geral da Consola de Disparo.	34
Figura 3.6. Gráfico Pressão do reservatório/ Velocidade de disparo do projétil.	35
Figura 3.7. a) Extensómetro Micro-Measurements aplicado na barra 30mm; b) Sinais obtidos no osciloscópio.	36
Figura 3.8. Software <i>DAVID</i> [®] : a) Ondas exportadas do osciloscópio; b) Fase de aproximação de onda teórica com onda recolhida (Esteves, 2011).	37
Figura 3.9. Aparato para captação de imagens com câmara de alta velocidade Photron.	38
Figura 3.10. Provetes de espuma US20% e US60%.	41
Figura 3.11. Provetes de espuma DS20% (duas perspetivas).	42
Figura 3.12. Proвете de espuma US20% com parede.	43
Figura 4.1. Taxa de deformação <i>versus</i> Deformação dos provetes de espuma US 20% de Al6000 e AlSi12.	47
Figura 4.2. Tensão <i>versus</i> Deformação dos provetes de espuma US 20% de Al6000 e AlSi12.	47
Figura 4.3. Taxa de deformação <i>versus</i> Deformação da espuma US60% de Al6000 e AlSi12.	48
Figura 4.4. Tensão <i>versus</i> Deformação dos provetes de espuma US60% de Al6000 e AlSi12.	49
Figura 4.5. Tensão <i>versus</i> Deformação dos provetes de espuma US 20% e US60% de AlSi12 e Al6000.	50
Figura 4.6. Taxa de deformação <i>versus</i> Deformação dos provetes de espuma DS20% de Al6000 e AlSi12.	51
Figura 4.7. Tensão <i>versus</i> Deformação das espumas DS20% de Al6000 e AlSi12.	52
Figura 4.8. Taxa de deformação <i>versus</i> Deformação das Espumas US20% e DS20% de Al6000 e AlSi12.	53
Figura 4.9. Tensão <i>versus</i> Deformação das Espumas US20% e DS20% de Al6000 e AlSi12.	53
Figura 4.10. Energia absorvida <i>vs</i> deformação dos provetes de espuma DS20% e US20% em Alumínio AlSi12.	54

Figura 4.11. Modo de ruína em provetes de espuma DS20% fundidos em AlSi12.....	55
Figura 4.12. Modo de ruína em provetes de espuma US60% fundidos em AlSi12.....	55
Figura 4.13. Modo de ruína em provetes de espuma US60% e DS20% em AlSi12.....	55
Figura 4.14. Modo de ruína em provetes de espuma DS20% fundidos em Al6000	56
Figura 4.15. Modo de ruína em provetes de espuma US60% fundidos em Al6000	56
Figura 4.16. Taxa de deformação <i>versus</i> deformação das espumas com parede US20% e DS20% (AlSi12).....	57
Figura 4.17. Tensão <i>versus</i> Deformação de provetes de espuma com parede US20% e DS20% (AlSi12).....	58
Figura 4.18. Provede US3-20% montado na SHPB de Aço de 30mm de diâmetro antes e depois do impacto.....	59
Figura 4.19. Provede DS4-20% montado na SHPB de Alumínio de 30mm de diâmetro antes e depois do impacto.....	59

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Composição química da liga de Alumínio AlSi12.	40
Tabela 3.2. Composição química da liga de Alumínio Al6000.	40
Tabela 3.3. Provetes de espuma US de densidade relativa de 20% e 60% de AlSi12.	41
Tabela 3.4. Provetes de espuma US de densidade relativa de 20% e 60% de Al6000.....	41
Tabela 3.5. Provetes de espuma DS de densidade relativa 20% de AlSi12	42
Tabela 3.6. Provetes de espuma DS de densidade relativa 20% de Al6000.....	42
Tabela 3.7. Provetes de Espuma US e DS de densidade relativa 20% de AlSi12.....	43

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

a – Distância entre dois centros adjacentes dos enchimentos largos

C_0 – Velocidade de propagação de onda

E – Módulo de Young (ou elasticidade linear)

E^* – Módulo de Young relativo

E_s – Módulo de Young do material sólido

E_a – Energia absorvida

f_l – Fração de volume de enchimentos largos

f_s – Fração de volume de enchimentos secundários

F – Força aplicada (carga)

$F_{máx}$ – Força máxima aplicada

G – Módulo de elasticidade transversal

p – Porosidade

P – Carga de compressão instantânea

P_m – Carga média de compressão

r – Raio dos enchimentos secundários

R – Raio dos enchimentos largos

V_{in} – Tensão de entrada

V_{out} – Tensão de saída

s^{-1} – Unidades da taxa de deformação

σ_s – Tensão no provete (*specimen*)

ε – Deformação

ε_R – Deformação refletida na barra incidente

ε_S – Deformação no provete

ε_T – Deformação transmitida

η_{ef} – Eficiência da energia absorvida

δ – Distância esmagada atual

$\delta_{m\acute{a}x}$ – Distancia esmagada máxima (deflexão máxima)

ρ – Densidade

ρ^* – Densidade relativa

ρ_s – Densidade do material sólido

Φ – Fração de sólido

Siglas

CAD – Desenho Assistido por Computador (*Computer Aided Design*)

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DS – *Dual-Size* (DS20% - Espuma DS de densidade relativa 20%)

FCC – Cúbico de Faces Centradas (**F**ace-**C**entered **C**ubic)

US – *Uniform-Size* (USx0% - Espuma US de densidade relativa x0%)

SHPB – Barra Hopkinson de Pressão Partida (*Split-Hopkinson Pressure Bar*)

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

No campo do impacto, as espumas metálicas aparecem como uma nova variedade de materiais, com um grande potencial, apresentando uma excelente relação resistência vs. densidade. Outros fatores que conduzem à aposta neste tipo de materiais celulares são a capacidade de resistência ao fogo, absorção de vibrações e isolamento acústico. Apresentam ainda a vantagem de poderem ser reciclados. A indústria automóvel, atenta e participativa no desenvolvimento de novas tecnologias, vê neste campo uma nova oportunidade, pois terá ao seu alcance uma técnica segura, de redução de peso em veículos, conduzindo para a diminuição do consumo de combustível. Outra vantagem associada à utilização destes novos materiais é que podem ser aplicados a componentes estruturais de absorção de impacto, contribuindo, desta forma, para a segurança dos passageiros (Ashby et al., 2000).

Na Figura 1.1 estão ilustrados alguns componentes de absorção de energia de impacto utilizados pela indústria automóvel.



Figura 1.1. Componentes de absorção de energia para industria automóvel.

Tendo em consideração estes fatores, torna-se fundamental determinar corretamente o comportamento destes materiais. Outras indústrias que poderão ser muito beneficiadas com o desenvolvimento das espumas metálicas são a indústria naval, aeroespacial, biomédica e defesa/militar. No caso desta última, a redução de peso e o aumento de proteção contra o impacto de projéteis, conduziu à conceção e desenvolvimento de viaturas blindadas que utilizam estruturas tipo sanduíche, no qual o

núcleo é constituído por espumas metálicas. Embora o aço continue a ser a opção com maior uso nas aplicações militares de defesa, a sua elevada densidade torna-o, por vezes, inadequado. É aqui que os materiais celulares metálicos, nomeadamente os de matriz de alumínio, têm vindo a apresentar um ótimo desempenho, quando comparado com o aço (placas maciças).

Atualmente existem várias empresas que fabricam e comercializam espumas metálicas tais como a Shinko Wire (Japão), a Schunk (Alemanha), a Mepura (Áustria) e outras. Contudo, as dificuldades relacionadas com a uniformidade e reprodutibilidade exigidas, tanto para a produção como para comercialização, ainda estão longe de estarem resolvidas, devido a dificuldades na obtenção de propriedades iguais num processo contínuo.

Assim, com o objetivo de dar resposta a inúmeras questões, surgiram grupos de investigação interessados no desenvolvimento das espumas metálicas na Europa, Estados Unidos, bem como Ásia pertencentes a Universidades e outros institutos de investigação, os quais participam, em conjunto, com empresas industriais de grande dimensão. Existem três componentes de investigação distintas as quais podem ser distinguidas da seguinte forma: i) processo de fabrico – controlo e otimização dos processos de forma a obter produtos com propriedades pré-definidas; ii) propriedades do material – físicas, químicas, mecânicas, etc.; iii) simulação e ensaios experimentais com o objetivo que prever o comportamento mecânico aquando em serviço (Duarte, 2005).

A realização deste trabalho irá então contribuir para a investigação na área das espumas metálicas pois tem por base a realização de ensaios na barra de Hopkinson com o objetivo de prever o comportamento de espumas de alumínio a elevadas taxas de deformação (300s^{-1} a 500s^{-1}).

1.2. Objetivos

A realização deste trabalho tem como objetivo estudar as espumas metálicas, em particular as de alumínio, e o seu comportamento em solicitações dinâmicas. Pretende-se, ainda, analisar o comportamento de estruturas tubulares com e sem enchimento de espuma. De forma a enquadrar este estudo, serão abordados vários temas tais como processos de fabrico, propriedades mecânicas, equipamentos e técnicas usadas na caracterização dinâmica de materiais.

Para tal esta dissertação está organizada em 5 capítulos sendo este, Introdução, o primeiro.

No capítulo de revisão bibliográfica, pretende-se proporcionar uma visão global sobre vários tipos de espumas metálicas, processos de fabrico, propriedades mecânicas, estruturas celulares convencionais ou alternativas e algumas das potenciais aplicações (estruturais e funcionais). Serão ainda apresentadas algumas das técnicas existentes de caracterização dinâmica de materiais celulares, dando-se maior ênfase à técnica da barra de Hopkinson (*SHPB*).

No terceiro capítulo são descritos os materiais, equipamentos e técnicas utilizadas para a realização da componente experimental desta tese, nomeadamente a caracterização dinâmica de dois tipos de espumas de alumínio com geometrias modificadas, celular Uniforme (US) e *Dual-size* (DS).

A Figura 1.2 ilustra os provetes de geometria celular uniforme e *dual-size*, com densidade relativa de 20%, analisados neste estudo.

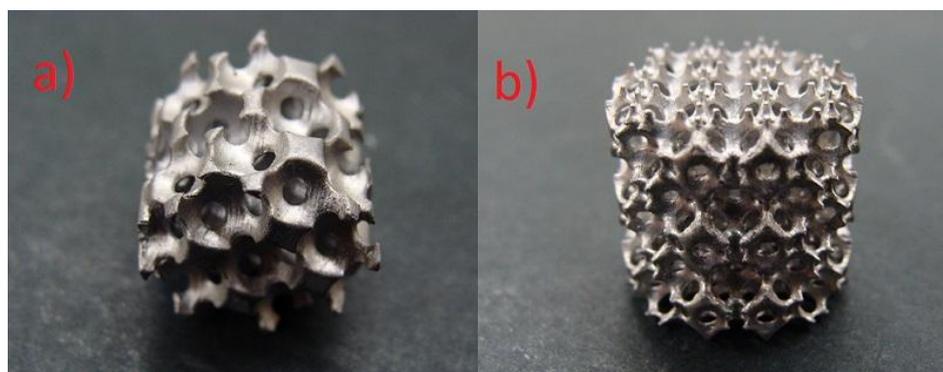


Figura 1.2. Provetes US (a) e DS (b) com densidade relativa de 20%.

A execução desta análise irá permitir verificar o comportamento dinâmico desta classe de espumas a taxas de deformação entre 200s^{-1} e 400s^{-1} . Ainda se pretende analisar o comportamento de tubos cilíndricos com núcleo em espuma US e DS de forma a verificar se existe influência do tipo de espuma utilizado no núcleo no desempenho global das espumas.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos.

Finalmente, no quinto capítulo, resumem-se as conclusões obtidas durante o presente estudo e sugerem-se trabalhos futuros.

2. ESPUMAS METÁLICAS

Os materiais celulares, como as espumas, são uma classe de material relativamente nova. O facto de possuírem um grande volume de poros cheios de ar na sua estrutura conduz a uma baixa densidade, e mostram um grande potencial em aplicações de absorção de energia e de amortecimento devido à sua elevada rigidez específica (Ashby et al., 2000). Outro facto interessante é que as espumas podem ser fabricadas praticamente em qualquer tipo de material tais como metais, polímeros, cerâmicos e até compósitos.

Na figura 2.1 encontram-se ilustrados exemplos de espuma metálica (esquerda), cerâmica (centro) e polimérica (direita).



Figura 2.1. Exemplos de espumas (metálica, cerâmica e polimérica).

As suas características dependem essencialmente das propriedades associadas ao material utilizado e do tipo de estrutura geométrica da espuma: tamanho e forma das células, forma como o material está disposto entre as faces, uniões das células, densidade relativa do conjunto, etc. (Neves, 2009).

As espumas metálicas dividem-se em duas categorias: espumas de células abertas e espumas de células fechadas (Fig. 2.2).

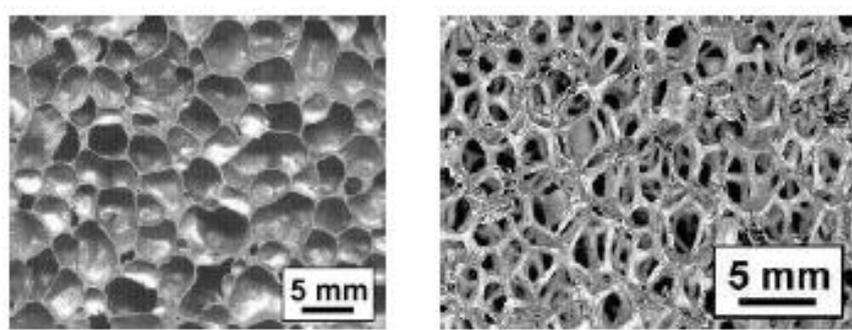


Figura 2.2. Espumas metálica de células fechadas (à esq.) e abertas (dta).

Atendendo a todos estes fatores, pode-se obter espumas com propriedades mecânicas bem distintas, tal como exemplificado na Figura 2.3.

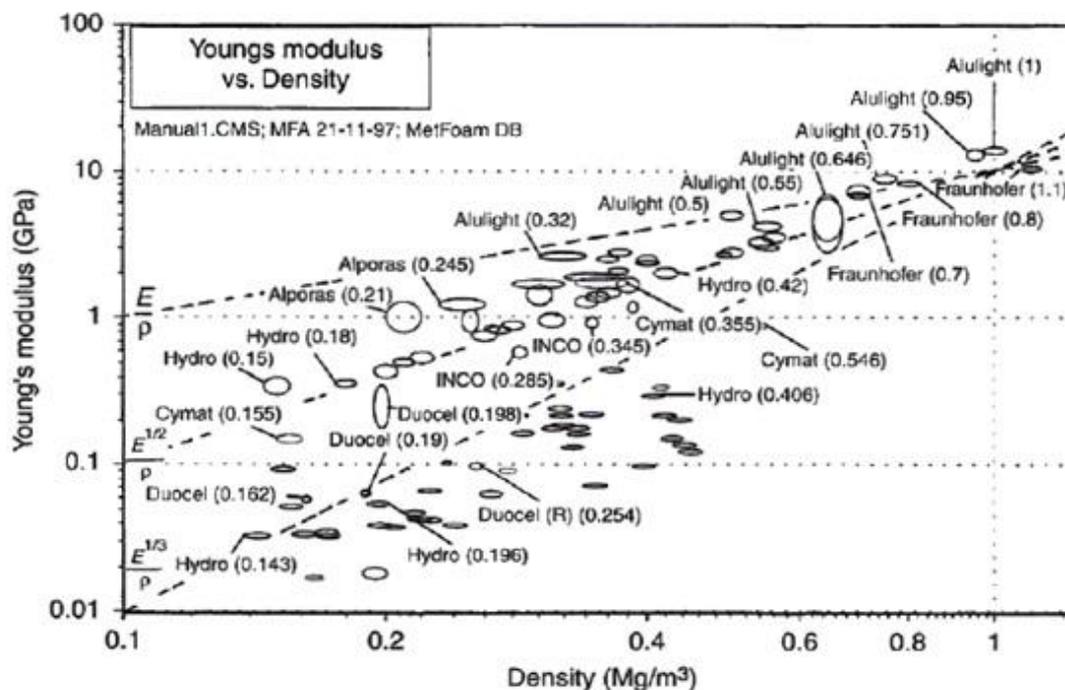


Figura 2.3. Espumas de Alumínio Comerciais - Módulo de Young Vs. Densidade (Ashby et al., 2000).

No presente estudo vão ser utilizadas espumas metálicas. Por isso, no ponto 2.1 ir-se-á falar dos processos de fabrico normalmente utilizados para a produção deste tipo de espumas.

2.1. Processos de Fabrico

Existem várias formas para a produção de espumas metálicas. Algumas das técnicas utilizadas são bastante semelhantes aos processos de produção de espumas poliméricas, enquanto outras utilizam procedimentos inovadores tirando proveito das propriedades características dos metais. Os processos de fabrico utilizados para a produção de espumas metálicas distinguem-se principalmente pelo estado inicial do metal – fundido, pó ou ionizado. É possível obter diferentes tipos de estrutura dependendo do processo de fabrico adotado, diferenciando-se em células abertas ou fechadas.

Na Figura 2.4 é possível verificar uma relação entre os vários processos de fabrico e a densidades do produto final.

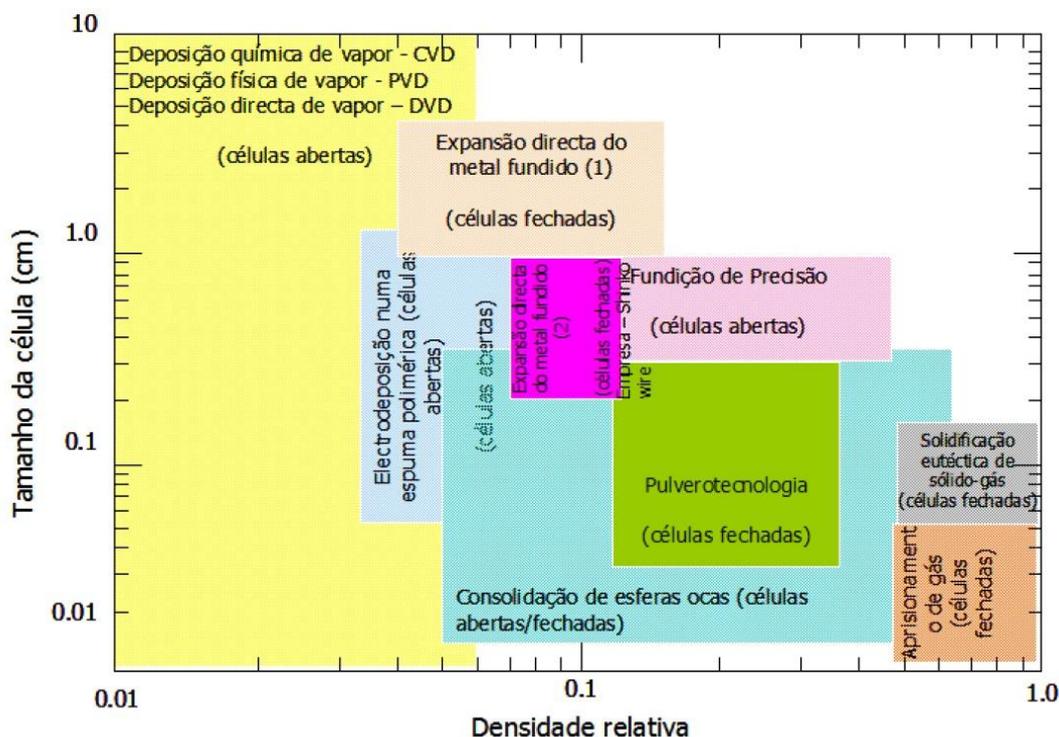


Figura 2.4. Processos de fabrico e respetiva gama de densidades (Tavares, 2008).

2.1.1. Fundição de precisão

A técnica de fundição de precisão, também conhecida por *Investment Casting* ou de Ceras Perdidas, é iniciada com a produção de uma matriz polimérica, a qual deverá possuir a geometria e a estrutura porosa igual ao componente que se pretende produzir. A seguir, esta espuma é preenchida por uma suspensão de um material resistente ao calor (por exemplo mistura de mulite/porcelanite com carboneto de cálcio, etc.), a qual será seca. Posteriormente, a espuma polimérica é retirada por intermédio da aplicação de calor, resultando numa matriz cerâmica. A fase seguinte consiste em vaziar o metal líquido para dentro deste molde. A extração do material cerâmico poderá ser executada por intermédio de vibração e/ou químico (ácido fraco), obtendo-se uma imagem exata da espuma polimérica inicial.

A utilização desta técnica permite obter estruturas metálicas de elevada qualidade, com possibilidade de variação na distribuição dos poros dos materiais, podendo-se alcançar estruturas com uma gama de porosidade de 80% a 97%. Outro fator importante é que esta técnica permite obter componentes de geometria de elevada complexidade (Duarte, 2005)

Para a realização experimental deste trabalho foi utilizado um processo semelhante para a produção dos provetes ensaiados.

2.1.2. Fundição de dois materiais, um solúvel

Esta técnica baseia-se num processo básico de fundição, no qual o molde ("negativo"), é formado por um material solúvel (por ex.: cloreto de sódio), obtendo-se espumas de estrutura celular aberta. Basicamente, depositam-se camadas de partículas solúveis, as quais são infiltradas com metal fundido pressurizado. Após arrefecimento do metal, o molde é dissolvido num solvente adequado (por ex. água). Espumas de alumínio com recurso a cloreto de sódio foram produzidas com bastante sucesso, tendo sido possível obter grandes secções de estruturas com boa uniformidade. As densidades relativas destas espumas variam entre os 0,2 e 0,5 e o tamanho das células é determinado pelo tamanho das partículas, variando entre os 10 μ m e os 10mm (Ashby et al., 2000). Kou et al. (2008) refere que esta técnica permite a obtenção de espumas de células abertas com geometria celular uniforme (geometrias celulares semelhantes às referidas neste trabalho como uniformes (US). Marchi et al. (2001) relata a utilização desta técnica na produção de espumas com estrutura geométrica uniforme, tendo sido estudadas de forma a determinar as suas propriedades mecânicas.

