

# ESPUMAS METÁLICAS – PROCESSOS DE FABRICO, PROPRIEDADES E APLICAÇÕES

## PARTE II– Propriedades e Aplicações

I. Duarte<sup>1</sup>, A. Ferreira<sup>2</sup>, J. Banhart<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial, Departamento de Materiais e Tecnologias de Produção, Estrada do Paço de Lumiar, 1649-038, Lisboa, Portugal

<sup>2</sup>Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Rua Dr. Roberto Frias 4200-465 Porto, Portugal

<sup>3</sup>Fraunhofer-Institute for Advanced Materials, Wiener Str. 12, 28359 Bremen, Alemanha

**Resumo:** O presente artigo pretende apresentar as principais propriedades das espumas metálicas – de estrutura fechada e de estrutura aberta – e as suas principais aplicações nos diferentes sectores industriais.

### 1. Introdução

As espumas metálicas têm vindo a ser identificadas como uma nova classe de materiais de grande interesse devido ao seu comportamento que depende sobretudo da forma como o sólido se distribui na estrutura porosa, a qual poderá ser constituída por células abertas e/ou células fechadas (Figura 1). É esta estrutura porosa que confere a estes materiais uma larga gama de aplicações na indústria. As propriedades destes materiais derivam da sua natureza metálica em combinação com a sua estrutura celular (aberta ou fechada), que lhes conferem excelente *performance* nas diferentes aplicações industriais.

As espumas metálicas de estrutura fechada são utilizadas principalmente no domínio da indústria de transportes, onde a sua aplicação tem como factores mais importantes o baixo peso, a elevada resistência ao impacto, a elevada capacidade de isolamento ao ruído e boa capacidade de amortecimento de vibrações. Relativamente ao sector automóvel, estas poderão ser utilizadas nas barras protectoras frontais e laterais, reforço da carroçaria, tectos de abrir, capôts, etc. devido à sua elevada capacidade de absorção e dissipação de energia que, para além de diminuir o consumo de combustível do veículo devido à diminuição de peso, origina o aumento da segurança passiva dos passageiros. As espumas metálicas de estrutura aberta têm a sua principal aplicação no domínio da indústria química, como filtros, reservatórios de fluídos e permutadores de calor, onde a sua aplicação inclui como factores importantes o baixo peso, a porosidade aberta e a elevada área específica. As espumas metálicas estão já a ser utilizadas nos túneis rodoviários e mesmo no *Space Shuttle* como bons isolantes de som [1].

Face ao interesse crescente na utilização das espumas metálicas em detrimento de outros materiais em certas aplicações, apresenta-se na Figura 2 uma comparação de algumas propriedades. Na Tabela 1 apresentam-se as propriedades de espumas metálicas comerciais de estrutura aberta e de estrutura fechada.

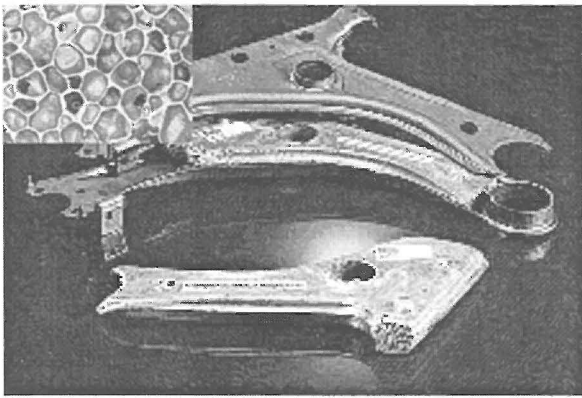
### 2. A estrutura das espumas

As espumas são arranjos tridimensionais de células que podem ser divididos em dois grupos – de célula aberta e de célula fechada – como se exemplifica na Figura 3. Estes materiais são identificados por serem constituídos por uma rede de sólido em paredes planas ou filiformes (segmentos) que formam nas suas intersecções faces ou arestas de um elemento estrutural confinado - a célula - a sua distribuição espacial.