2.1.3. Expansão direta do metal fundido

O processo de expansão direta do metal fundido é caracterizado pela obtenção de espumas metálicas injetando diretamente o gás no interior do metal fundido (por exemplo: ar, dióxido de carbono, oxigénio, gases inertes, água, etc.), ou então adicionando um agente expensor que se decompõe termicamente libertando um gás. As bolhas de gás injetado ou formadas por decomposição térmica de um agente expensor, têm a tendência a alcançar a superfície rapidamente num líquido altamente denso. No entanto, a criação de espuma, no caso dos metais puros não é fácil, uma vez que a mesma não é suficientemente estável e acaba por colapsar antes da solidificação do metal. De forma a conseguir contrariar esta tendência, são normalmente adicionadas pequenas partículas, tais como pós cerâmicos finos (por exemplo carboneto de silício ou alumina) os quais aumentam a viscosidade do metal, assim como a estabilidade da espuma. Assim, controlando a viscosidade do metal fundido, também se consegue controlar a velocidade de ascensão das

bolhas de gás até à superfície do metal fundido. As características da espuma produzida são resultantes do controlo da injeção de ar, da temperatura, da velocidade de arrefecimento bem como da viscosidade do metal (Duarte, 2005).

2.1.4. Solidificação eutética de sólido-gás

Este processo permite obter vários metais porosos tais como cobre, alumínio, níquel, berílio, molibdénio, cobalto, aço, bronze, entre outros. A técnica consiste na fusão do metal numa atmosfera de hidrogénio, sendo arrefecida através do ponto eutético. No arrefecimento o metal líquido transita para um sistema de duas fase heterogéneas (gás e sólido), e à medida que o metal solidifica, o gás conduz a uma precipitação de poros no sólido. O resultado da estrutura é influenciado pelo teor em hidrogénio, pela pressão de formação, pela direção e velocidade de arrefecimento, bem como pela composição química do material fundido. Uma particularidade do uso deste método é que a porosidade não é uniforme, ficando alongada na direção das diferenças de temperatura envolvidas durante o arrefecimento da mesma. Este método também permite obter uma porosidade graduada ou um sólido alternativo, de diferentes camadas porosas, o qual poderá ser conseguido controlando a etapa de solidificação (Ashby et al., 2000).

2.1.5. Pulverotecnologia

Esta técnica de produção de espumas pode ser dividida, muito basicamente, em duas fases. A primeira fase consiste na compactação a quente de uma mistura de pós de metal e de pós de agentes expansores, a qual resulta num material praticamente isento de porosidade, designado de material precursor. Os agentes expansores habitualmente utilizados são o carboneto de cálcio e os hidretos de metal, dependendo do metal que se está a tratar. A prensagem ou a extrusão a quente são os processos mais usados para a compactação dos pós. A segunda fase deste processo é responsável pela formação de espuma e consiste no aquecimento do material precursor acima da sua temperatura de fusão, sendo os poros formados pela decomposição do agente expansor em simultâneo com a fusão do metal. A expansão deste material poderá ocorrer em todas as direções, ou então, ser confinado num molde o qual permite a obtenção de peças com a geometria pretendida. Após o arrefecimento a espuma irá apresentar uma estrutura celular fechada, de elevada porosidade e ainda uma película superficial densa, que aumenta as propriedades

mecânicas deste material. Atualmente tem vindo a ser testada a produção de peças para a indústria automóvel e aeroespacial utilizando este tipo de espumas. Uma vantagem da utilização desta tecnologia é que permite a sua ligação a outros materiais durante o desenvolvimento, evitando processos de “colagem” adicionais (Tavares, 2008).

2.2. Estrutura das Espumas

As espumas sólidas são materiais com uma estrutura altamente porosa em que o material de base pode ser um metal, um polímero ou um cerâmico, dando origem a espumas metálicas, poliméricas ou cerâmicas, respetivamente. São compostas por estruturas tridimensionais de células, habitualmente classificadas em duas categorias: abertas ou fechadas.

O grupo composto por células abertas partilha entre si somente as arestas, enquanto no grupo composto por células fechadas são partilhadas as paredes e as arestas. Os diferentes tipos de estrutura poderão ser obtidos utilizando diferentes processos de produção, os quais, ao serem manipulados, permitem a alteração das características celulares obtidas (forma e tamanho das células), podendo-se assim obter materiais mais direcionados para as aplicações pretendidas.

As propriedades das espumas metálicas são resultado das suas características estruturais e dependem diretamente da forma e tamanho das células, da distribuição de material sólido entre as arestas/faces e ainda das propriedades da matriz metálica. Destaca-se ainda outras características que influenciam na obtenção das propriedades tais como a percentagem de células (abertas e fechadas) bem como a direção da carga aplicada na espuma (comportamento anisotrópico) (Duarte, 2005).

Na Figura 2.5 está representada graficamente a variação da resistência à compressão da espuma de alumínio com a densidade, face às diferentes orientações de expansão. Esta figura exemplifica a variação das propriedades das espumas de alumínio de acordo com a orientação da expansão, em conjunto com a direção da aplicação da carga. É possível observar que quando a direção da expansão coincide com o sentido da carga de compressão, há um aumento significativo na resistência mecânica da espuma.

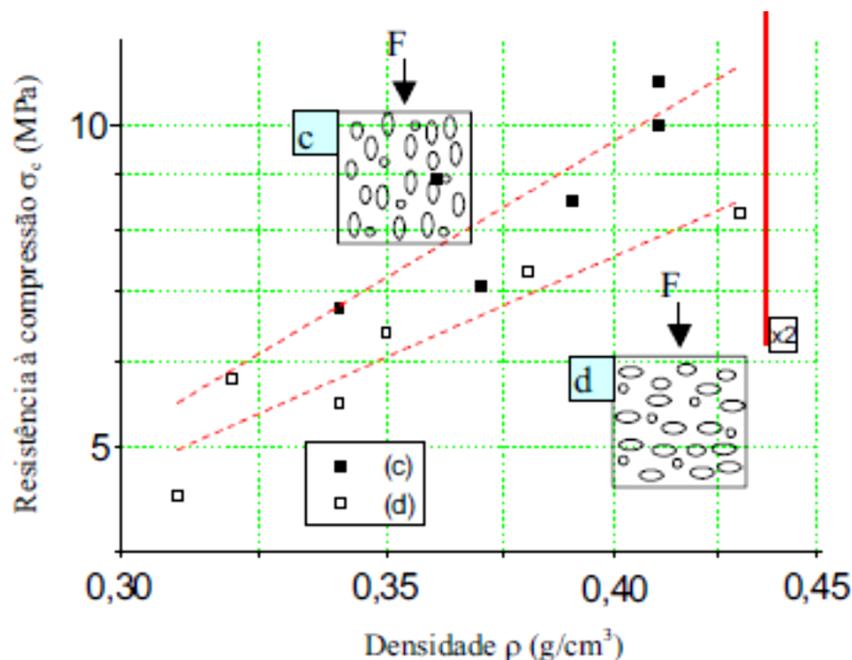


Figura 2.5. Resistência à compressão de espuma de alumínio com orientação de expansão paralela e perpendicular (Duarte, 2005).

2.2.1. Estrutura celular uniforme e *dual-size*

Vários tipos de processos têm sido desenvolvidos para a produção da mais variada gama de espumas com células abertas ou fechadas. O método de infiltração resulta em espumas com estrutura celular aberta, as quais apresentam estruturas algo irregulares com porosidades a variarem entre os 60% e 70%. Marchi et al. (2001) na tentativa de produção de espumas com estrutura celular regular usaram, com sucesso, uma técnica semelhante, na qual a porosidade final variou entre os 73% e os 80%. Estes autores referem que estas espumas apresentaram estrutura celular praticamente esférica e com boa compactação. Afirmando ainda que a geometria celular para espumas de célula aberta produzidas pelo método de infiltração é determinada pela natureza dos sais agregadores. Na sequência do trabalho destes autores Kou et al. (2008), de forma a simplificarem os modelos numéricos, idealizaram uma estrutura semelhante, com células esféricas, compactas, num arranjo do tipo FCC (Cúbica de Faces Centradas). De modo a tentarem otimizar esta geometria, apresentaram duas geometrias celulares de matriz aberta, as quais foram designadas de celular uniforme e *dual-size* (Fig.2.6). As espumas de células uniformes têm o formato esférico e são estreitamente compactas. Na descrição da geometria, os enchimentos referem-se ao espaço preenchido no molde que origina a

estrutura celular. Assim, na Figura 2.6 está ilustrado o molde, cujos vazios, representam a estrutura celular da espuma.

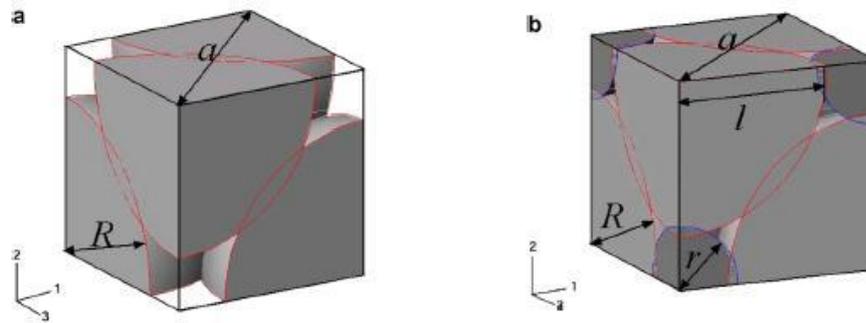


Figura 2.6. Estrutura compacta de célula aberta a) Uniforme e b) Dual-Size (Kou et al., 2008).

Neste tipo de morfologia, a distância entre dois centros adjacentes dos enchimentos largos é “a” e o raio dos enchimentos largos é “R”. No caso das espumas *dual-size*, existem enchimentos secundários os quais são possíveis observar na Figura 2.6b), ligação esta que está localizada nos espaços vazios existentes na espuma uniforme. Neste tipo de espuma, “r” representa o raio dos enchimentos secundários. A fração de enchimentos largos e secundários é representada por f_l e f_s , respectivamente. Outro ponto importante é que a sobreposição de enchimentos reduz a densidade relativa das estruturas celulares produzidas. Os autores, Kou et al.(2008), mencionam ainda que resultados experimentais indicam que a introdução destes enchimentos secundários também aumenta a performance mecânica da espuma, sendo que, as espumas *dual-size* com uma razão $r/R = 0.4$ e $f_s/f_l = 0.1$ apresentam o melhor valor em termos de resistência, na qual a sua rigidez e resistência são 26% e 19% melhores que a sua correspondente em estrutura uniforme. No entanto, o aumento da razão f_s/f_l de 0,1 para 0,2 diminui a rigidez e resistência. Ainda concluíram que as propriedades mecânicas das espumas de célula aberta *dual-size* ir-se-ão degradar se o tamanho dos enchimentos secundários exceder o intervalo compatível.

Comparando os resultados experimentais dos dois tipos de estrutura, é possível verificar que o comportamento da estrutura *dual-size* tem maior tensão de cedência, assim como há um aumento de rigidez com o aumento da razão entre os raios dos enchimentos largos e secundários (Kou et al., 2008).

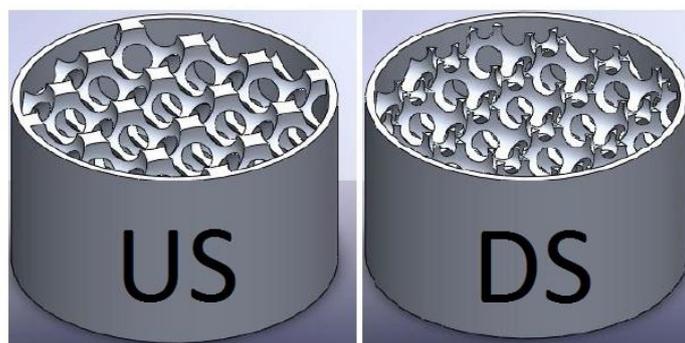


Figura 2.7. Desenho 3D de Tubo com Espuma a) Uniforme e b) Dual-Size (Carvalho, 2012).

Num estudo recente, Pinto et al. (2014) estudaram os mesmos tipos de geometria celular no qual determinaram experimentalmente o comportamento mecânico de espumas de alumínio com geometrias celulares modificadas, nomeadamente geometria US e DS (Figura 2.7). Neste estudo verificaram que para as duas estruturas de igual densidade relativa, a geometria *dual-size* suportou 83% mais carga, a rigidez foi superior em 29%, a energia absorvida específica foi superior em 112% para pequena deformação (5mm), a qual decresceu para 27% no caso de grandes deformações (15mm), quando comparadas com a geometria celular uniforme. Os autores ainda referem que estes resultados são indicadores de uma eficiência mais elevada da estrutura *dual-size* que poderá ser considerada para o uso em componentes sujeitos a cargas impacto ou compressão, tanto em rigidez como em absorção de energia de impacto. Estes resultados seguem a tendência e acabam por confirmar os resultados já obtidos no estudo já referido e realizado anteriormente por Kou et al. (2008), para este tipo de geometria celular.

2.2.2. Estrutura sanduíche metálica

Os painéis sanduíche com núcleo celular dissipam bem a energia e têm a vantagem de possuírem baixo peso, podendo ser usados numa variada gama de aplicações, mesmo quando sujeitos a condições extremas de carregamento, tais como impacto balístico, colisão automóvel, naval ou aeroespacial.

A geometria mais comum apresenta em três camadas distintas: duas são designadas por placas de blindagem e correspondem às faces exteriores, sendo constituídas por placas finas, que se encontram separadas por uma camada intermédia que se designa de núcleo. Enquanto as faces exteriores são habitualmente compostas de materiais rígidos (aço, alumínio, etc.) o núcleo é fabricado a partir de materiais mais leves e

consideravelmente menos densos que as faces, tais como borracha porosa, espumas poliméricas ou metálicas (ver exemplo na Fig. 2.8)

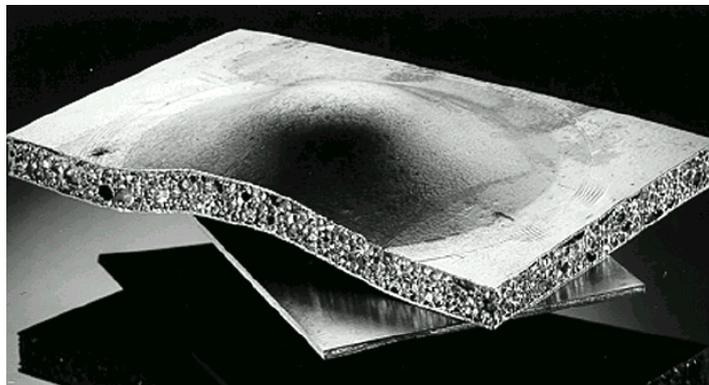


Figura 2.8. Painel sanduíche de alumínio submetido a impacto (Fraunhofer, Bremen).

A microestrutura celular possibilita uma elevada capacidade de deformação plástica a tensão constante, absorvendo uma grande quantidade de energia cinética, antes de colapsar numa configuração estrutural mais estável (densificação) ou fraturar.

Hou et al. (2010) ainda mencionam que foram efetuados diversos estudos nos quais foram analisados vários parâmetros, tais como a velocidade de impacto, condições de fronteira e força de adesão entre o núcleo celular e as faces dos painéis. A título de exemplo, Zhao et al. (2007) publicaram um artigo no qual efetuaram ensaios na barra de Hopkinson em estruturas com placas de blindagem e núcleo em espuma de alumínio. Neste trabalho os autores registaram um historial de resultados em função da força – deslocamento. Este estudo experimental tinha o objetivo de verificar o comportamento de painéis de espuma de alumínio sujeitos a impacto. Os autores verificaram ainda após inúmeros testes de impacto, que velocidades de impacto elevadas tendem a aumentar a quantidade de energia absorvida que podendo este facto ser justificado devido ao aumento na tensão de esmagamento do núcleo, bem como pela ocorrência de falha nas faces da placa a elevadas taxas de deformação.

Os painéis são uma forma muito eficiente de se obter uma grande rigidez à flexão, mantendo um baixo peso. As placas de blindagem é que conferem rigidez à flexão enquanto que o núcleo resiste às tensões de corte, sendo que o princípio é o mesmo que as tradicionais vigas em I, o qual está exemplificado na Figura 2.9.

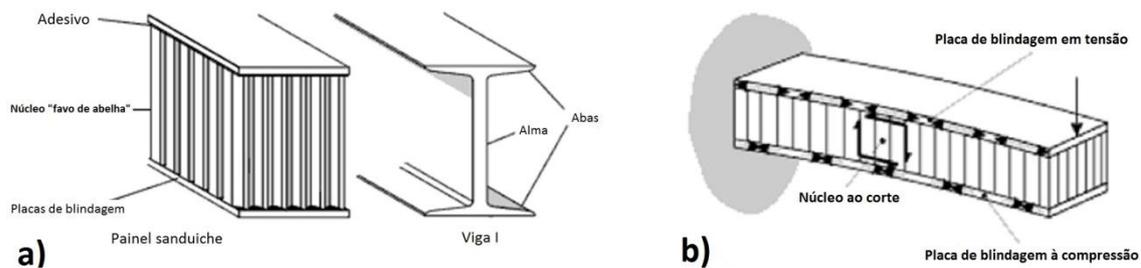


Figura 2.9. a) Painel sanduíche e viga I; b) Distribuição de tensões à flexão.

Na Figura 2.10 está ilustrada uma relação entre a espessura, a resistência e a rigidez. Nesta relação é possível verificar que a resistência à flexão (*strength*), mas sobretudo a rigidez (*stiffness*), poderão ser melhoradas à custa do aumento da espessura do núcleo de material celular, sem aumento do peso total (*weight*).

<u>Single Skin - t</u>	<u>Sandwich - 2t</u>	<u>Sandwich - 4t</u>
Weight: 1	Weight: 1	Weight: 1
Strength: 1	Strength: 6	Strength: 6
Stiffness: 1	Stiffness: 12	Stiffness: 48

As ilustrações mostram três painéis sanduíche de diferentes espessuras de núcleo. O primeiro é um painel de pele única (Single Skin) com espessura total t. O segundo é um painel sanduíche com duas camadas de pele e um núcleo de espessura t, resultando em uma espessura total de 2t. O terceiro é um painel sanduíche com duas camadas de pele e um núcleo de espessura 2t, resultando em uma espessura total de 4t.

Figura 2.10. Relação entre espessura, resistência e rigidez em painéis sanduíche (Gundberg, 2013).

As propriedades ilustradas na Figura 2.10, fazem deste tipo de estruturas ótimos candidatos para aplicações na indústria dos transportes, os quais podem beneficiados com a aplicação ao nível de reforço da carroçaria, proteções frontais e laterais, gerando resistência suficiente de forma a evitar a deformação torsional e até vibrações (Gibson et al., 1997).

2.3. Propriedades Mecânicas

Zhihua et al. (2006) estudaram o comportamento mecânico de vários tipos de espumas de células abertas em situação de solicitação estática e dinâmica. Neste trabalho foram utilizadas um largo leque de taxas de deformação, tendo sido verificado que existe dependência entre a taxa de deformação e a energia absorvida, na qual, o aumento da taxa de deformação do material conduziu ao aumento da energia absorvida. Este

comportamento também foi verificado pelos autores Gibson e Ashby (1997). Zhihua et al. (2006) ainda verificaram que a densidade foi o parâmetro que mais influenciou intrinsecamente as propriedades e comportamento. Do mesmo estudo foi possível concluir que o tamanho celular pouco influencia, pelo que não vê interesse no estudo exaustivo na tentativa de modificar a morfologia celular de forma a melhorar a capacidade de absorção de energia.

Pinto et al. (2014) que também estudaram o comportamento de espumas de células abertas mencionam o facto do tamanho e forma celular determinarem as suas propriedades, embora concordem que a densidade seja o fator mais preponderante. Kou et al., (2008) analisaram o comportamento de espumas de igual configuração às dos autores atrás referidos acrescentam que, para iguais densidades, a morfologia *dual-size* apresenta melhor comportamento que a sua homóloga uniforme.

Deshpande et al. (2000) realizaram um estudo no qual verificaram o comportamento de espumas de alumínio a elevadas taxas de deformação. No estudo que efetuaram verificaram que para o intervalo de taxas de deformação usadas (10^{-3}s^{-1} a 5000s^{-1}) não houve alteração do comportamento já verificado em análise estática, concluindo que não há mudança no mecanismo fundamental de colapso, face à alteração da taxa de deformação. Os autores enfatizam que neste estudo realizaram impactos a baixa velocidade, até $50\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, de forma a ser ignorado o efeito da onda de choque.

2.3.1. Densidade

A densidade relativa traduz a relação entre a densidade da espuma e a densidade do material base, sendo esta a propriedade mais importante no estudo das espumas metálicas a qual pode ser definida como o quociente da densidade da espuma e a densidade do material base $(\rho^*)/(\rho_s)$. A porosidade, p , corresponde à fração de poros e é dada pela equação 2.1.

$$p = 1 - \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad 2.1$$

Na Figura 2.11 está representada a densidade das espumas metálicas comparadas com outros tipos de espumas, na qual é possível verificar que a densidade relativa está diretamente relacionada com as propriedades estruturais que apresenta.