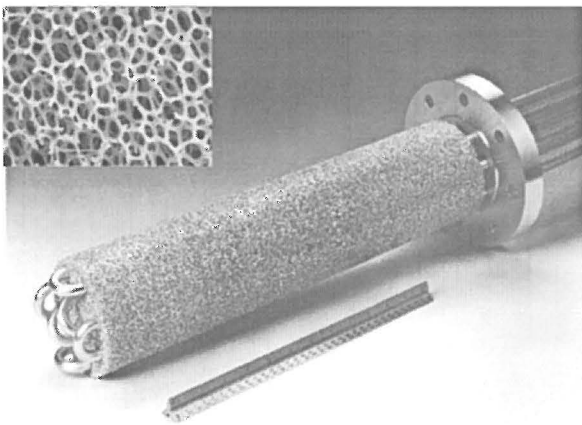
O primeiro grupo de espumas, constituídas por células abertas (inter-ligadas) partilham entre si somente as arestas, enquanto que o segundo grupo, constituídas por células fechadas partilham

**Tabela 1:** Propriedades de espumas metálicas comerciais [5].

Propriedades	Símbolo	Unidades	Nome Comercial e Material				
			Cymat Al-SiC	Aluligh Al	Alporas Al	ERG Al	Inco Ni
<b>Propriedades Mecânicas</b>							
Densidade relativa	$\rho/\rho_s$	-	0.02-0.2	0.1-0.35	0.08-0.1	0.05-0.1	0.03-0.04
Estrutura celular	-	-	fechada	fechada	fechada	aberta	aberta
Densidade		Mg/m <sup>3</sup>	0.07-0.56	0.3-1.0	0.2-0.25	0.16-0.25	0.26-0.37
Módulo de Young	E	GPa	0.02-2.0	1.7-12	0.4-1.0	0.06-0.3	0.4-1.0
Tensão de corte	G	GPa	0.001-1.0	0.6-5.2	0.3-0.35	0.02-0.1	0.17-0.37
Módulo de Massa	K	GPa	0.02-3.2	1.8-13.0	0.9-1.2	0.06-0.3	0.4-1.0
Módulo de flexão	E <sub>f</sub>	GPa	0.03-3.3	1.7-12.0	0.9-1.2	0.06-0.3	0.4-1.0
Coefficiente de Poisson			0.31-0.34	0.31-0.34	0.31-0.34	0.31-0.34	0.31-0.34
Resistência à compressão	$\sigma_c$	MPa	0.04-7.0	1.9-14.0	1.3-1.7	0.9-3.0	0.6-1.1
Limite de elasticidade à tração	$\sigma_y$	MPa	0.04-7.0	2.0-20	1.6-1.8	0.9-2.7	0.6-1.1
Resistência à tração	$\sigma_t$	MPa	0.05-8.5	2.2-30	1.6-1.9	1.9-3.5	1.0-2.4
MÓR	$\sigma_{MOR}$	MPa	0.04-7.2	1.9-25	1.8-1.9	0.9-2.9	0.6-1.1
Limite de endurecimento	$\sigma_e^*$	MPa	0.02-3.6	0.95-13	0.9-1.0	0.45-1.5	0.3-0.6
Extensão de densificação	$\epsilon_D$	-	6.0-9	0.4-0.8	0.7-0.82	0.8-0.9	0.9-0.94
Ductilidade à tensão	$\epsilon_f$	-	0.01-0.02	0.002-0.04	0.01-0.06	0.1-0.2	0.03-0.1
Coefficiente de perda	$\eta^*$	%	0.4-1.2	0.3-0.5	0.9-1.0	0.3-0.5	1.0-2.0
Dureza	H	MPa	0.05-10	2.4-35	2.0-2.2	2.0-3.5	0.6-1.0
Tenacidade à fractura	$K_{IC}$	MPam <sup>1/2</sup>	0.03-0.5	0.3-1.6	0.1-0.9	0.1-0.28	0.6-1.0
<b>Propriedades Térmicas</b>							
Temperatura de fusão	T <sub>m</sub>	K	830-910	840-850	910-920	830-920	1700-1720
Temperatura máxima de serviço	T <sub>max</sub>	K	500-530	400-430	400-420	380-420	550-650
Temperatura mínima de serviço	T <sub>min</sub>	K	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2
Calor específico	C <sub>p</sub>	J/Kg.K	830-870	910-920	830-870	850-950	450-460
Condutividade térmica	$\lambda$	W/m.K	0.3-10	3.0-3.5	3.5-4.5	6.0-11	0.2-0.3
Exponencial térmico	$\alpha$	10 <sup>-6</sup> /K	19-21	19-23	21-23	22-24	12-14
Calor latente	L	KJ/Kg	355-385	380-390	370-380	380-395	280-310
<b>Propriedades Eléctricas</b>							
Resistividade	R	10 <sup>-6</sup> Ohm.m	90-3000	20-200	210-250	180-450	300-500



1A) Componente automóvel (IFAM) [2]



1B) Permutador de calor (ERG) [3].

Figura 1: Exemplos de aplicações das espumas metálicas de estrutura fechada (A) e de estrutura aberta (B).

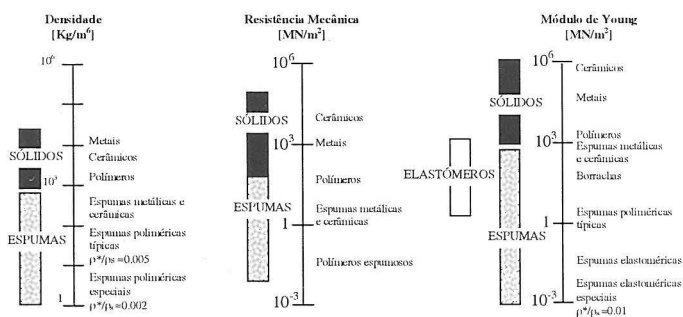
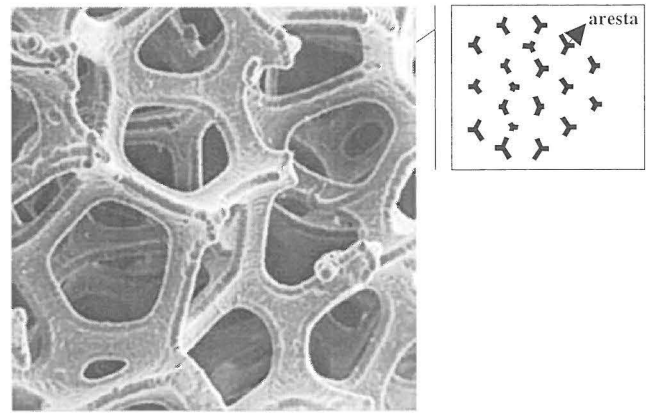
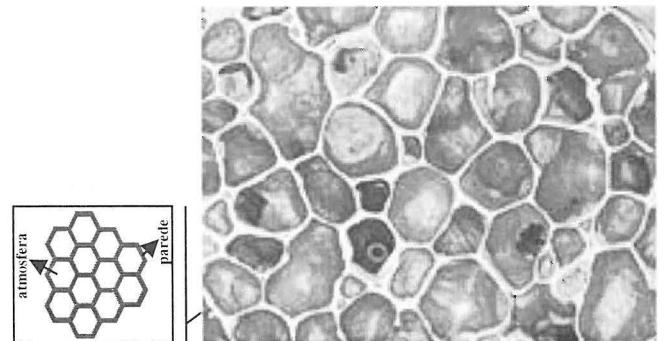


Figura 2: Comparação de algumas propriedades das espumas metálicas com outros materiais [4].

entre si as paredes e as arestas (Figura 3). Esta característica pode ser directamente observada por microscopia óptica ou por determinação da permeabilidade da espuma a um fluido (gás ou líquido). Através da escolha de um processo de fabrico apropriado ou mesmo através da manipulação dos parâmetros de um determinado processo poder-se-ão obter diferentes estruturas celulares no que respeita a morfologia (forma e tamanho das células) mais adequada para cada aplicação [8]. As características estruturais, nomeadamente: a forma e o tamanho das células, a forma em que o sólido é distribuído entre as arestas e as faces, e as propriedades da matriz metálica são factores determinantes nas propriedades das espumas. Além



3A) Estrutura porosa de células abertas [6].



3B) Estrutura porosa de células fechadas [7].

Figura 3: Morfologia das espumas metálicas.

destes factores, a percentagem de células (abertas e fechadas) e a anisotropia de forma são igualmente importantes. Desta forma torna-se difícil prever o seu comportamento e mesmo efectuar a sua modelização matemática. No caso extremo, se a espuma apresentasse uma estrutura de células equiaxiais originaria propriedades isotrópicas. Contrariamente quando a espuma apresentar uma estrutura porosa de células alongadas e planas as propriedades exibidas dependem da sua direcção, como se exemplifica na Figura 4.