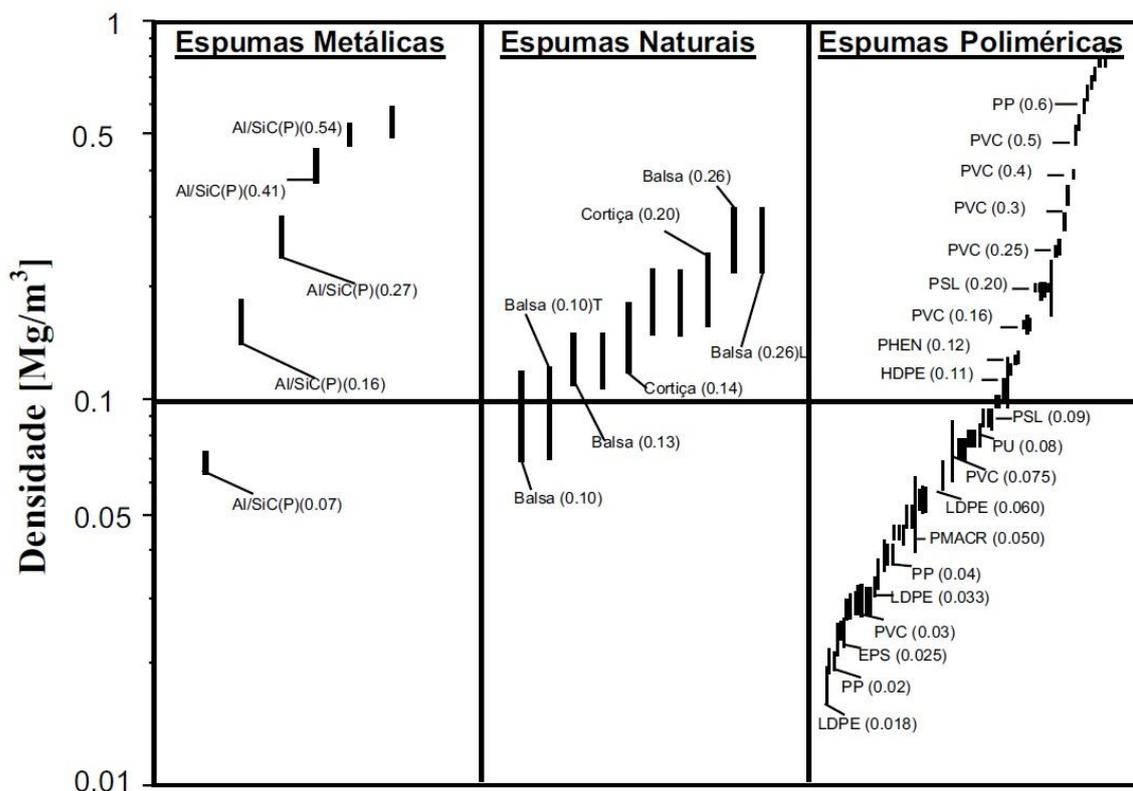


Figura 2.11. Gráfico comparativo da densidade em vários tipos de espuma de célula fechada (Duarte, 2005)

É interessante verificar que as espumas de alumínio de células fechadas dispõem de boa capacidade de flutuação, combinado com a elevada durabilidade.

Powell (2003), observou experimentalmente que existe uma relação linear entre a densidade relativa e a energia absorvida por unidade de volume de espuma de alumínio.

2.3.2. Módulo de Young

O módulo de Young, traduz-se pela inclinação inicial da curva de tensão-deformação em regime elástico, Lei de Hooke, e depende da estrutura celular do material. Para espumas de igual densidade, as espumas de células fechadas apresentam maior módulo quando comparadas com as espumas de células abertas. Na Figura 2.12 ilustra, comparativamente, a análise de diversos autores, na qual se pode verificar vários modelos matemáticos que relacionam o módulo de Young relativo (E^* / E_s) com a densidade da espuma. A fração de sólido nas arestas celulares é designada pela letra Φ , a fração de sólido nas paredes é designada $1-\Phi$ e o índice “s” é relativo às propriedades do material base. (Gibson et al., 1997).

Módulo de Young (E^*/E_s)		Autores
Espuma de células aberta	Espuma de células fechada	
ρ^2	$\phi^2 \rho^2 + (1 - \phi) \rho$	Gibson and Asbhy (1982) Argumento dimensional
$\frac{\rho^2}{10 + 31\rho + 4\rho^2}$	-	[Warren and Kraynik (1988)] Tetraedro, triangular
$0.98 \rho^2$	0.35ρ	[Warren and Kraynik (1997)] Tetradecaedro
—	$0.32 \rho + 0.32 \rho^2$	Simone [1997] Tetradecaedro, faces planas

Figura 2.12. Modelos teóricos para os módulos de Young em espumas metálicas (Duarte et al., 2005).

De forma a caracterizar o comportamento linear elástico de materiais isotrópicos são necessários o módulo de Young, E , e o módulo de elasticidade transversal, G . Pelo facto da maioria das espumas metálicas apresentar comportamento anisotrópico, resultante das características dos processos de fabrico, mais do que dois módulos poderão ser necessários de forma a se poder descrever o comportamento linear-elástico. No caso de haver isotropia a caracterização pode ser efetuada recorrendo às equações para materiais não celulares, as quais relacionam o módulo de Young, o módulo de elasticidade transversal, o coeficiente de Poisson e o módulo volumétrico (Cardoso, 2005)

Yu et al. (2003) indica que o módulo de Young e a resistência à compressão das espumas metálicas têm sido estudado por inúmeros investigadores. Mas, no entanto, a maioria dos materiais celulares disponíveis no mercado não verificam as propriedades previstas pelos modelos teóricos, de acordo com as propriedades das paredes celulares e sua densidade relativa. Este autor indica, ainda, que várias hipóteses têm sido propostas de forma a conseguir descrever o “defeito” que diminui estas propriedades, contudo, ainda não foi possível chegar a nenhuma conclusão.

Na Figura 2.13 relaciona a variação do módulo de Young com diferentes tipos de espumas de alumínio. De acordo com esta figura é possível constatar que a espuma *Duocell* tem a menor densidade enquanto a espuma *Alulight* tem a maior densidade.

Como exemplo, verifica-se que o módulo de Young das espumas de alumínio variam entre os 0.05 GPa para espumas de células abertas (*Duocell*) até aos 12 GPa para espumas de células fechadas (*Alulight*).

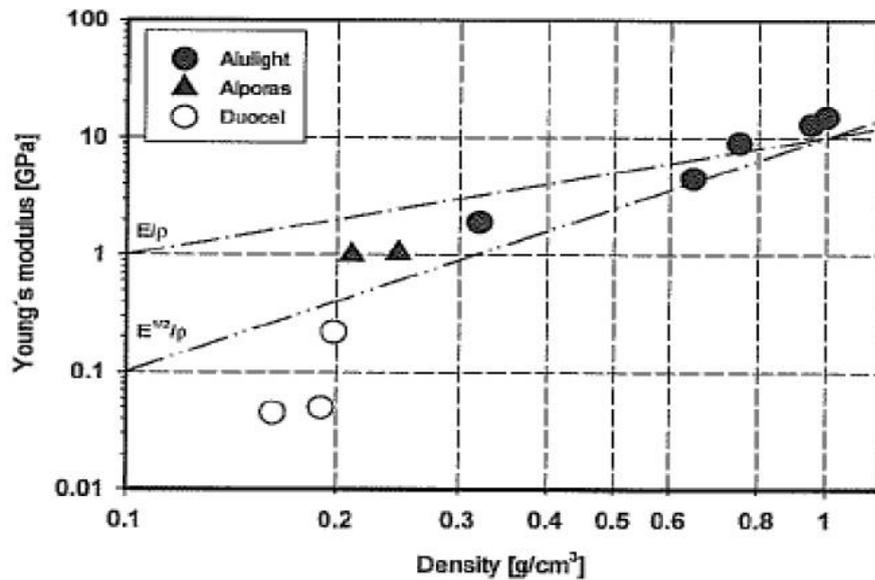


Figura 2.13. Módulo de Young vs Densidade relativa em espumas de alumínio (Ashby et al., 2000).

2.3.3. Resistência à compressão/ tração

As espumas metálicas, pelas propriedades apresentadas, têm vantagens sobre outro tipo de materiais, como, por exemplo, a elevada capacidade de deformação e absorção de energia. Por esse facto, a indústria de fabrico de componentes, nomeadamente a de transportes, tem vindo a explorar essas características únicas dos materiais celulares quando submetidos a esforços de tração/compressão. Como pode ser observado na Figura 2.14, é possível visualizar três estágios distintos: deformação elástica com duas zonas (quase linear e não linear), cedência plástica e densificação.

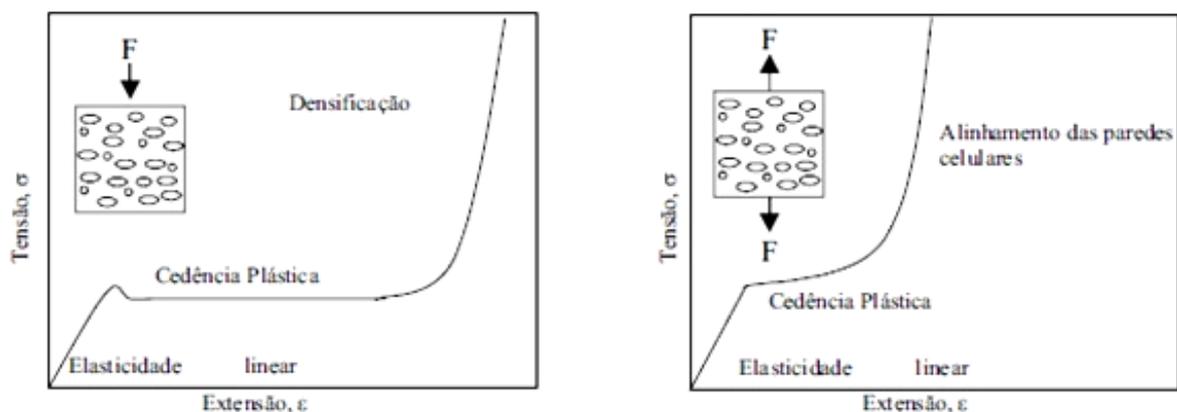


Figura 2.14. Curva padrão de uma espuma metálica a) à compressão; b) à tração (Duarte et al., 2005).

Como está exemplificado na Figura 2.14, na região linear elástica, os mecanismos de deformação dependem maioritariamente do tipo de células (aberta ou fechada) que existem na espuma. No caso das espumas de célula aberta, a deformação é

causada pela flexão, tração e contração das arestas e membranas que formam as paredes da estrutura celular. Assim, no caso das células abertas, a deformação que ocorre na região linear elástica é controlada pela flexão das paredes celulares e no caso das células fechadas, pela contração das mesmas.

Relativamente aos mecanismos de deformação de espumas sujeitas a compressão, os mesmos poderão ser separados em três fases, com as seguintes características:

- Elasticidade Linear – A região linear elástica inicial corresponde à flexão das arestas.
- Patamar (*Plateau*) – A região de *plateau* da curva do ensaio de compressão é consequência dos diversos mecanismos de deformação. Tem a designação habitual de encurvadura e corresponde à decomposição das forças de compressão nas paredes celulares. Se for atingida a carga de Euler, carga crítica de encurvadura, poderá surgir instabilidade elástica, resultando em tensões elevadas e consequente aparecimento de deformação plástica. Este patamar continua até à zona onde se observa o início do aumento de tensão, correspondente à tensão de densificação.
- Densificação – Nesta região a estrutura começa a compactar e a tensão sobe rapidamente. Este colapso tem início na zona mais fraca, em termos de ligação estrutural, e que tem maior solicitação, propagando-se ao restante material, com consequente esmagamento das estruturas celulares: densificação. Nesta fase, o material fica cada vez mais compacto e, no limite, irá ficar tão denso que se poderá considerar material sólido base. A partir do declive pode-se calcular o valor do módulo de Young.

No caso dos ensaios de tração, a região inicial corresponde à região linear elástica, à semelhança da compressão. Estruturalmente corresponde à extensão da espuma, na qual irá ocorrer flexão das arestas das células. Comparando com o ensaio de compressão, pode-se verificar que na região de cedência plástica não existe um patamar bem definido, verificando-se um aumento no valor da tensão. Este comportamento deve-se a mudanças na estrutura celular resultantes da aplicação da carga, na qual ocorre alongamento das arestas e junções, que quando associado à flexão, origina um alinhamento

das células com o eixo de aplicação de carga e resulta no aumento da concentração de tensões, o qual irá provocar conseqüente redistribuição das tensões e deformação nas restantes zonas (Duarte, 2005) (Ashby et al.,2000). Na Figura 2.15 está ilustrado a variação da resistência à compressão de vários tipos de espumas de alumínio comerciais.

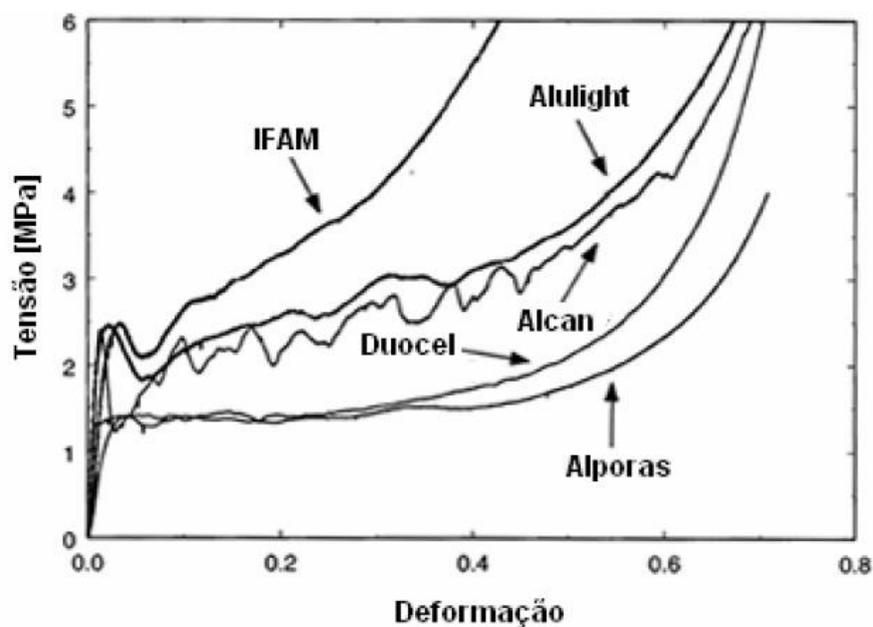


Figura 2.15. Curvas tensão/deformação para espumas de alumínio de diferentes densidades (Gibson et al., 1997).

Na Figura 2.15 é possível verificar que a tensão de *plateau* aumenta com o aumento da densidade. Gibson et al. (1997) indicam que o valor da tensão à compressão das espumas de alumínio varia habitualmente entre os 2 MPa e os 40 MPa, dependendo da densidade e tipo de estrutura celular que se está a analisar.

2.3.4. Absorção de energia

Como já foi referido inicialmente, uma das aplicações com maior potencial para o uso de espumas metálicas é em estruturas de absorção de energia. O facto de se poder controlar o comportamento tensão-deformação pelo intermédio da seleção adequada do material base, geometria celular e densidade relativa, torna-as num material ideal para este tipo de utilização (Duarte, 2005).

Ahmad (2009) estudou o comportamento de estruturas de absorção, nomeadamente de tubos com e sem enchimento de espuma metálica. Neste trabalho, o

mesmo definiu a energia absorvida, E_a , como sendo o integral da curva de deslocamento pela carga, como se segue.

$$E_a = \int_0^{\delta_{\max}} P \delta d\delta \quad (2.2)$$

onde P é a carga de esmagamento instantânea, δ e δ_{\max} são as distâncias esmagadas atual e máxima, respetivamente. Da equação (2.2), a carga média de compressão (P_m) pode ser determinada usando a seguinte expressão:

$$P_m = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} P \delta d\delta \quad (2.3)$$

Em geral, a carga de colapso pode ser definida como a carga necessária para causar deformação permanente. Esta deformação aumenta com o avanço do esmagamento. Um absorvedor ideal de energia pode ser representado com uma carga constante, P_{\max} , desde a fase inicial até à deflexão máxima, δ_{\max} . Assim, a capacidade de absorção de energia poderá ser calculada recorrendo à área da curva carga/deformação. A Figura 2.16 ilustra as características de um material ideal de absorção de energia, sujeito a carregamento axial.

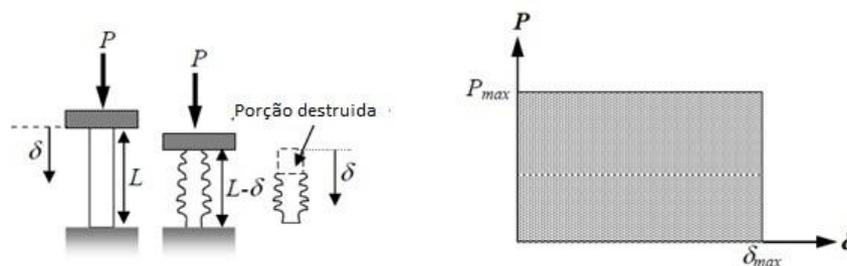


Figura 2.16. Comportamento de um absorvedor de energia ideal sujeito a carregamento axial (Ahmad, 2009).

Outro parâmetro útil na caracterização dos materiais celulares é a eficiência da energia absorvida. Este parâmetro permite a comparação da deformação da energia absorvida pelo material real com o componente equipado com material de absorção de energia “ideal”. Este absorvedor irá apresentar uma curva de compressão retangular, o que se traduz no alcance direto da extensão máxima admissível, mantendo-se constante durante todo o processo de deformação.

Duarte (2005) indica que a eficiência (η_{ef}) é dada pela seguinte relação:

$$\eta_{ef} = \frac{\int_0^{s'} F(s') ds'}{F_{\max}(s')s'} \quad (2.4)$$

em que F é a força, s' é a deformação e F_{\max} é a força mais elevada que ocorre acima da deformação s' . Em relação a esta eficiência, Ahmad (2009), acrescenta que no caso de um material ideal, este valor deverá ser o mais próximo possível de 100%. Do ponto de vista de deformação com absorção de energia, uma grande carga de esmagamento é desejável. Outro ponto que acrescenta este autor é que habitualmente os absorvedores de energia são capazes de absorver a energia desejada, mas que do ponto de vista prático, há a particularidade da carga inicial, que inicia o esmagamento, poder ser muito elevada (pico). Uma maneira de ultrapassar esta limitação é recorrendo a um mecanismo de iniciação, o qual irá reduzir o pico inicial de carga, aumentando, assim, a eficiência do carregamento.

Na Figura 2.17 está ilustrada a energia de impacto absorvida por volume inicial de espuma, em função da densidade. As três curvas representam as energias absorvidas após deformação compressiva ε , de 20%, 40% e 60%.

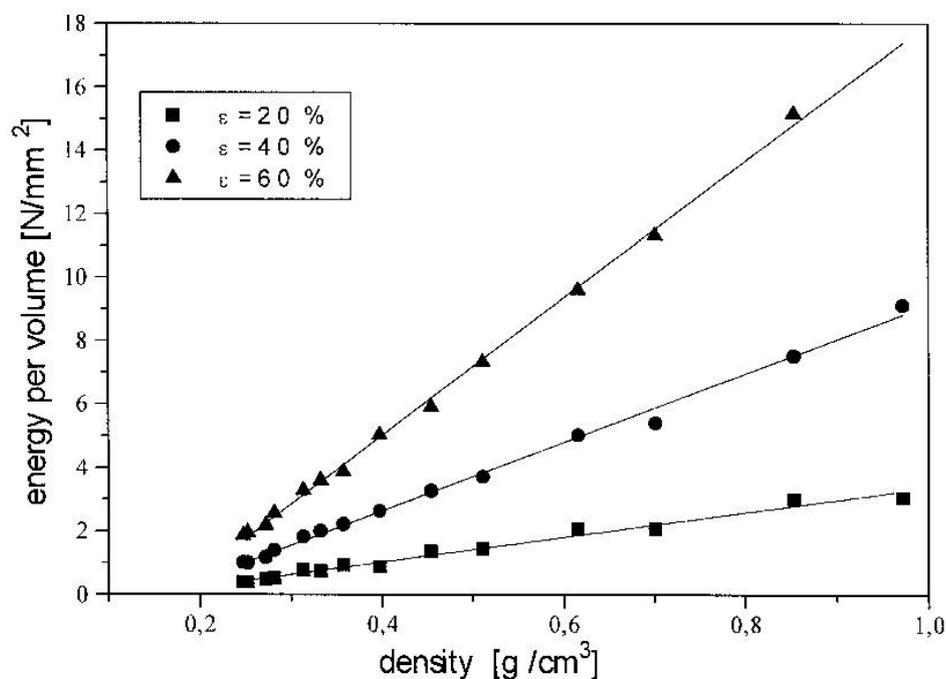


Figura 2.17. Energia absorvida por unidade de volume em espuma de alumínio AlSi12 (Baumeister et al., 1997).

Tipicamente, os valores de energia absorvida por unidade de volume, de espumas de liga de alumínio AlSi12, costumam variar entre os 1 MJ/m³ e os 8 MJ/m³ (Baumeister et al., 1997). A Figura 2.17 ainda permite verificar que o aumento da densidade conduz ao aumento da energia absorvida. Na análise experimental efetuada, foi possível verificar que a 10% de deformação, as espumas de alumínio com 20% de densidade relativa e geometria celular *Dual-size* e Uniforme, absorveram 1,2MJ/m³ e 0,5MJ/m³, respectivamente.

2.4. Aplicações

As aplicações para as espumas metálicas são imensas e têm vindo a aumentar nos vários sectores industriais com o avanço da avaliação das suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. De forma a avaliar a possível aplicação dum material tem de se ter em conta vários fatores, dos quais se destaca a morfologia (estrutura celular, porosidade, distribuição do tamanho de poros), a metalurgia (composição química e microestrutura do metal base), os processos de fabrico e ainda a economia (custos de produção e viabilidade para produção em escala industrial).