### 3. Propriedades

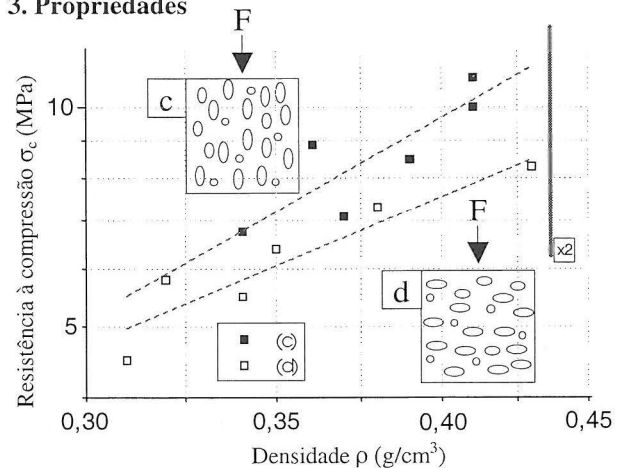


Figura 4: Resistência à compressão de espumas de alumínio com a direcção da expansão orientada nas direcções paralelas e perpendiculares à força exercida [9].

3.1. Densidade

As espumas como aliás os demais materiais celulares, caracterizam-se pela baixa fração de sólidos (em volume) sendo a mais importante propriedade das espumas metálicas a sua densidade relativa ( $\rho^*/\rho_s$ ) definida como o quociente entre densidade da espuma ( $\rho^*$ ) e a densidade do sólido (material de

base) que compõe as paredes ou segmentos unitários da célula ( $\rho_s$ ). A fração de poros, designada por porosidade é dada pela equação:  $1 - \rho^*/\rho_s$ . Esta é uma das propriedades mais marcantes da espuma metálicas, que irá condicionar as suas principais aplicações em detrimento de outros materiais até agora utilizados aliadas, claro está, a outras propriedades. Na Figura 5 apresenta-se a densidade das espumas metálicas comparadas com outro

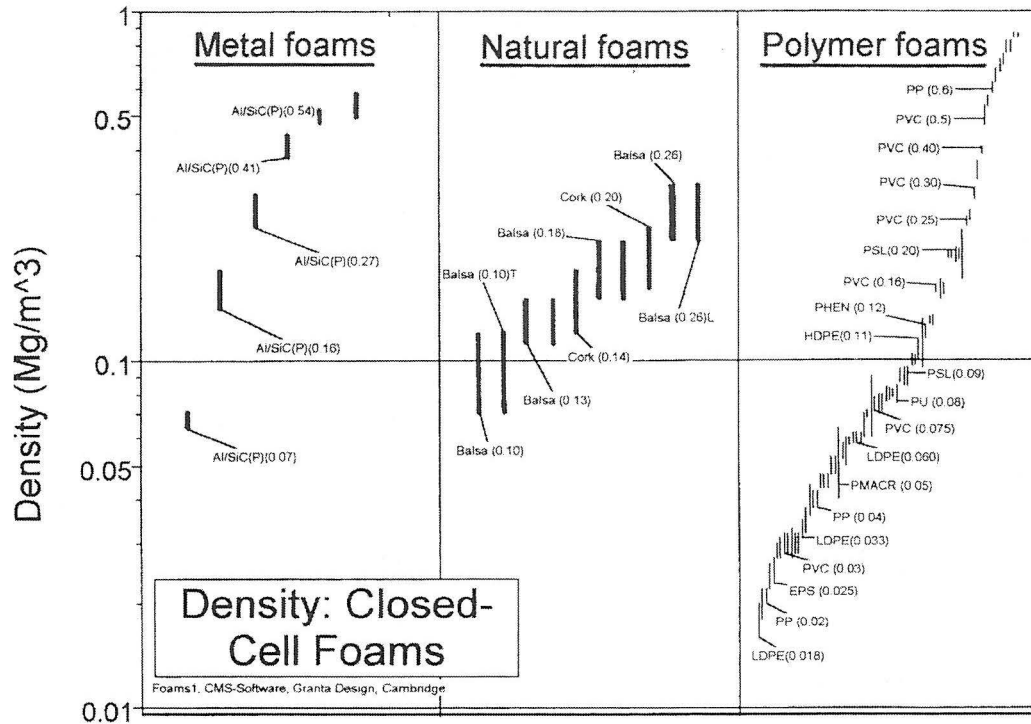


Figura 5: Comparação de diferentes espumas de estrutura

tipo de espumas. Verificou-se que a densidade relativa das espumas está relacionada com as suas propriedades estruturais. Assumindo um modelo cúbico simples, a densidade relativa poderá relacionar-se com os parâmetros estruturais de acordo com as seguintes equações [4]:

para células abertas com comprimento de (l) e espessura de (t):

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = C_2 \left( \frac{t}{l} \right)^2 \quad (\text{Eq. 1})$$

para células fechadas com comprimento de faces (l) espessura de (t):

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = C_3 \left( \frac{t}{l} \right) \quad (\text{Eq. 2})$$

em que C2 e C3 são constantes que dependem da morfologia das células (geometria e forma).

3.2. Propriedades mecânicas

As espumas metálicas, principalmente as de estrutura fechada têm vindo a ser identificadas como uma nova classe de materiais de grande interesse no domínio da indústria de transportes, onde a sua aplicação tem como factores mais importantes o baixo peso, a elevada resistência ao impacto, a elevada capacidade de isolamento ao ruído e boa capacidade de amortecimento de vibrações. As propriedades destes materiais derivam da sua natureza metálica em combinação com a sua estrutura celular, que lhes confere excelente performance neste tipo de aplicações. Relativamente ao sector automóvel, estas poderão ser utilizadas nas barras protectoras frontais e laterais, reforço da carroçaria, tectos de abrir, capôs, etc. devido à sua elevada capacidade de absorção e dissipação de energia que, para além de diminuir o consumo de combustível do veículo devido à diminuição de peso, origina o aumento da segurança passiva dos passageiros.

A análise mecânica das espumas é bastante complexa, dado que as suas propriedades e o seu comportamento dependem das propriedades decorrentes da estrutura porosa (geometria, forma e espessura), das propriedades intrínsecas dos materiais constituintes, e no caso das espumas de estrutura fechada, do tipo de atmosfera aprisionada nas células.

3.2.1. Módulo de Young

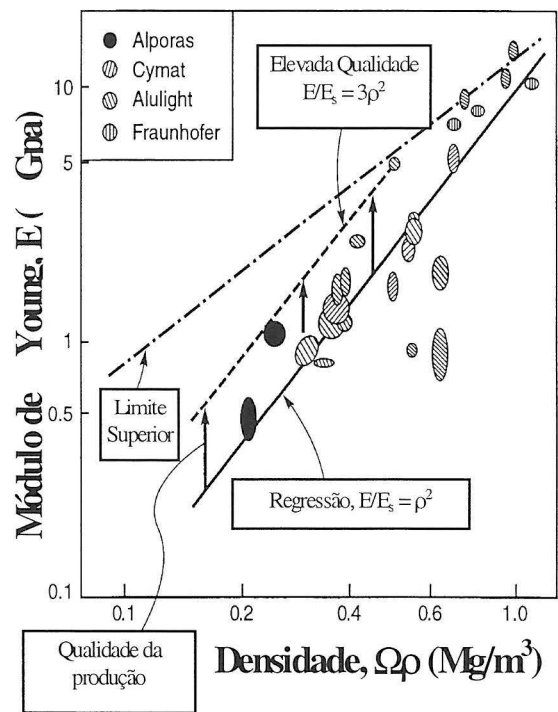
O módulo de Young ( $E$ ) é o declive inicial da curva tensão – extensão, e está intimamente relacionado com a porosidade e a densidade dos materiais. Na literatura existem inúmeros modelos matemáticos que relacionam o módulo de Young ( $E^*/E_s$ ) com a densidade da espuma como se listam na Tabela 2 [10].