As espumas de células abertas, pelo facto de possuírem porosidade aberta, elevada área específica e baixa condutibilidade podem ser utilizadas, por exemplo, na indústria química como filtros, reservatório de fluidos ou permutadores de calor.

O sector dos transportes, em particular a indústria automóvel, utiliza, entre outras, espumas de alumínio, as quais já são usadas sob forma de componentes estruturais de baixo peso com a função de absorver e dissipar energia. Estes componentes ao serem incorporados num veículo contribuem para a diminuição do consumo de combustível, conseqüente da redução do peso, e podem ter a função de dispositivo de segurança passiva de passageiros. As espumas sob forma de painéis tipo sanduíche podem ser integradas ao nível de reforço da carroçaria, barras protetoras frontais e laterais, pisos e tetos, podendo realizar várias funções tais como absorção de energia de impacto, absorção de vibrações, amortecimento sonoro e dissipação de calor. Outro fator interessante é que, pelas características que estes materiais apresentam, os mesmos podem ser usados de forma a gerar resistência suficiente para evitar deformações torsionais e até vibrações. Dos grandes fabricantes automóveis, a Mercedes-Benz já tem uma linha de produção de componentes em espuma de alumínio, os quais são incorporados no modelo CLK. O consórcio Karmann

– BMW está a testar estruturas do tipo sanduíche para integração nos seus automóveis. Outras marcas tais como a Renault e a Fiat, também têm projetos de investigação nesta área, procurando desenvolver componentes estruturais principalmente em alumínio e titânio (Duarte, 2005).

No caso da indústria aeroespacial, a Boeing (EUA) está a estudar estruturas celulares de alumínio e titânio com o objetivo de substituírem alguns componentes. A produção de vedantes e pás de turbina são alguns dos exemplos de componentes onde esta tecnologia foi aplicada (Banhart, 2000).

A indústria espacial tem testado estruturas de impacto e absorção de energia (por exemplo os calços de aterragem de veículos espaciais) e reforços das estruturas de recolha de amostras nos satélites, de forma a substituírem os componentes que têm dificuldade em resistir às condições adversas do espaço.

A indústria da construção naval também pode ser muito beneficiada com a aplicação destes materiais. Atualmente já é possível a construção total de um navio recorrendo a alumínio extrudido, folhas e estruturas celulares do tipo favo de mel. Os painéis sanduíche de grandes dimensões também têm sido utilizados em substituição de estruturas tais como plataformas elevatórias e de antenas, anteparas estruturais e compartimentos pirotécnicos (Duarte, 2005).

2.5. Caracterização Dinâmica de Materiais

Os ensaios de caracterização dinâmica dos materiais são importantes para muitas aplicações de engenharia e em operações de conformação metálica. Em aplicações estruturais, vários componentes têm de ser desenhados de forma a poderem trabalhar numa vasta gama de taxas de deformação e temperaturas. Por isso, os materiais constituintes devem ser caracterizados a taxas de deformação e temperaturas semelhantes às das aplicações.

A Figura 2.18 apresenta alguns dos ensaios que podem ser aplicados na caracterização de materiais, para várias gamas de taxa de deformação.

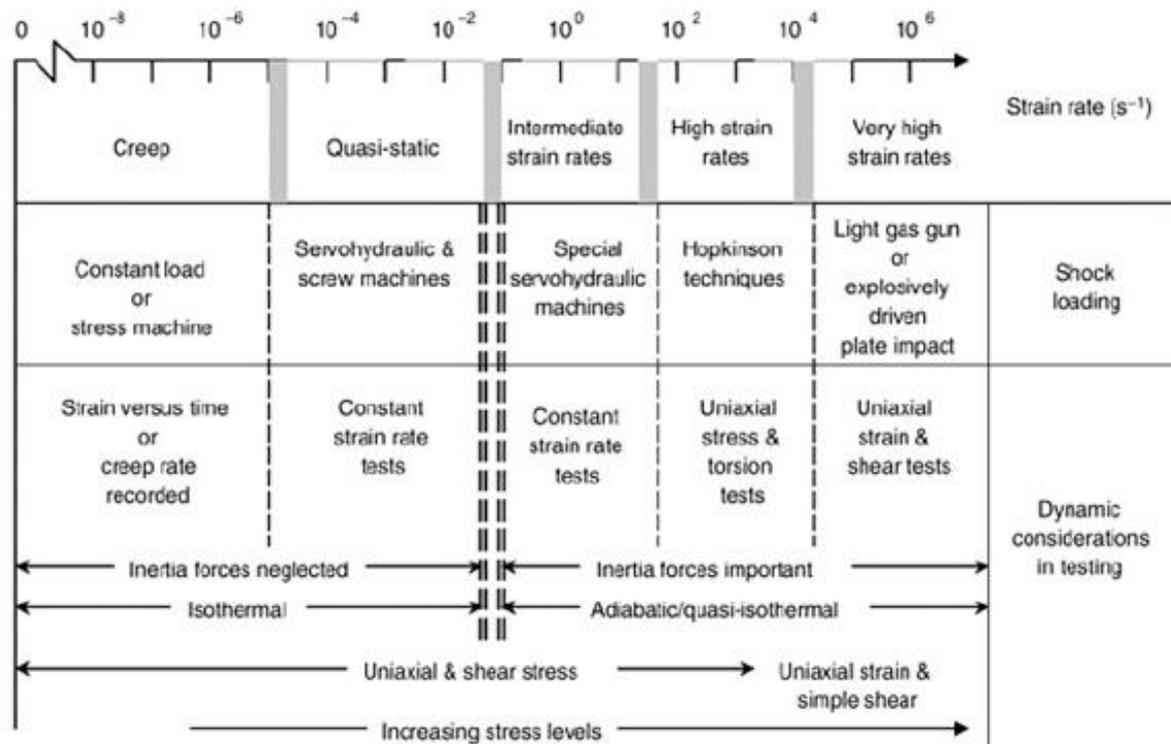


Figura 2.18. Tipos de Ensaio aplicáveis às várias gamas de taxa de deformação (ASM Handbook, 2000).

Nos pontos seguintes efetua-se uma breve descrição de alguns tipos de ensaios dinâmicos, com maior realce na descrição da técnica de Hopkinson a qual foi utilizada para caracterizar dinamicamente os materiais ensaiados neste trabalho.

2.5.1. Ensaios a baixa taxa de deformação

Para a execução deste tipo de testes, o melhor exemplo é o ensaio de Charpy-Izod, o qual considera que a taxa de deformação não deverá ultrapassar o valor de 10s^{-1} . Este é habitualmente utilizado para determinar a quantidade de energia absorvida em materiais a serem usados em estruturas sujeitas a carregamentos quasi-estáticos. Este teste é adequado para a avaliação precisa de metais e polímeros, mas não se adequa a materiais de elevada fragilidade tais como o vidro e cerâmica (Cardoso, 2005).

2.5.2. Ensaios a média taxa de deformação

No caso de se pretender executar ensaios nesta gama de taxas de deformação, a técnica mais recorrente é o ensaio de queda de peso, no qual quando a aceleração do projétil é apenas gravitacional, as taxas de deformação encontram-se muito próximas do ensaio de Charpy (até 40s^{-1}). No entanto, se for imposto algum tipo de aceleração, velocidades de impacto entre 5 m.s^{-1} e 25 m.s^{-1} poderão ser atingidas, proporcionando taxas de deformação na ordem dos 100s^{-1} . Outro fator a considerar é a instrumentação destes equipamentos. Esta é relativamente fácil e confiável, sendo um ensaio de elevada reprodutibilidade para materiais frágeis. Normalmente, estes ensaios são reproduzidos em laboratório, recorrendo para tal, a equipamento servo-hidráulico de alta velocidade e/ou de queda de peso (Cardoso, 2005).

2.5.3. Ensaios a elevada taxa de deformação

Muitas operações de conformação mecânica, bem como vários tipos de aplicações industriais (transportes e militares) necessitam do conhecimento prévio das propriedades dos materiais em carregamentos elevados e a várias taxas de deformação. Assim, de modo a poder determinar as propriedades dos materiais, houve a necessidade de desenvolvimento de técnicas de análise a elevadas taxas de deformação. Muitos foram os ensaios propostos deste a altura da 2ª Guerra Mundial, dentro dos quais se destacam: o método de Taylor de impacto de cilindros; os aceleradores lineares de impacto como as barras de Davies e de Hopkinson/ Kolsky; os canhões a gás de vários estágios e os dispositivos com cargas explosivas. Contudo, o método de Taylor não permite taxa de deformação constante durante os ensaios, e os canhões a gás e dispositivos com explosivos têm elevados custos associados (Cardoso, 2005). Deste modo, os ensaios que recorrem a barras ocupam o lugar de dispositivos de análise de materiais a altas taxas de deformação, mais utilizados em laboratórios civis e militares. Pode-se destacar a sua utilização no estudo de materiais para munições e blindagens, bem como para verificação do desempenho de componentes estruturais da indústria dos transportes.

A técnica das barras de Hopkinson tem grande aceitação como equipamento de ensaio a elevada taxa de deformação, por ter a possibilidade de se manterem os valores da taxa de deformação em condições de deformação uniforme (Ashby et al., 2000).

2.5.3.1. Barra de Hopkinson (SHPB)

De acordo com o referido no ponto 2.5.3, a barra de Hopkinson é um dos métodos de teste utilizados para a determinação do comportamento dos materiais a elevadas taxas de deformação. Embora o sistema já tenha sido descoberto à muitos anos (início do século XX), só nas últimas décadas é que se verificaram progressos significativos no uso desta técnica de análise. Na altura, Hopkinson estava à procura de uma forma de medir a pressão produzida pelo impacto de uma bala, e pela detonação de explosivos (Jonhson, 2005).

Muito resumidamente, a estrutura do sistema de teste de Hopkinson consiste em duas barras, nas quais é intercalado o provete do material que se deseja ensaiar. Na extremidade de uma das barras (barra incidente ou *input bar*), é recebido um impacto por uma terceira barra (projétil), o qual irá produzir uma onda de compressão que se irá propagar ao longo da barra (Fig. 2.19). Nesta, parte da onda de compressão irá ser refletida, na passagem pelo provete, pelo facto de ser constituído de material e dimensões diferentes. Outra parte irá ser transmitida à segunda barra (barra transmitida ou *output bar*).

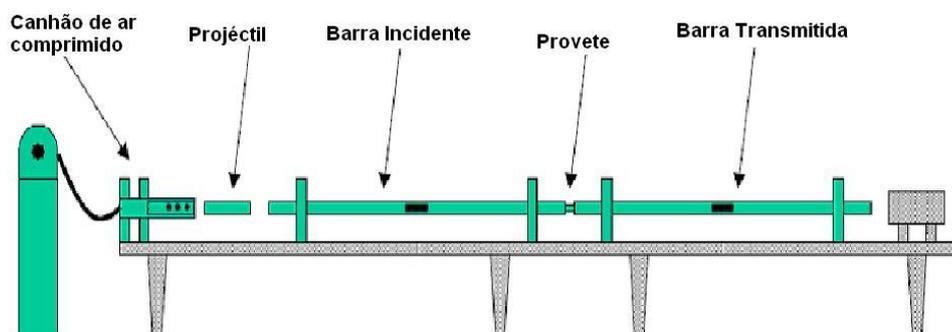


Figura 2.19. Esquema de montagem experimental do SHPB (Esteves,2011).

De forma a captar a intensidade e tempo de passagem das ondas de compressão, a barra incidente e transmitida são equipadas com estações de extensometria, as quais, por sua vez, estão conectadas ao osciloscópio (Fig.2.20 b) (Esteves, 2011).

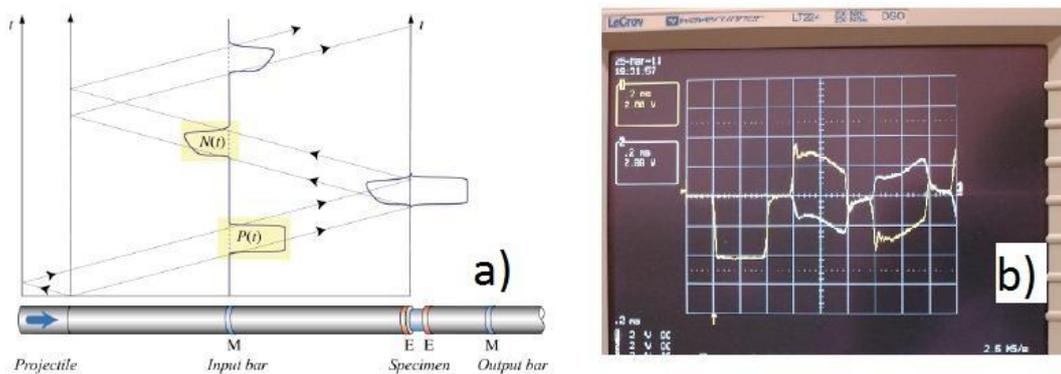


Figura 2.20. a) Diagrama exemplificativo das ondas de choque; b) Visualização no Osciloscópio (Esteves, 2011).

Através da análise das ondas incidente, transmitida e refletida, captadas pelas estações de extensometria, é possível tirar conclusões relativamente às propriedades mecânicas dos materiais ensaiados.

Para se poderem efetuar ensaios na barra de Hopkinson existem alguns pressupostos que têm de ser verificados, de forma aos ensaios serem realizados em condições padrão. Um destes pressupostos assume que a tensão nas barras seja inferior à tensão limite elástica do material que as constitui. Assim, a tensão no provete, a deformação e a taxa de deformação poderão ser calculadas a partir das ondas obtidas nos ensaios experimentais.

Relativamente à teoria que fundamenta a utilização desta técnica, Kaiser (1998) realizou uma pesquisa sobre os desenvolvimentos no ensaio da barra de Hopkinson, onde indica que Kolsky desenvolveu a seguinte relação que permite o cálculo da tensão, em função do tempo, no provete:

$$\sigma_s(t) = E \frac{A_0}{A} \varepsilon_T(t) \quad (2.5)$$

Nesta expressão, E é o módulo de elasticidade da barra transmitida, A_0 é a área de secção transversal da barra transmitida, A é a área de secção transversal do provete e $\varepsilon_T(t)$ é a onda de deformação transmitida. A taxa de deformação no provete pode ser calculada recorrendo à seguinte expressão:

$$\frac{d\varepsilon_s(t)}{dt} = -\frac{2C_0}{L} \varepsilon_R(t) \quad (2.6)$$

onde $\varepsilon_R(t)$ é a onda refletida na barra incidente, L é o comprimento inicial do provete, e C_0 é a velocidade de propagação de onda da barra incidente a qual poderá ser obtida com recurso a:

$$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.7)$$

em que E e ρ são o módulo de elasticidade e a densidade, da barra, respetivamente. De forma a poder obter a deformação no provete é efetuada a integração em ordem ao tempo da expressão (2.6), na qual se obtém a seguinte expressão:

$$\varepsilon_S(t) = -\frac{2C_0}{L} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt \quad (2.8)$$

Na sequência desta breve exposição teórica é interessante mencionar que embora estas expressões já sejam conhecidas à mais de 40 anos, só recentemente é que foi possível fazer avanços nesta área, devido ao aumento significativo na capacidade de processamento dos computadores (Wu et al., 1997).

São vários os autores que estudaram esta matéria. Como referência, indica-se o pioneiro Herbert Kolsky, o qual publicou em 1963 um trabalho intitulado "Stress Waves in Solids". Este autor é considerado uma referência na área de propagação de ondas em sólidos. Mais recentemente, Palamidi (2010) realizou uma pesquisa na qual explica o ensaio de materiais celulares com recurso à barra de Hopkinson. Gama et al. (2004) também estudaram a barra de Hopkinson, tendo pesquisado e apresentado os vários desenvolvimentos que têm sido alcançados nesta área. O autor Kaiser (1998) também realizou um estudo sobre a barra de Hopkinson. Este autor indica os avanços realizados nesta área, explicando a propagação de ondas, apresenta o aparato experimental e a forma de se interpretar os dados para obtenção da tensão, da taxa de deformação e da deformação no provete.

3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão explicados os vários equipamentos, materiais e procedimentos experimentais utilizados.

3.1. Material e Processo de Fabrico

Os materiais utilizados neste estudo foram produzidos no Laboratório de materiais funcionais da Universidade do Minho, através de um processo de fundição de cera perdida. Na Figura 3.1 está ilustrado o processo completo, seguido de breve explicação das várias etapas.

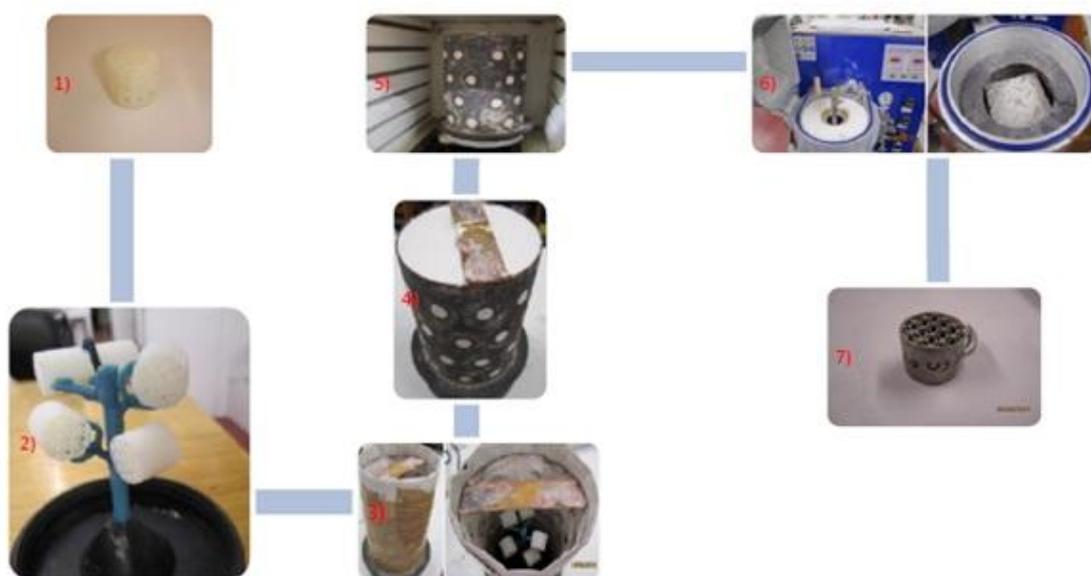


Figura 3.1. Etapas da fundição por ceras perdidas das espumas de alumínio (Carvalho, 2012).

A primeira etapa consiste na realização da prototipagem rápida do modelo CAD, na qual se obtém uma peça com a mesma geometria da espuma final, mas feito de material proveniente da prototipagem. A segunda etapa consiste na montagem de uma árvore de fundição, a qual é composta pelos canais de alimentação, bem como pelos objetos de geometria igual à da espuma. Na terceira etapa é realizada toda a moldagem do conjunto e na quarta etapa, a moldagem é preenchida por uma mistura de gesso e água. Após seca a mistura a moldagem anterior é colocada num forno, para que a cera proveniente da prototipagem possa escoar ficando, assim, com o “negativo” da espuma. A

sexta etapa consiste na fundição do metal e posterior vazamento para dentro da moldagem. Por último, de modo a ficar somente a espuma, tal e qual como a estrutura desenhada em CAD, o gesso é removido, ficando a espuma metálica desejada (Carvalho, 2012).

De forma a garantir a total ausência de material cerâmico no interior dos provetes, estes poderão ser submersos numa solução ácida (fraca), a qual irá dissolver qualquer resto de material cerâmico.

Na Figura 3.2 são apresentados os provetes utilizados na realização dos ensaios experimentais.

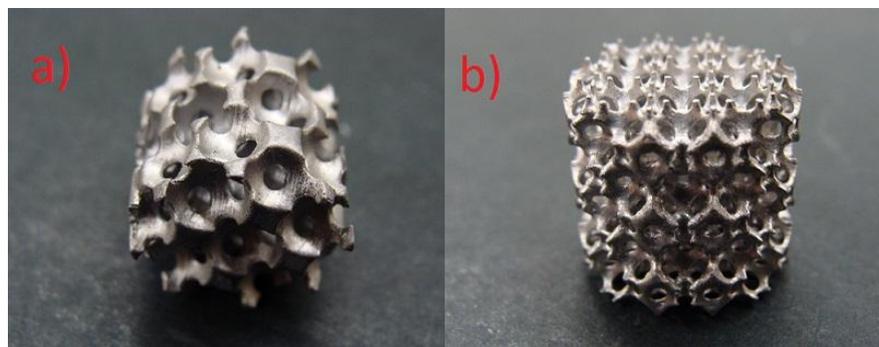


Figura 3.2. Provetes a)US20% e b)DS20%.

Ao observar os provetes, os mesmos podem ser descritos como sendo de dois lotes diferentes, o qual foi verificado e confirmado experimentalmente. O primeiro lote era constituído por provetes de espuma de células uniforme e *dual-size*, e por um conjunto de tubos com núcleo das mesmas espumas, todos produzidos na liga AlSi12. O segundo lote era composto por provetes de espumas US e DS, embora este tenha sido produzido com uma liga de alumínio diferente (Al6000). Foi observado que o primeiro lote tinha um comportamento algo frágil. Alguns dos provetes de espuma desfizeram-se quando ligeiramente pressionados entre os dedos. O segundo lote recebido apresentou melhoria no comportamento, não se tendo verificado o comportamento frágil do primeiro lote.

3.2. Montagem Experimental

3.2.1. Sistema SHPB do DEM

Como referido no capítulo 2, o sistema de barra de Hopkinson (SHPB) permite a medição da força aplicada, com uma determinada velocidade de impacto. De forma a poder determinar a deformação provocada pela passagem das ondas de impacto nas barras, as barras incidente e transmitida foram previamente instrumentadas.



Figura 3.3. Vista geral da zona de ensaios da SHPB e respetivo equipamento eletrónico (Esteves,2011).

As Figuras 3.3 e 3.4 mostram o equipamento utilizado. Na vista geral do equipamento experimental (figura 3.1) é possível observar os dois sistemas de Barras de Hopkinson (1 e 2), o osciloscópio Lecroy LT224 (3), amplificador de sinais Vichay 2210A (4) e o computador de visualização de imagens obtidas pela câmara de alta velocidade Photron (5). O impacto inicial, que provoca a onda de compressão a qual se propaga ao longo da barra, é realizado pela barra designada de projétil (8), ou impactador, que é carregada no canhão de ar comprimido (9), disparado a partir da consola (10). A velocidade com que o projétil incide na barra incidente (“input”) é registada no velocímetro (6), a qual é calculada por intermédio da diferença de tempo entre a interrupção do sinal de dois feixes laser (7), conhecendo-se a distância entre ambos (Figura 3.4).

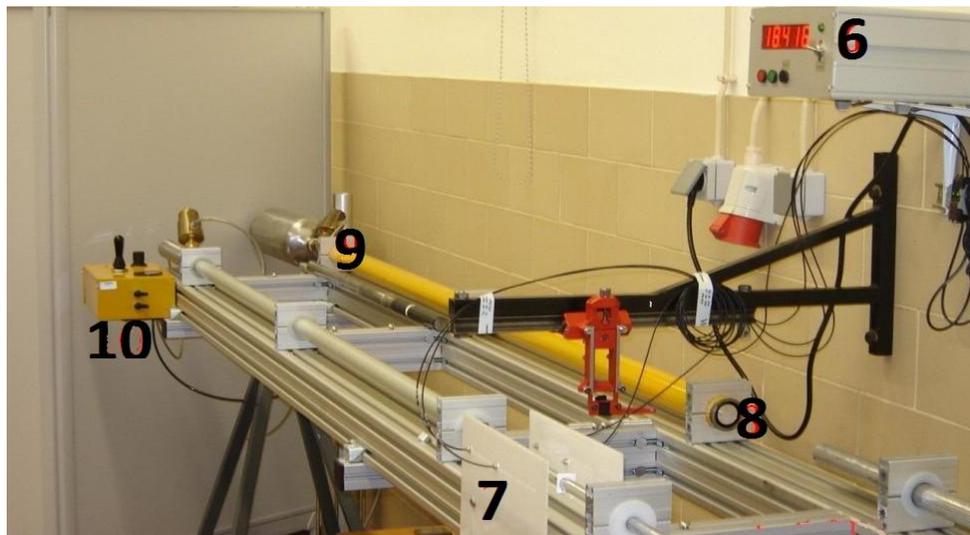


Figura 3.4. Velocímetro (6 e 7), Saída do Projétil (8), Consola de Disparo (10) e Reservatório de Ar (9) (Esteves, 2011).

A consola de comando, Figura 3.5, permite o controlo da pressão do depósito de ar (14), que é definido no regulador de pressão (11) e visualizado no manómetro (13). Quando a pressão está definida para um determinado valor é executado o disparo na alavanca (12), que aciona uma válvula (15), a qual deixa o ar do reservatório impulsionar o projétil.

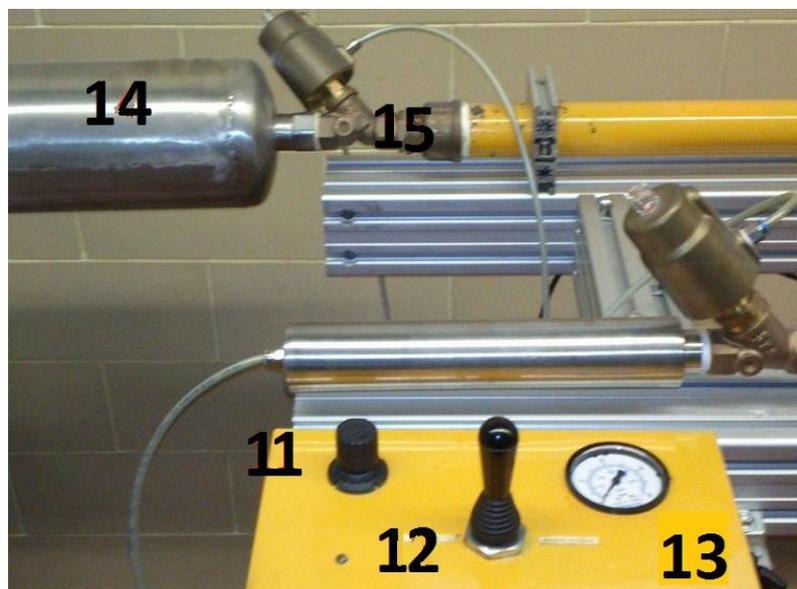


Figura 3.5. Vista geral da Consola de Disparo.

Por intermédio destes dispositivos é possível realizar ensaios em que a velocidade de disparo seja a mesma para as várias repetições. Além dos ensaios referidos,

foram efetuados ensaios de calibração, a diferentes pressões, que serviram para se poder desenhar um gráfico de pressão / velocidade de disparo (ver Figura 3.6)

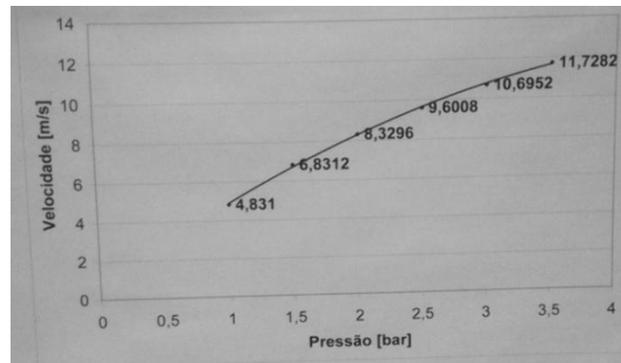


Figura 3.6. Gráfico Pressão do reservatório/ Velocidade de disparo do projétil.

Pelo facto da energia de impacto ser função da velocidade e da massa do projétil, a consulta deste gráfico facilitou a definição aproximada da velocidade de impacto antes de se realizar o ensaio, visto a pressão de ar no depósito ser regulável.

O sistema utilizado para realizar os testes de impacto nos provetes ensaiados é composto por três barras. O projétil tem 1 metro de comprimento, enquanto as barras incidente e transmitida têm 3 metros cada. De referir, ainda, que as barras foram previamente faceadas, de forma a garantir a perpendicularidade com o eixo da barra.

Neste sistema de Hopkinson, foram utilizados dois conjuntos de barras, dependendo do tipo de provete a ser ensaiado. Os provetes de espumas com parede (16,6mm diâmetro) foram ensaiados com as barras de alumínio de 30mm de diâmetro. Os provetes de espumas sem parede (<16mm) foram ensaiados com o conjunto de barras de Hopkinson de alumínio com 16mm de diâmetro. A escolha das barras foi efetuada com base no diâmetro dos provetes a ensaiar, o qual não poderia ser superior ao das barras. Também foi considerado o material a testar. Foram selecionadas barras de material semelhante (alumínio) atendendo à proximidade das impedâncias características. As propriedades dos materiais constituintes dos provetes e das barras de alumínio encontram-se em anexo.

A recolha dos dados provenientes do ensaio dinâmico foi realizada com recurso à utilização de extensómetros de dupla grelha, do tipo folha, com uma resistência por grelha de $120\Omega \pm 0,4\%$ da marca Micro-Measurements (ver figura 3.7a), cujo circuito

foi montado na forma de ponte Wheatstone. Este circuito é de comum utilização para a leitura de deformações produzidas em extensómetros, quer em ensaios estáticos, quer dinâmicos.

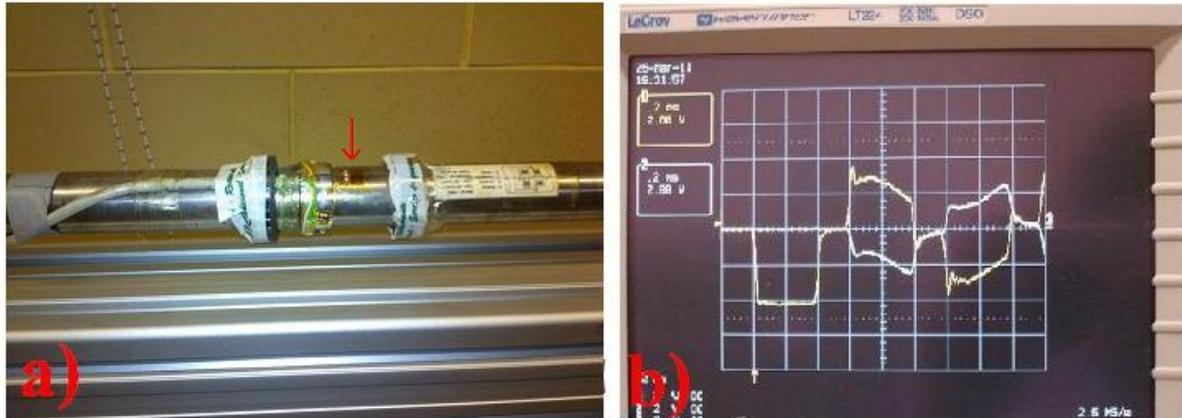


Figura 3.7. a) Extensómetro Micro-Measurements aplicado na barra 30mm; b) Sinais obtidos no osciloscópio.

De forma a ser possível a leitura dos sinais provenientes dos extensómetros (Figura 3.7a), recorreu-se ao amplificador Vishay, anteriormente referido, que para além de alimentar as estações de extensometria, com uma tensão, $V_{in}=3\text{Volt}$, amplificou o sinal de saída, V_{out} , 1000 vezes antes de ser recolhido pelo osciloscópio. Caso esta amplificação não fosse utilizada dificilmente seria possível a sua leitura no osciloscópio. Outra razão para a utilização deste amplificador é que o mesmo também é responsável por estabilizar as estações, de forma a assegurar que as tensões de saída sejam zero ($V_{out}=0\text{ volt}$).

Após recolha dos sinais no osciloscópio, estes foram exportados para um computador, para posteriormente serem tratados em software específico.

3.2.2. DAVID® - Software de tratamento de dados

O programa *DAVID*®, construído em linguagem Labview, foi desenvolvido pelo Professor Dr. Gérard Gary, da École Polytechnique em França, e permite a realização de uma análise completa dos ensaios realizados num sistema de barra de Hopkinson, executando uma análise numérica dos dados recolhidos pelo osciloscópio. Este sistema permite que as barras e o projétil sejam construídos em diferentes materiais, admitindo ainda a possibilidade de definição da flexibilidade das barras (Esteves, 2011).

De forma a permitir o tratamento de dados foram definidos vários parâmetros tais como o diâmetro, comprimento, densidade, módulo de elasticidade e velocidade de

propagação de ondas das três barras, a distância dos extensómetros à interface das barras e a razão deformação /tensão (ϵ/V_0) que rege o funcionamento destes.

Após realização dos ensaios e recolha dos dados obtidos no osciloscópio, correspondentes à onda incidente, transmitida e refletida, foram também inseridos a área de secção transversal, a espessura e o peso do provete bem como a velocidade de disparo do projétil. Na Figura 3.8 é possível visualizar algumas das fases do programa *DAVID*[®].

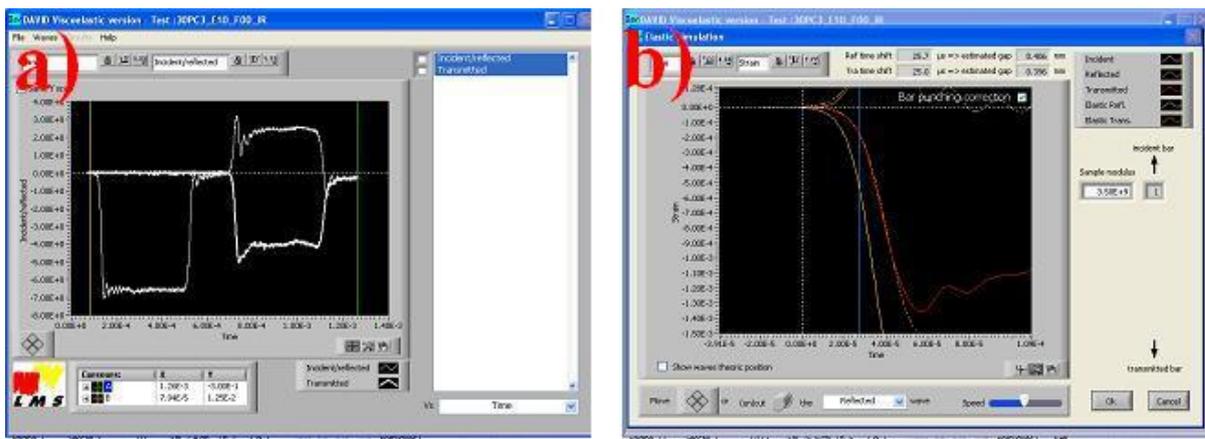


Figura 3.8. Software *DAVID*[®]: a) Ondas exportadas do osciloscópio; b) Fase de aproximação de onda teórica com onda recolhida (Esteves, 2011).

A Figura 3.8 a) ilustra as ondas obtidas no osciloscópio e posteriormente exportadas para análise no *DAVID*[®]. Na figura 3.8 b) é possível a observação de uma das etapas do programa a qual executa, graficamente, a aproximação das ondas recolhidas no ensaio, com as ondas teóricas que foram calculadas pelo software. De forma a perceber melhor o funcionamento do software (algoritmos, configurações, análise de ondas, etc.) recorreu-se ao manual “*DAVID Labview version, User's Manual – version 9106*”

3.2.3. PHOTRON - Análise em câmara de alta velocidade

Cada vez mais, na indústria nos deparamos com fenómenos que sucedem a uma velocidade bastante elevada. O olho trabalha a 30 fotogramas por segundo, escapando-se muitos destes fenómenos à perceção humana. A filmagem de alta velocidade permite ver em câmara lenta, eventos muito rápidos, com a ajuda de câmaras capazes de gravar até um milhão de fotogramas por segundo, permitindo assim o estudo de fenómenos ultrarrápidos.

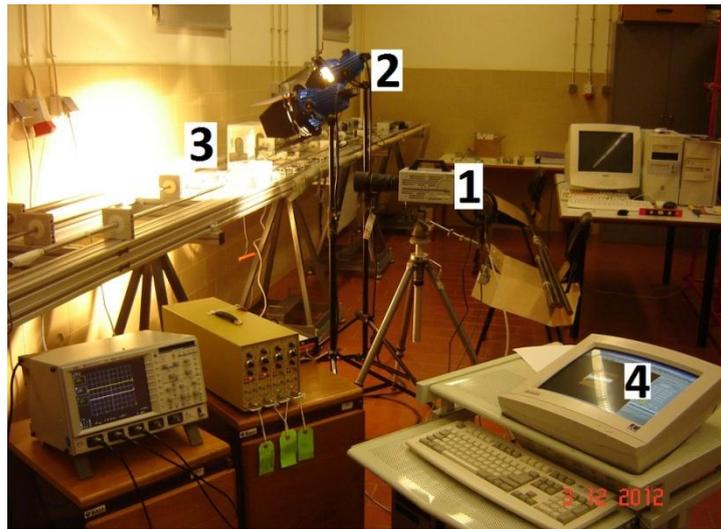


Figura 3.9. Aparato para captação de imagens com câmara de alta velocidade Photron.

A Figura 3.9 mostra o aparato utilizado para a captação de imagens com câmara de alta velocidade. A imagem anterior foi retirada durante a realização de um ensaio. Para proceder à captação das imagens (filme do impacto) foi utilizada uma câmara Photron FastCam SA3 (1) configurada a 10.000 fotogramas por segundo e resolução de 512x256 pixel. De forma a obter um bom contraste recorreu-se a dois projetores de halogéneo de 500Watt (2), os quais incidem diretamente sobre o provete (3). As imagens são recolhidas e tratadas no computador (4), onde se encontra instalado o software PHOTRON PFV, que permite a exportação de imagens e filmes.

A principal vantagem associada à utilização de filmagem de alta velocidade é que permite verificar se o ensaio correu como esperado, sendo possível analisar o comportamento das interfaces com o provete, e ver como ocorreu a deformação do material.

3.3. Procedimento experimental

Nesta secção é descrito todo o procedimento que foi utilizado para efetuar os ensaios, bem como o processo do tratamento de dados.

A primeira fase consiste na observação direta dos provetes fornecidos de forma a verificar se existem defeitos visíveis que possam influenciar os resultados, no qual se faz exclusão dos que apresentem diferenças significativas.

De seguida é efetuada a medição com um paquímetro de todos os provetes a ensaiar, anotando-se todas as dimensões características (diâmetro e comprimento). É ainda efetuada a pesagem de forma a determinar a densidade relativa de cada provete.

A fase seguinte é o ensaio propriamente dito. Neste, o provete é intercalado entre as barras incidente e transmitida do sistema SHPB. De forma a minimizar os efeitos do atrito entre a interface das barras e do provete foi utilizado um lubrificante (massa consistente). Seguidamente foi feita a regulação da pressão de ar do depósito de acordo com a velocidade de impacto desejada.

No momento que antecede o disparo do canhão, é equilibrado a ponte de Wheatstone de cada uma das estações de extensometria, prepara-se a câmara de alta velocidade e coloca-se o osciloscópio em modo de gravação a aguardar pelo sinal de *trigger* que, por sua vez, depende do instante de disparo.

Após disparo do canhão, é anotado o valor da velocidade de impacto e recolhidos os dados do osciloscópio para posterior tratamento pelo software *DAVID*[®]. No entanto, de forma a verificar se o ensaio correu dentro do esperado, é efetuada a visualização das imagens obtidas pela câmara de alta velocidade, nas quais se observa o modo de deformação do provete. Se houver algo que tenha corrido mal no ensaio (por exemplo barras desalinhas, deformação anormal resultante de defeitos no provete, etc.), o ensaio não é considerado para efeitos de tratamento de dados.

Se todos os passos até agora forem positivos, ou seja, se tudo tiver corrido conforme esperado, os dados são tratados no programa *DAVID*[®]. É realizada a aproximação da onda teórica calculada pelo software, com a onda obtida do ensaio de impacto na SHPB. Define-se, aproximadamente, por intermédio de aproximação gráfica, o módulo de Young relativo do material ensaiado.

Após comparação através do software, das ondas teóricas com as ondas obtidas, os dados são exportados para folhas de cálculo sendo traçados os gráficos

desejados. Embora seja possível elaborar diversas combinações de parâmetros, foi dada maior relevância à relação tensão/deformação, que no fim acaba por ser a que irá ser analisada e comparada neste estudo experimental.

3.4. Descrição dos provetes e velocidade de ensaio

Nesta secção são descritos as características individuais de todos os provetes utilizados, bem como a velocidade de impacto do projétil com que cada um foi ensaiado.

As espumas de Alumínio utilizadas nos ensaios experimentais a elevadas taxas de deformação, no sistema de barras de Hopkinson, diferenciam-se na sua estrutura celular, *Dual-size* e *Uniform-Size*, na densidade relativa, 20% e 60% e em dois tipos de Alumínio distintos, Al6000, tabela 3.1 e AlSi12, tabela 3.2. As restantes propriedades e características destas ligas encontram-se em anexo.

Tabela 3.1. Composição química da liga de Alumínio AlSi12.

	Si	Cu	Fe	Mg	Zn	Ni	Al
Peso (%)	11,0 - 13,00	1,0	1,0	0,10	0,40	0,50	balanço

Tabela 3.2. Composição química da liga de Alumínio Al6000.

	Si	Cu	Fe	Mg	Zn	Ni	Al
Peso (%)	0,2 - 1,8	0,01-1,2	0,04-1,0	0,2-1,6	0,03-2,4	0,03-2,4	balanço

Na nomenclatura utilizada na identificação dos provetes, atribuída na produção dos mesmos, retira-se a informação do tipo de geometria da espuma, US- *Uniforme-Size* e DS- *Dual-Size*, e da sua densidade relativa, 20% ou 60%.

3.4.1. Geometria Uniforme

Nas tabelas 3.3 e 3.4 encontram-se descritas as características individuais para cada provete utilizado, em Al6000 e AlSi12, com geometria US, com diferentes densidades relativas, 20% e 60%, bem como a velocidade de impacto do projétil com que cada um foi ensaiado.

Tabela 3.3. Provetes de espuma US de densidade relativa de 20% e 60% de AlSi12.

	$V_{proj.}$ [m/s]	Massa [g]	Diam. [mm]	Comp. [mm]	Dens. [g/mm ³]
US20%_P6	6,672	1,53	15,00	15,60	0,000551
US20%_6A	6,479	1,35	15,50	16,25	0,000440
US20%_6B	5,831	1,34	15,50	16,30	0,000436
US60%_P18	7,367	2,21	15,50	15,40	0,000761
US60%_18A	6,173	2,14	16,00	16,30	0,000635

Tabela 3.4. Provetes de espuma US de densidade relativa de 20% e 60% de Al6000.

	$V_{proj.}$ [m/s]	Massa [g]	Diam. [mm]	Comp. [mm]	Dens. [g/mm ³]
4-US20%	6,333	1,06	14,02	15,01	0,000457
14-US60%	6,334	1,78	15,02	15,20	0,000661
15-US60%	6,284	1,69	15,01	15,20	0,000628

Pela observação dos valores que constam nesta tabela, é possível verificar que provetes do mesmo tipo de categoria apresentam algumas diferenças nas características, tais como variação na massa e nas dimensões. Estas variações são tidas em conta no momento em que são tratados os dados no software *DAVID*[®] para a caracterização do material que as constitui.

**Figura 3.10.** Provetes de espuma US20% e US60%.

Na Figura 3.10 são mostrados provetes com diferentes configurações que foram ensaiados sendo possível visualizar as diferenças entre as espumas US20% e US60%. A alteração da estrutura é efetuada na variação do raio das esferas (enchimentos) que compõem esta estrutura tipo FCC.

3.4.2. Geometria *Dual-size*

Nas tabelas 3.5 e 3.6 encontram-se descritas as características individuais dos provetes de espuma sem parede com geometria celular DS com densidade relativa de 20% bem como a velocidade do projétil com que cada um foi ensaiado.

Tabela 3.5. Provetes de espuma DS de densidade relativa 20% de AlSi12

	$V_{proj.}$ [m/s]	Massa [g]	Diam. [mm]	Comp. [mm]	Dens. [g/mm ³]
DS20%-P23	6,155	1,50	15,2	15,35	0,000539
DS20%-24A	6,183	1,13	15,5	15,5	0,000386
DS20%-24B	6,098	1,54	16,0	16,1	0,000476

Tabela 3.6. Provetes de espuma DS de densidade relativa 20% de Al6000

	$V_{proj.}$ [m/s]	Massa [g]	Diam. [mm]	Comp. [mm]	Dens. [g/mm ³]
9-DS20%	6,281	1,16	15,0	15,1	0,000435
10-DS20%	6,694	1,02	14,9	15,4	0,000379

A Figura 3.11 mostra duas perspectivas de um provete de espuma DS. A sua observação permite-nos verificar que o material não é completamente regular, havendo algumas diferenças visuais entre os diversos provetes. Estas variações (defeitos) poderão conduzir a alguma instabilidade nos resultados obtidos visto se tratar de estruturas de elevada complexidade estrutural.



Figura 3.11. Provetes de espuma DS20% (duas perspectivas).

3.4.3. Espuma com parede US e DS

Neste ponto são apresentados os dados relativos aos provetes de espuma com parede e geometria celular Uniforme e *Dual-size*, bem como a velocidade de impacto do projétil com que cada um foi ensaiado, tabela 3.7.

Tabela 3.7. Provetes de Espuma US e DS de densidade relativa 20% de AlSi12.

	$V_{proj.}[m/s]$	Massa [g]	Diam.[mm]	Comp.[mm]	Dens.[g/mm ³]
US1_20%	6,286	3,23	16,4	15,7	0,000974
US2_20%	6,390	2,73	16,2	15,8	0,000838
DS1_20%	5,826	2,42	16,0	14,4	0,000836
DS3_20%	6,882	2,74	16,4	14,3	0,000904
DS4_20%	6,047	2,67	16,6	15,0	0,000822

Estes provetes possuem núcleo em espuma de alumínio com densidade relativa de 20% para a geometria US e 20% para a geometria celular DS.

A produção dos provetes, espuma e tubo, foi efetuada de forma integrada. A espuma e tubo foram fundidos no mesmo molde constituindo, assim, uma peça única (Figura 3.12).



Figura 3.12. Provede de espuma US20% com parede.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Como foi referido anteriormente, o objetivo deste trabalho é a análise do comportamento de espumas de alumínio de células abertas com geometrias US e DS sujeitas a elevadas taxas de deformação e comparar as estruturas celulares de modo a concluir qual delas tem melhor comportamento a solicitações dinâmicas.

Atendendo a que este trabalho se inserir num projeto de investigação que está a ser realizado em parceria com a Universidade do Minho, houve a necessidade de trabalhar com provetes de dimensões e características controladas, os quais foram produzidos no laboratório de materiais funcionais dessa mesma universidade.

Dado ser um estudo produzido no seguimento de anteriores desenvolvimentos no âmbito deste projeto, é previsto um comportamento para resultados obtidos, fundamentado na bibliografia consultada.

Kou et al. (2000) e Pinto et al. (2014) no trabalho realizado, ambos verificam que o comportamento da geometria celular DS é superior à da geometria uniforme, para semelhante densidades relativas equivalentes. Gameiro et al. (2007) realizaram um estudo no qual é analisado o efeito apresentado por um núcleo em espuma de baixa densidade em tubos de pouca espessura, mostrando a ação de interação entre a parede do tubo e o núcleo de espuma. Ai se mostra que as cargas que provocam o esmagamento do núcleo de espuma são superiores à soma das cargas separadamente que provocam o esmagamento do tubo e da espuma. No estudo efetuado por Amhad (2009), onde se analisou o comportamento de materiais semelhantes (tubos com núcleo em material celular), também foi obtido resultado idêntico. Yamada (2005) também analisou o comportamento de tubos com núcleo em espuma de alumínio, tendo também verificado que o enchimento de espuma causa um efeito de interação com as paredes, sendo a energia absorvida por um tubo com espuma de alumínio superior à soma dos dois atuando separadamente. Acrescentou ainda que este efeito de interação poderá ser influenciado por diversos parâmetros tais como a densidade da espuma, propriedades dos materiais (espuma e tubo) e a espessura e diâmetro do tubo. Song et al. (2005) realizou um estudo com o objetivo de perceber o efeito de interação entre uma espuma de alumínio e uma coluna envolvente (*top-hat* e *double-hat*), tipo tubo,

tendo também concluído que a energia absorvida por uma coluna com núcleo em espuma é superior à soma algébrica das energias absorvidas por cada uma das componentes. Nesse estudo verificaram, através de uma simulação numérica, que o efeito global de interação se traduzia num aumento energia absorvida de 8,5% e 18,9% para coluna *top-hat* e *double hat*, respetivamente, comparando com os materiais em separado. Já no caso da resolução analítica, o efeito global da interação indicou um aumento na energia absorvida de 9,8% e 16,7% para coluna *top-hat* e *double hat*, respetivamente.

Assim, de acordo com a pesquisa bibliográfica realizada, será previsível que, comportamentos semelhantes também irão ser observados na análise de resultados obtidos.

De forma a confirmar o que foi exposto, irão ser apresentadas vários gráficos nos quais é possível retirar conclusões sobre as performances dos materiais ensaiados e se possível, confirmar via experimental, a tendência verificada em estudos anteriores.

4.1. Ensaios em Espumas de Alumínio

Como foi referido anteriormente, foram ensaiados diferentes tipos de provetes. Assim, neste ponto irão ser apresentados os dados e os resultados obtidos nos ensaios efetuados em espumas de alumínio sem parede.

4.1.1. Geometria Uniforme

Após realização dos ensaios com as barras de Hopkinson foi possível traçar os gráficos referentes à Taxa de deformação *versus* Deformação, Figura 4.1, e Tensão *versus* Deformação, Figura 4.2.

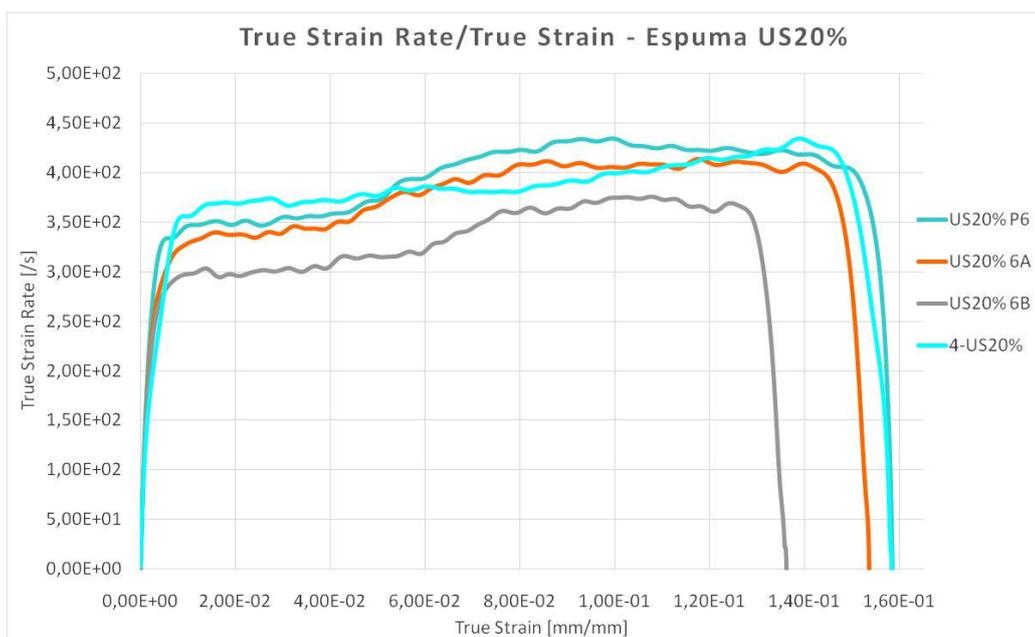


Figura 4.1. Taxa de deformação versus Deformação dos provetes de espuma US 20% de Al6000 e AlSi12.

O gráfico da Figura 4.1 permite verificar que, para velocidades de impacto semelhantes, as taxas de deformação apresentadas pelos provetes US20% são bastante próximas, não havendo uma diferença significativa no comportamento entre os vários provetes. O provete US20%6B apresenta uma taxa de deformação inferior pelo facto da velocidade de disparo ser significativamente inferior (-0,5m/s que os restantes provetes).

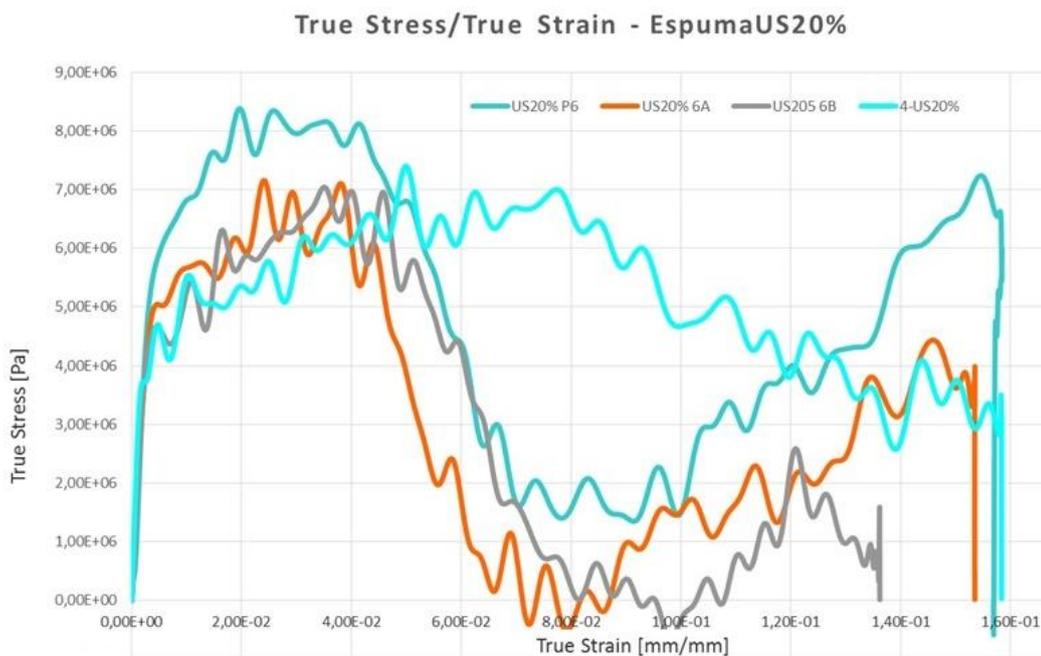


Figura 4.2. Tensão versus Deformação dos provetes de espuma US 20% de Al6000 e AlSi12.

Na análise dos ensaios com os provetes da espuma US20% houve provetes em que não foi possível determinar o seu comportamento uma vez que em alguns casos, os dados obtidos não permitiram efetuar uma análise adequada. Tal facto pode ser atribuído à baixa amplitude do sinal obtido com a onda transmitida que poderá justificar os valores negativos presentes nas curvas de tensão/deformação deste material visíveis na Figura 4.2. Assim, na realização destes ensaios não foi possível observar um comportamento com repetibilidade que permita confirmar uma tendência que sirva de referência para comparação com outros materiais. A forma de ultrapassar este obstáculo teria sido realizar mais ensaios com este tipo de provetes de modo a obter resultados que permitissem descrever de forma inequívoca o comportamento mecânico deste material.

Analisando os resultados obtidos, Figura 4.2, verificamos que o provete produzido em Al 6000, provete 4-US20%, se comportou de uma forma mais estável, apresentando menor oscilação na curva de tensão/deformação, quando comparado com os de AlSi12. Como exemplo, verifica-se que para 5% de deformação ($\epsilon = 5,00E-2$ mm/mm), os provetes ensaiados não apresentam diferenças significativas na tensão de cedência tendo-se observado um valor médio de 6,5MPa.

Tal como sucedeu para as espumas US20% também nas espumas de US60% produzidas em Al6000, provete 14-US60% e 15-US60%, apresentaram menor oscilação na curva de tensão/deformação em comparação com as espumas de AlSi12, Figura 4.3 e 4.4.

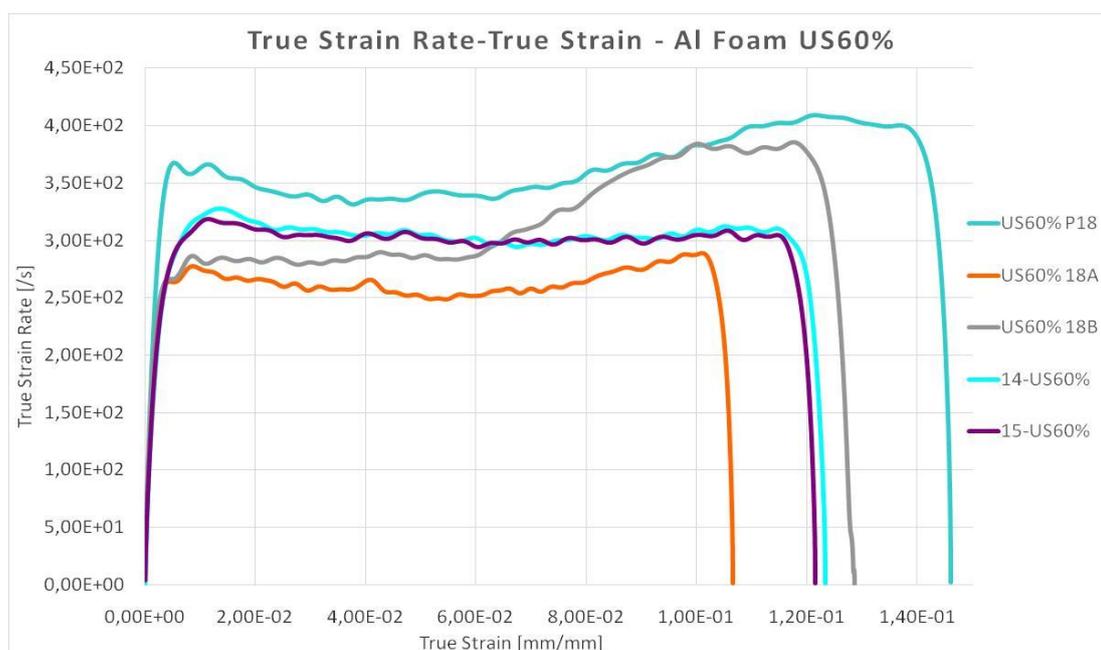


Figura 4.3. Taxa de deformação versus Deformação da espuma US60% de Al6000 e AlSi12.

Por análise das Figuras 4.3 e 4.4 verifica-se que houve variação significativa nas curvas de taxa de deformação para o caso dos provetes de liga AlSi12 (US60% P18, 18A e 18B). No caso dos provetes de liga Al6000 (14 e 15_US60%), os mesmos apresentaram boa repetibilidade nos ensaios efetuados (sobreposição das curvas obtidas dos ensaios). A análise das curvas tensão/deformação do gráfico da Figura 4.4 permite confirmar que a liga Al6000 apresenta maior repetibilidade nos ensaios que a liga AlSi12.

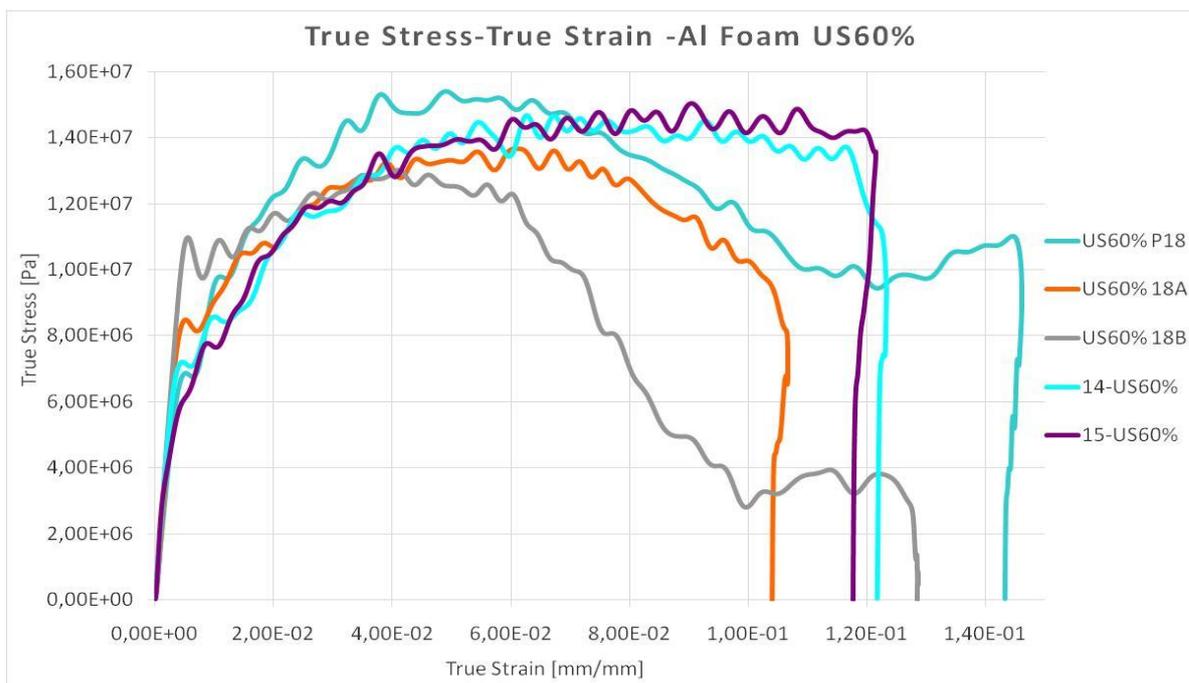


Figura 4.4. Tensão *versus* Deformação dos provetes de espuma US60% de Al6000 e AlSi12.

Ainda de acordo com a Figura 4.4 é possível observar-se, por comparação das curvas tensão/deformação que para 5% de deformação ($\epsilon = 5,00E-2$ mm/mm), os provetes ensaiados apresentam um valor de tensão média de cedência de $1,35E+07$ Pa (13,5MPa).

Na Figura 4.5 foram sobrepostos os gráficos dos ensaios efetuados à duas espumas. Tal como no caso da espuma US20% também os provetes US60% têm algumas diferenças da sua massa, tabelas 3.3 e 3.4, variando entre 1,69g e os 2,21g.

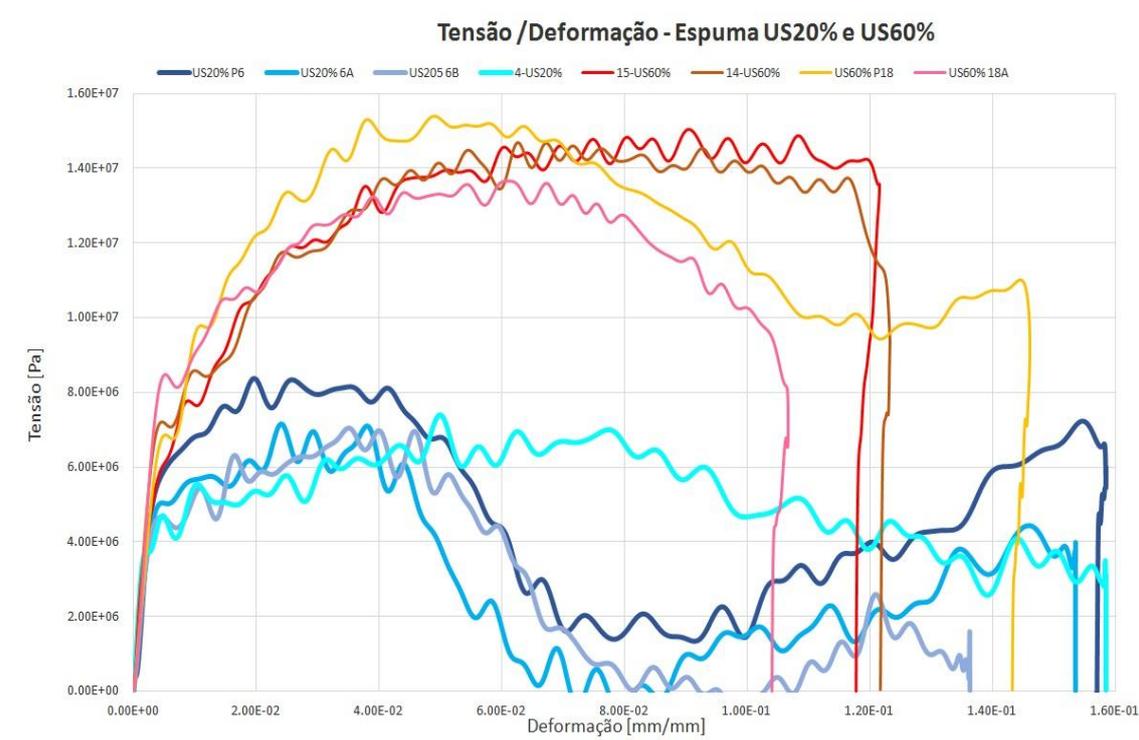


Figura 4.5. Tensão versus Deformação dos provetes de espuma US 20% e US60% de AlSi12 e Al6000.

Da observação do gráfico, Figura 4.5, é possível verificar que, para espumas de geometria uniforme (US), o aumento da densidade conduziu ao aumento do valor de tensão máxima suportada. Este comportamento está de acordo com o que foi verificado em estudos efetuados por Powell (2003) e Zhihua et al. (2006). Outra situação que foi observada é que os provetes US60% apresentam maior repetibilidade nos ensaios que os provetes US20%, exibindo resultados mais constantes e com comportamento facilmente descrito por curva de tendência. Como exemplo, verifica-se que para 5% de deformação ($\epsilon = 5,00E-2$ mm/mm), os provetes US com 20% de densidade relativa, têm uma tensão média de cedência de $7,00E+06$ Pa (7MPa) enquanto os provetes de igual geometria, mas com densidade de 60%, apresentam uma tensão de cedência de $1,35E+07$ (13,5 MPa). Assim, o aumento da densidade relativa de 20% para 60% conduziu a um acréscimo de 92% do valor médio de tensão de cedência.

4.1.2. Geometria *dual-size*

Neste ponto é analisado o comportamento das espumas sem parede com geometria celular DS com densidade relativa de 20%.

Na Figura 4.6 e 4.7 estão representadas as curvas obtidas pela realização dos ensaios com a barra de Hopkinson depois de tratados com o programa *DAVID*[®]. Novamente, verifica-se que a liga Al6000 apresenta maior repetibilidade nos ensaios quando comparado com os provetes produzidos em AlSi12.

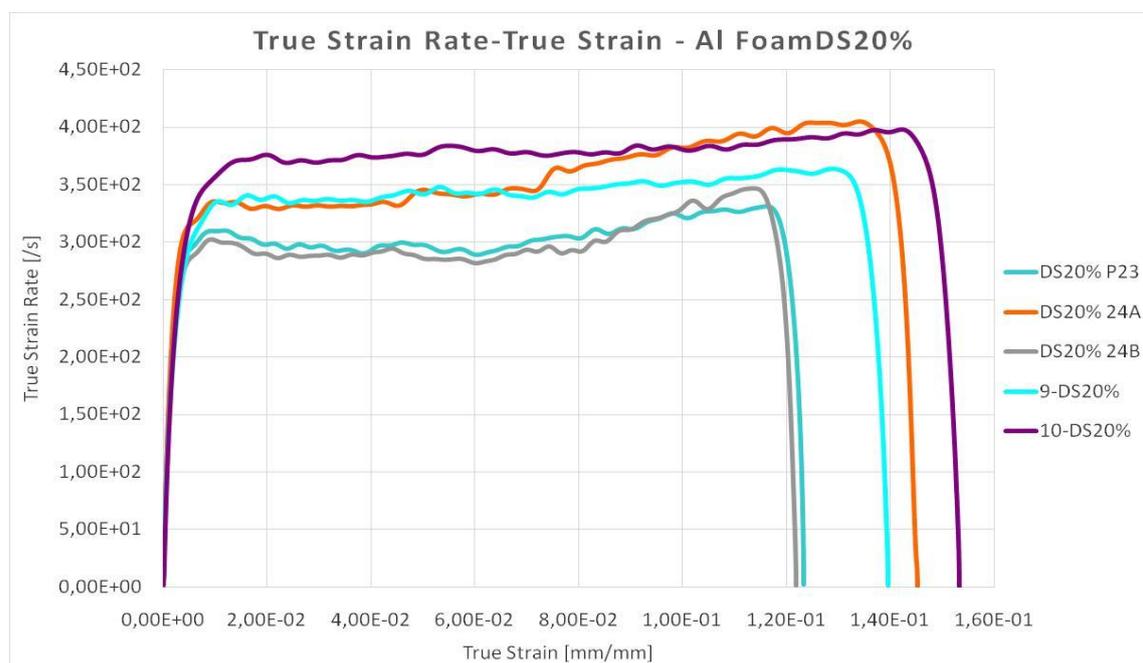


Figura 4.6. Taxa de deformação *versus* Deformação dos provetes de espuma DS20% de Al6000 e AlSi12.

No gráfico da Figura 4.6 é possível verificar que para velocidades de impacto semelhantes ($\approx 6,1$ m/s), houve variação nas taxas de deformação dos provetes de geometria celular *dual-size*. Estas variações poderão ser atribuídas às diferenças entre os vários provetes, quer na liga que os constitui, quer a alterações significativas na massa dos provetes que oscila entre os 1,13g e os 1,50g.

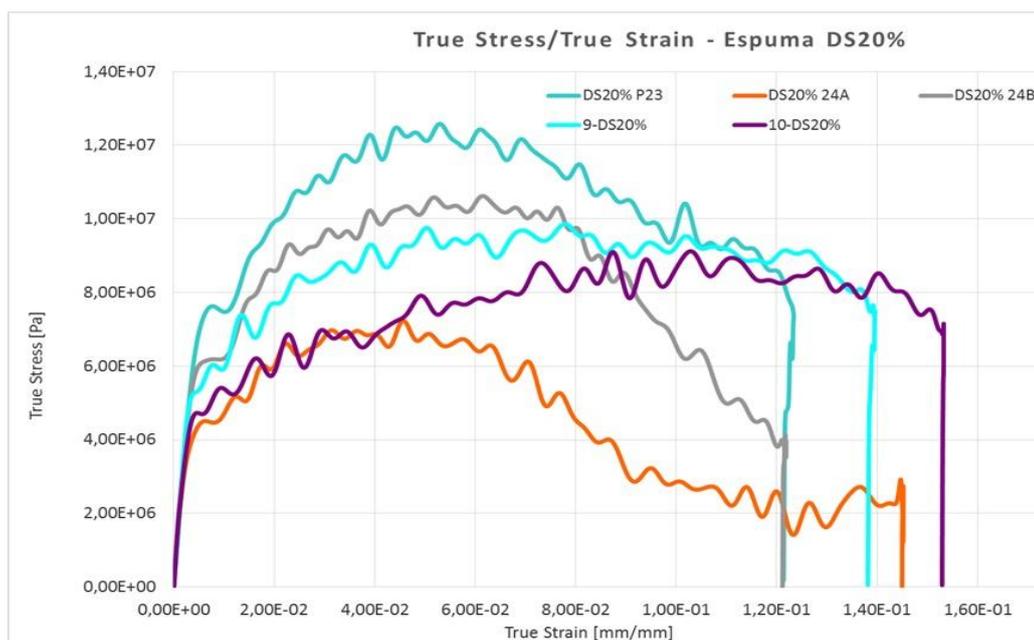


Figura 4.7. Tensão *versus* Deformação das espumas DS20% de Al6000 e AlSi12.

A análise da Figura 4.7, em conjunto com os dados dos provetes, permite verificar que há variação de comportamento dentro das espumas de igual categoria (DS20% P23, 24A e 24B). Ao procurar uma justificação para esta variação, pode ser atribuída à variação de densidade pois, para energias de impacto muito próximas, verifica-se que há diminuição da tensão máxima suportada com a diminuição de densidade. Este comportamento está referido no capítulo de revisão bibliográfica. Também se verificou que o seu comportamento não é totalmente previsível pois, para taxas de deformação e densidade semelhantes, apresentam uma variação significativa na tensão suportada. A título de exemplo, verificou-se que para 5% de deformação ($\epsilon = 5,00E-2$ mm/mm), a tensão de cedência dos provetes DS com 20% de densidade relativa variou entre os 6MPa e os 12MPa. Relativamente à liga constituinte dos provetes, não se verificou comportamento distinto que permita retirar conclusões quanto à liga que apresenta maior repetibilidade nos ensaios efetuados.

4.1.3. Comparação das duas geometrias

Neste ponto pretende-se comparar o comportamento das duas geometrias através da análise das curvas tensão/ deformação resultantes dos ensaios na Barra de Hopkinson e, se possível, verificar se existe diferença significativa na resistência e capacidade de absorver energia de ambas estruturas celulares. Na Figura 4.8 e 4.9 estão

representadas as taxas de deformação e as curvas de tensão/deformação obtidas dos ensaios realizados às espumas de geometria celular US e DS, com densidade relativa de 20%.

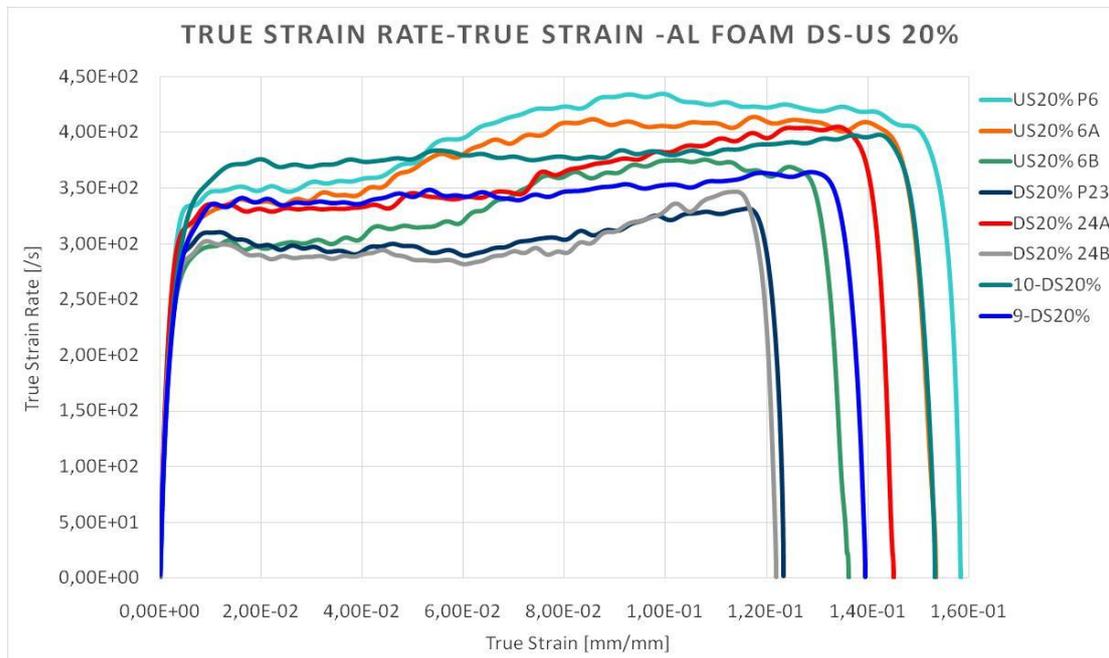


Figura 4.8. Taxa de deformação versus Deformação das Espumas US20% e DS20% de Al6000 e AlSi12.

Por análise da Figura 4.8, verifica-se que há um comportamento semelhante de ambas geometrias, não havendo diferenças significativas no comportamento, quer das duas geometrias celulares, quer das ligas de alumínio utilizadas.

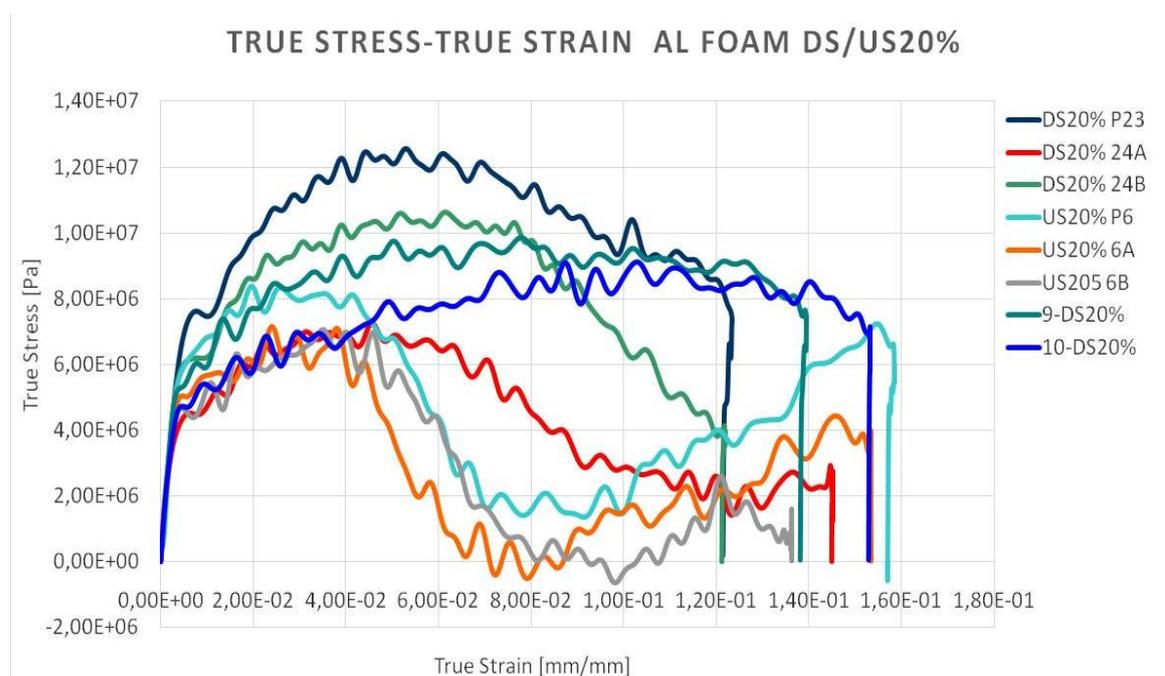


Figura 4.9. Tensão versus Deformação das Espumas US20% e DS20% de Al6000 e AlSi12.

Da comparação entre as várias curvas de tensão-deformação das espumas de geometria celular US e DS, Figura 4.9, com densidades semelhantes, é possível concluir que há melhor comportamento para a maioria dos provetes de geometria celular DS, os quais apresentaram, na sua generalidade, maior valor da tensão de cedência. Comparando as duas geometrias, verifica-se que para 5% de deformação ($\epsilon = 5,00E-2$ mm/mm), os provetes US com 20% de densidade relativa, apresentaram uma tensão média de cedência de 7MPa enquanto os provetes DS com 20% de densidade relativa, apresentam uma tensão média de cedência de 9MPa. Assim, verifica-se que a alteração da geometria celular US para DS, conduziu a um aumento de 29% da tensão de cedência.

Na Figura 4.10 está representado o gráfico da variação da energia absorvida com a deformação.

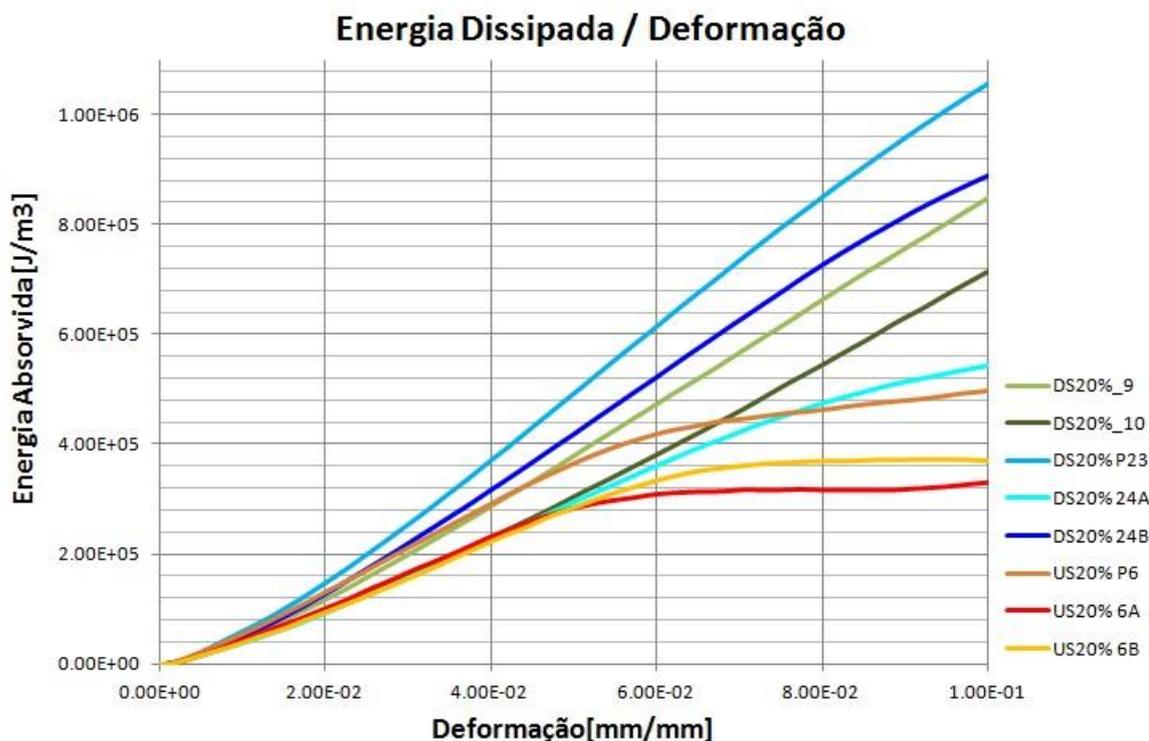


Figura 4.10. Energia absorvida vs deformação dos provetes de espuma DS20% e US20% em Alumínio AlSi12.

A observação do gráfico de energia absorvida pelos provetes US20% e DS20%, Figura 4.10, permite verificar que a geometria celular DS tem maior capacidade de absorção de energia que a espuma de geometria celular US. Como exemplo, verifica-se que para 10% de deformação ($\epsilon = 1,00E-1$ mm/mm), a generalidade dos provetes de espuma de geometria celular DS absorveram 65% mais energia que a geometria celular US.

Com a utilização da câmara de alta velocidade *Photron FASTCAM SA3* foi possível captar o modo como decorreu a deformação do provete durante o ensaio experimental, Figuras 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15.

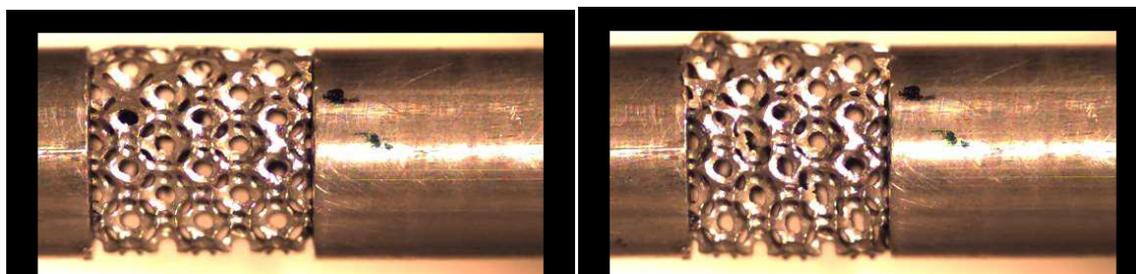


Figura 4.11. Modo de ruína em provetes de espuma DS20% fundidos em AlSi12.

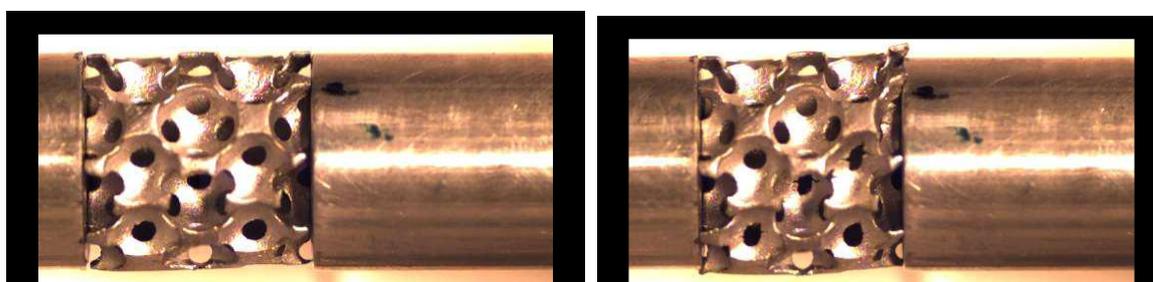


Figura 4.12. Modo de ruína em provetes de espuma US60% fundidos em AlSi12.

Nas imagens recolhidas verificou-se que o modo de ruína observado nos provetes de ambos os tipos de estrutura, US e DS, com a passagem da onda de compressão, colapsaram segundo um plano de 45°, Figura 4.13, e não com uma deformação constante ao longo do provete.

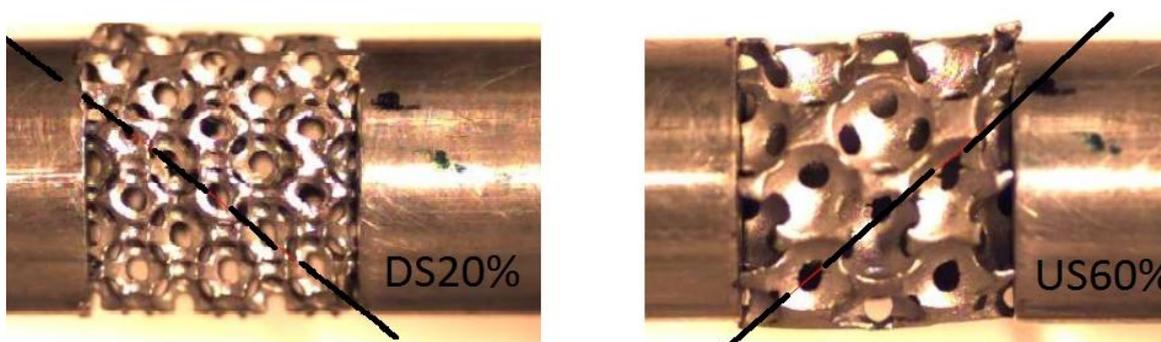


Figura 4.13. Modo de ruína em provetes de espuma US60% e DS20% em AlSi12.

Contrariamente, os provetes produzidos em Al6000 apresentaram uma deformação constante ao longo de todo o provete, Figuras 4.14 e 4.15.

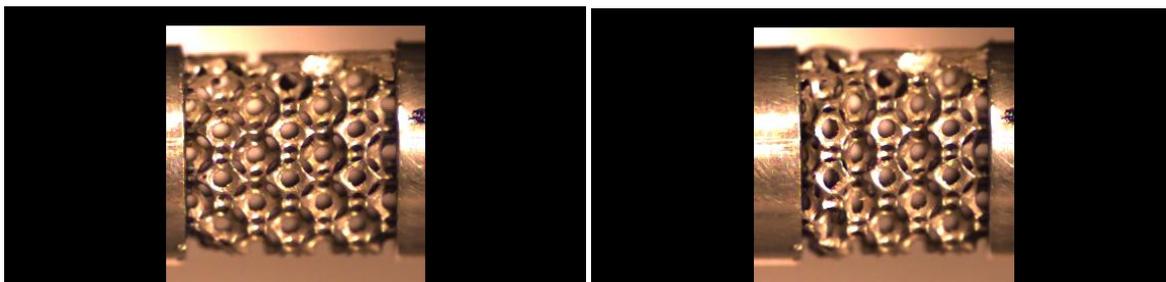


Figura 4.14. Modo de ruína em provetes de espuma DS20% fundidos em Al6000

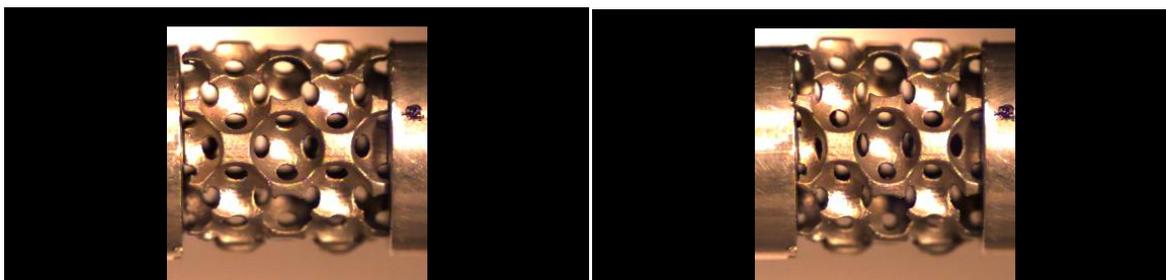


Figura 4.15. Modo de ruína em provetes de espuma US60% fundidos em Al6000

A observação dos vários modos de ruína dos provetes de espuma permite concluir que a liga Al6000 apresenta maior ductilidade que a liga AlSi12, pois com a alteração da liga de AlSi12 para Al6000, deixou de se observar o comportamento frágil, visível com a deformação segundo o plano de tensão de corte máximo a 45°.

4.2. Ensaios em Tubos com Espuma

Neste ponto serão analisados e comparados os tubos com espumas ensaiadas na Barra de Hopkinson. Estes provetes possuem núcleo em espuma de alumínio com densidade relativa de 20% para a geometria US e 20% para a geometria celular DS.

A produção dos provetes, espuma e tubo, foi efetuada de forma integrada. A espuma e tubo foram fundidos no mesmo molde constituindo, assim, uma peça única.

O conjunto de barras utilizado para a realização destes ensaios foi o constituído pelas barras de Alumínio de 30mm de diâmetro. A escolha do sistema de barras de Alumínio de 30 mm de diâmetro deve-se ao facto dos provetes com parede terem um diâmetro superior a 16 mm, logo não podem ser ensaiados no sistema de barras de Hopkinson com 16 mm de diâmetro.

Após tratamento dos dados com o programa *DAVID*[®] foi possível traçar as curvas de Taxa de deformação e de Tensão-Deformação representadas nas Figuras 4.16 e 4.17.



Figura 4.16. Taxa de deformação *versus* deformação das espumas com parede US20% e DS20% (AlSi12).

Analisando o gráfico da Figura 4.16, verifica-se que as taxas de deformação nos provetes das duas geometrias, apresentam comportamento semelhante. O acréscimo de 10% (para uma deformação de 5%) na taxa de deformação do provete DS3-20% deve-se à maior velocidade de impacto a qual foi superior, aos restantes, em 12%.

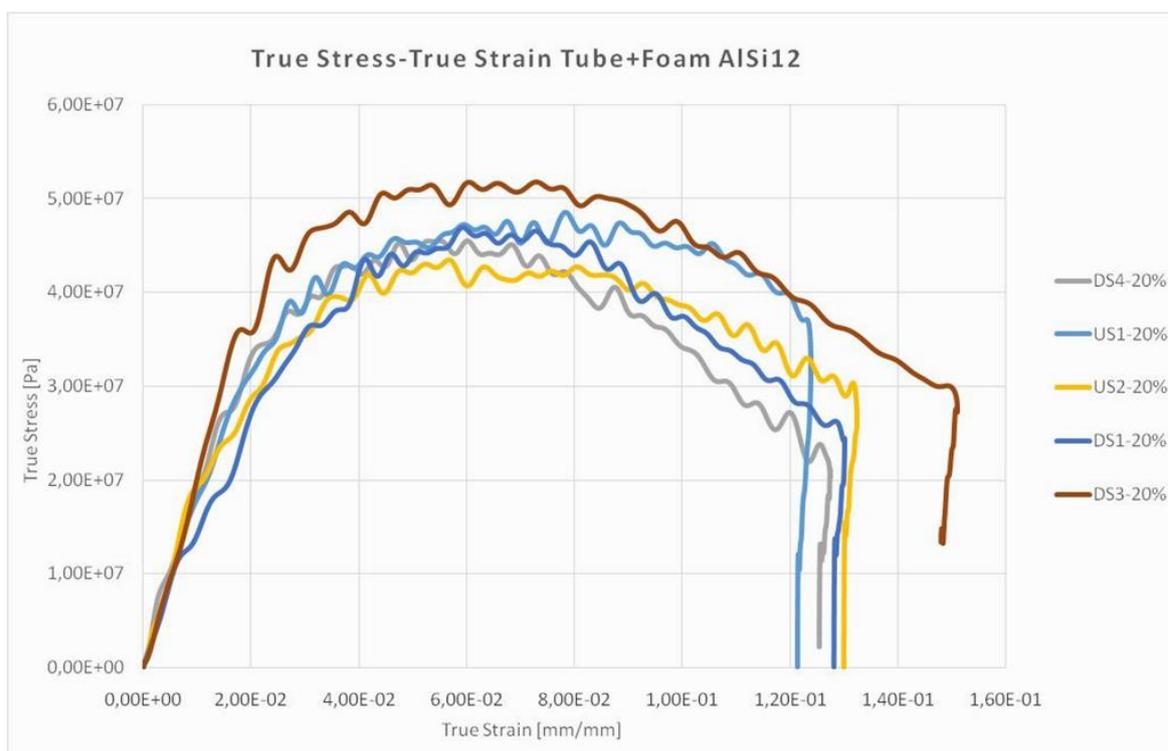


Figura 4.17. Tensão versus Deformação de provetes de espuma com parede US20% e DS20% (AlSi12).

A análise dos gráficos, Figura 4.16 e 4.17, não permite apurar qual a geometria celular que apresenta melhor comportamento pelo facto das curvas serem muito idênticas. O valor do provete DS3-20% destaca-se dos restantes (Tensão e Taxa de Deformação) devido ao acréscimo de 12% na velocidade de disparo. A título de exemplo, verificou-se que para 5% de deformação ($\epsilon = 5,00E-2$ mm/mm) nos provetes de espuma com parede, a tensão média de cedência era 45MPa. Comparando este valor com o dos ensaios em espumas DS20%, os quais foram ensaiados com velocidade semelhante, verificou-se que a adição da parede aos provetes, se traduziu num aumento da tensão média de cedência de 500% (de 9MPa para 45MPa).

Relativamente ao lote de provetes US20%, foi efetuado um ensaio (Figura 4.18) no sistema de barras de Hopkinson em aço de 30mm de diâmetro com uma velocidade de disparo quase com o dobro da velocidade dos restantes ensaios, $\approx 12m.s^{-1}$. Ainda de acordo com a Figura 4.18, é possível constatar que ocorreu o colapso do provete numa secção bem definida, mantendo-se o restante provete sem deformação aparente. Pelo facto da energia de impacto ser função da velocidade e da massa do projétil, foi possível concluir que este material não tem capacidade para se deformar constantemente ao longo

de todo o provete, quando sujeito a tão elevada energia de deformação, apresentando um comportamento frágil.

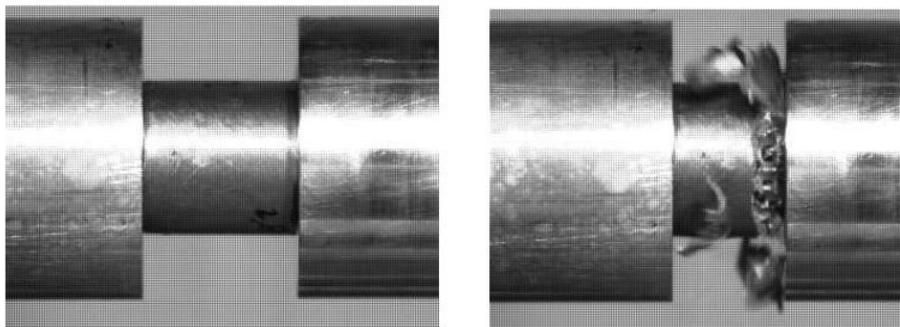


Figura 4.18. Provete US3-20% montado na SHPB de Aço de 30mm de diâmetro antes e depois do impacto.

Este ensaio foi não considerado na comparação com os restantes ensaios devido a não se ter conseguido captar qualquer sinal da onda transmitida. Assim, de modo a ensaiar os provetes com uma energia de impacto compatível com este material e ser possível a captação de sinal (onda transmitida) na estação de extensometria da barra, levou à utilização das barras de Alumínio de 30mm. Outro fator justificativo do comportamento observado na Figura 4.18 deve-se à diferença da impedância entre o material testado e o material constituinte das barras, que no caso do aço, é muito superior à do alumínio. Este caso está relatado no ponto 3.2.1.

A mudança do conjunto de barras utilizado, de aço para alumínio, traduziu-se na alteração significativa do modo de ruína, bem como nas ondas captadas pelas estações de extensometria. Verificou-se ainda que a deformação passou a ocorrer numa zona bem definida do provete (Figura 4.19) tendo sido possível a obtenção de ondas com amplitude suficiente a fim de serem tratadas no programa *DAVID*[®].

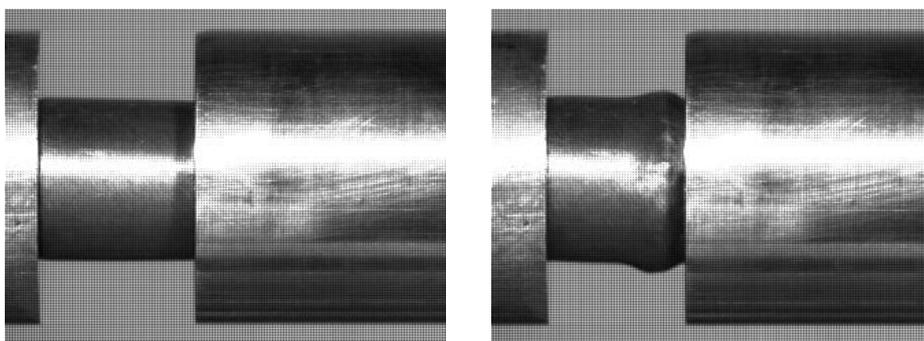


Figura 4.19. Provete DS4-20% montado na SHPB de Alumínio de 30mm de diâmetro antes e depois do impacto.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

Como já foi referido, as espumas metálicas de alumínio são consideradas como materiais a serem usadas em aplicações sujeitas a impacto, pois apresentam ótimas propriedades de absorção de energia, alta resistência aliada à baixa densidade (resistência específica). Com a realização desta tese foram estudadas dois tipos de espuma de alumínio com geometria celular aberta - Uniforme (US) e *Dual-size* (DS). Foram traçadas e comparadas as curvas de tensão/ deformação de cada uma destas estruturas ensaiadas com as barras de Hopkinson.

Foi possível verificar que, para espumas de igual densidade, a geometria celular DS apresenta maior capacidade de absorção de energia por unidade de volume que as espumas com geometria celular uniforme. A comparação das curvas de energia absorvida permitiu observar que, para 10% de deformação, a geometria celular DS absorveu 65% mais energia que a geometria celular US. Na comparação das curvas de tensão/deformação obtidas nos ensaios destes provetes, foi possível verificar que, a alteração da geometria celular de US para DS, conduziu a um aumento de 29% do valor da tensão média de cedência. Confirma-se assim a maior capacidade deste tipo de geometria modificada quando comparada com a da espuma uniforme. Esta conclusão permite-nos concluir que será possível a construção de estruturas em espumas DS, com menor peso quando comparado com a US, capazes de suportar, igual ou superior solicitação.

Relativamente ao comportamento das espumas com parede, não foi possível confirmar experimentalmente a existência de melhor desempenho dos provetes com espuma DS, quando comparados com os de estrutura tubular de núcleo em espuma US. Na análise efetuada não se notou uma diferença suficientemente mensurável que permita poder claramente concluir pelo melhor desempenho de uma das estruturas.

Verificou-se ainda que a densidade das espumas tem grande influência na capacidade de absorção de energia, quando se refere a comparações dos provetes de espumas US com 20% e 60% de densidade relativa. A comparação das curvas de tensão/deformação dos provetes permitiu verificar que, para 5% de deformação, o aumento

de densidade relativa de 20% para 60% se traduziu num aumento de 93% na tensão média de cedência (de 7MPa para 13,5 MPa). Nesta comparação foi possível verificar que existe um relação entre o valor de densidade relativa e a tensão máxima suportada. Este comportamento observado está de acordo o verificado no estudo realizado por Powell (2003).

Para finalizar, verificou-se que em todos os ensaios realizados, tanto na estrutura celular US de densidade relativa 20% e 60%, assim como na DS de densidade relativa de 20%, a liga de Alumínio 6000 apresentou melhor estabilidade e repetibilidade dos ensaios executados que a liga de alumínio AlSi12.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, deveriam ser realizados mais ensaios a esta gama de espumas, quer uniforme, quer dual-size, mas com um intervalo maior de taxas de deformação, em especial, para valores superiores. Estes ensaios não foram executados devido a serem poucas as amostras disponibilizadas para ensaiar.

Sugere-se ainda um aumento da secção de área transversal de todos os provetes a fim de se poder testar estes materiais com maior energia de impacto. Por observação dos ensaios realizados, o não aumento da secção transversal neste tipo de material com taxas de deformação mais elevadas, não permite a análise das ondas transmitidas, pois as mesmas apresentaram sinal com baixa amplitude.

Outra sugestão que poderia ser analisada no futuro seria alterar a composição química da liga dos provetes de modo a permitir maior ductilidade do alumínio, evitando assim o comportamento frágil que foi observado nos ensaios a taxas de deformação mais elevadas. Semelhante sugestão foi efetuada por Carvalho (2012) num estudo realizado na Universidade do Minho, no qual também foram estudadas estas geometrias celulares (em ensaios quasi-estáticos).

Um estudo que poderia ser efetuado, seria o estudo do comportamento das estruturas US e DS, com alterações da composição química da liga, testando várias combinações de mistura, num leque alargado de taxas de deformação. Com este estudo poder-se-ia verificar a influência dos agentes de liga no comportamento dinâmico das espumas de Alumínio.

Outra proposta para estudos experimentais futuros será a verificação da influência dos vários tipos de tratamentos térmicos no comportamento das espumas de Alumínio, quer estáticos, quer dinâmicos.

Por último, poderiam ser produzidos provetes nas ligas que foram estudadas, no qual a espuma de alumínio deverá ser incorporada nas paredes do material que confina a espuma, de forma a se poder verificar o efeito de interação das paredes do tubo com a estrutura celular.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, Z. (2009), "Impact and Energy Absorption of Empty and Foam-filled Conical Tubes", PhD Thesis. School of Urban Development, Queensland University of Technology, Queensland.
- Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N.A. (2000), "Metal Foams: A Design Guide", Butterworth Heinemann, Oxford.
- Baumeister, J., Banhart, J., Weber, M. (1997), "Aluminium foams for transport industry", *Materials & Design* Vol. 18, 217-220.
- Banhart, J. (2000), "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams", *Progress in Materials Science* 46, 559-632.
- Cardoso, A.L.V. (2005), "Caracterização Dinâmica por impacto de cerâmicos à base de Alumina". Tese de Doutorado em Ciência dos Materiais, Departamento de Ciência e Tecnologia, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- Carvalho, D.F.C. (2012), "Simulação Numérica e Verificação Experimental do Comportamento Elastoplástico de Espumas Metálicas". Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga.
- Chen, Z., Xu, S., Dong, G. (2008), "Deformation behavior of AA6063 aluminium alloy after removing friction effect under hot working conditions", *Acta Metallurgica Sinica (Engl. Lett.)* Vol.21 N°6, 451-458
- Clérigo, J.S.C. (2010), "Resposta Dinâmica de Alvos com Núcleos de Espuma Revestida". Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Deshpande, V.S., Fleck, N.A. (2000), "High strain compressive behaviour of aluminium alloy foams", *International Journal of Impact Engineering* 24, 277-298.
- Duarte, I.M.A. (2005), "Espumas Metálicas - Processo de Fabrico, Caracterização e Simulação Numérica". Tese de Doutorado em Ciências de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Esteves, J.C.M. (2011), "Projecto e Instalação de um sistema de Barras de Hopkinson em Alumínio para Caracterização Dinâmica de Materiais Compósitos". Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica na especialidade de Tecnologia da Produção, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Gama, B., Lopatnikov, S., Gillespie Jr, J., (2004), "Hopkinson bar experimental technique: A critical review", *Applied Mechanics Reviews*, 57, no 4, 223-250.
- Gameiro, C.P., Cirne, J. (2007), "Dynamic axial crushing of short to long circular aluminium tubes with agglomerate cork filler", *International Journal of Mechanical Sciences* 49, 1029-1037.

- Gibson, L.J., Ashby, M.F. (1997), "Cellular Solids: Structure and Properties, 2nd Ed", Cambridge University Press: Cambridge, UK.
- Gundberg, T. (2013), "Foam Core Materials in the Marine Industry". Acedido em 21 de Novembro de 2013, em: <http://www.boatdesign.net>.
- Hou, W., Zhu, F., Lu, G., Fang, D. (2010), "Ballistic impact experiments of metallic sandwich panels with aluminium foam core", *International Journal of Impact Engineering* 37, 1045-1055
- Johnson, T.P.M. (2005), "High strain rate mechanical characterization of trabecular bone utilizing the Split-Hopkinson Pressure Bar Technique", Master of Science Thesis in Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, University of California, Berkeley.
- Kaiser, M.A. (1998), "Advancements in the Split Hopkinson Bar Test", Master of Science Thesis in Mechanical Engineering. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Kolsky, H. (1949) - "An investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Strain". *Proc. Roy. Phys. Soc.*, B62, 676-700
- Kou, D.P., Li, J.R., Yu, J.L., Cheng, H.F. (2008) - "Mechanical behavior of open-cell metallic foams with dual-size cellular structure". *Scripta Materialia* 59, 483-486.
- Marchi, C.S., Mortensen, A. (2001), "Deformation of Open-Cell Aluminum Foam", *Acta Materialia* 49, 3959-3969.
- ASM Handbook (2000) - Mechanical Testing and Evaluating, Volume 8 – ASM International.
- Neves, R.P.M. (2009), "Modelação Computacional do Comportamento Mecânico de Espumas de Alumínio". Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Palamidi, E. (2010), "Hopkinson Bar testing of cellular materials", PhD Thesis. Faculty of Engineering and Physical Science, University of Manchester, U.K.
- Pinto, P., Peixinho, N., Silva, F., Soares, D. (2014), "Compressive Properties and Energy Absorption of Aluminum Foams with Modified Cellular Geometry". *Journal of Materials Processing Technology* 214, 571-577.
- Powell, C. (2003), "Energy absorption and load management characteristics of aluminium foam filled braided tubes", Master of Applied Science Thesis in Mechanical Engineering. Faculty of Graduate Studies and Research, University of Windsor, Ontario, Canada.
- Song, H., Fan, Z., Yu, G., Wang, Q., Tobota, A. (2005), "Partition energy absorption of axially crushed aluminum foam-filled hat sections". *International Journal of Solids and Structures* 42, 2575-2600
- Tavares, J.I.M. (2008), "Influência das Condições Ambientais nas Espumas de Alumínio". Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Wu, X.J., Gorham, D.A. (1997), "Stress Equilibrium in the Split Hopkinson Pressure Test", Faculty of Technology, The Open University, U.K. in: *Supplément au*

Journal de Physique III d'aout, (C3-91), France.

Yamada, Y., Banno, T., Xie, Z. (2005), "Energy Absorption and Crushing Behaviour of Foam-Filled Aluminium Tubes". *Materials Transactions*, Vol 28, No. 12, 2633-2636.

Yu, J.L., Wang, Z.G., Wei, E.H. (2003), "Deformation and failure mechanism of dynamically loaded sandwich beams with aluminium-foam core". *International Journal of Impact Engineering* 28, 331-347.

Zhihua, W., Hongwei, M., Longmao, Z., Guitong, Y. (2006), "Studies on the dynamic compressive properties of open-cell aluminum alloy foams", *Scripta Materialia* 54, 83-87.

ANEXO A

Neste anexo, estão as fichas técnicas das ligas de Alumínio utilizadas neste trabalho. Em primeiro está a ficha da liga Al6000. Em segundo, está a ficha com as propriedades da liga de alumínio AlSi12 (A413.0). A terceira e quarta ficha correspondem às ligas de alumínio que compõem as barras de Alumínio do sistema de Hopkinson de 16mm e 30mm de diâmetro, respetivamente.