**Tabela 2:** Modelos matemáticos teóricos para os módulos de Young das espumas metálicas [10].

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

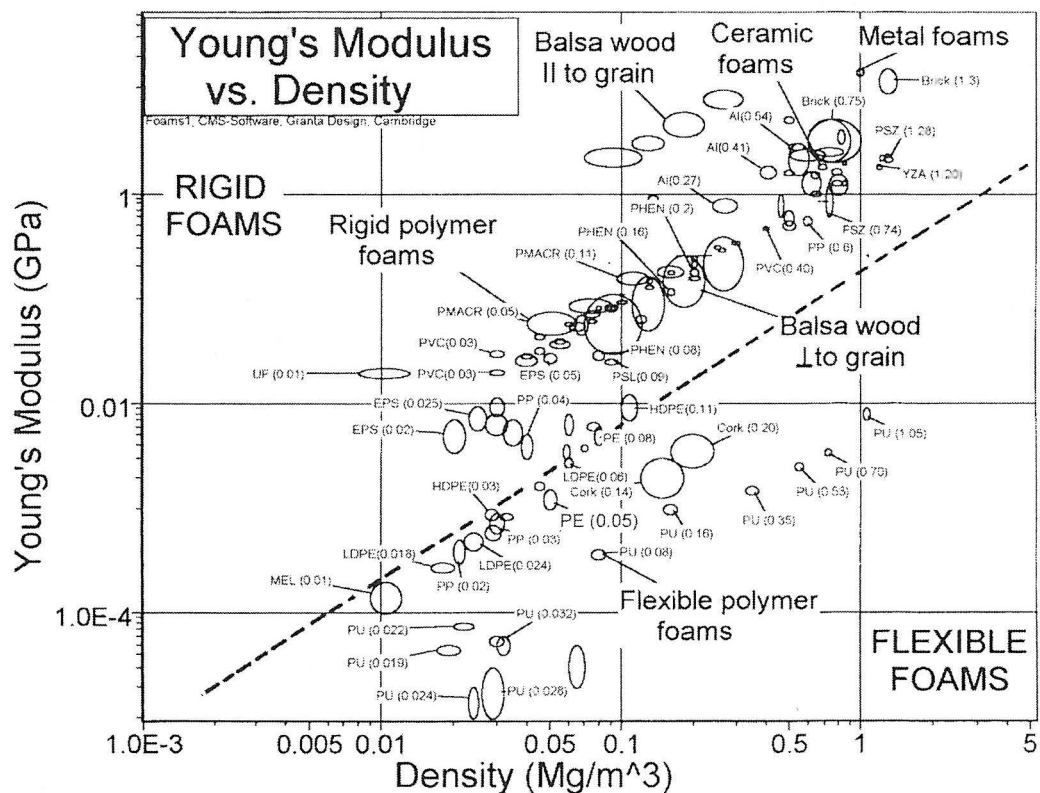
em que  $\phi$  é a contribuição das arestas das células,  $1-\phi$  é a contribuição das faces das células e o índice  $s$  diz respeito às propriedades do sólido do material base (constituente dos vértices e das paredes das células).

A dependência de  $E$  das espumas metálicas com a sua densidade relativa é exemplificada na Figura 6, assim como a comparação com outros tipos de espumas.



6A)

**Figura 6:** Módulo de Young em função da densidade. 6A) Espumas metálicas [10].



6B)

**Figura 6:** 6B) Comparação com outro tipo de espumas [4].

3.2.2. Compressão - Tracção

Uma das aplicações das espumas metálicas é como componentes, em que estão submetidas a esforços de tracção e/ou compressão. A Figura 7 mostra as curvas de tensão - extensão típicas de uma estrutura celular [11]. Como se poderá visualizar existem 3 estágios: deformação elástica com duas zonas: quase linear e não linear, cedência plástica e densificação.

Na região linear elástica, os mecanismos de deformação dependem sobretudo do tipo de células - abertas ou fechadas - existentes na espuma como se exemplifica nas Figuras 7 e 8. A deformação em espumas de estrutura aberta é devida principalmente à flexão da parede celular das arestas. Nas espumas de estrutura fechada, a deformação é atribuída à flexão, tracção e contracção das arestas celulares e à contracção das membranas que formam as paredes celulares.

Em suma, na região elástica linear a deformação é controlada pela flexão da parede celular no caso de células abertas, e pela contracção da parede celular no caso das células fechadas.

Nos mecanismos de deformação à compressão compreendem as seguintes fases (Figuras 7A):

i) Elasticidade linear – A região linear elástica inicial que corresponde à flexão das arestas.

ii) Patamar – A zona do patamar da curva do ensaio de compressão é uma consequência de diversos mecanismos de deformação. É designado normalmente por encurvadura e existe uma decomposição das forças de compressão, podendo ser atingida a carga de Euler, a qual origina uma instabilidade elástica que pode causar grandes concentrações de tensão resultando o aparecimento da deformação plástica no caso de materiais dúcteis.

iii) Densificação – O segmento final crescente corresponde ao colapso, que se inicia na zona mais fraca de maior solicitação e se propaga a todo o material a uma tensão constante, resultante do esmagamento ou da densificação (nome porque é conhecido este segmento). O sólido está cada vez mais compacto, e no limite, pode ser considerado somente como o sólido base, e o declive permite calcular o valor de E.

Os mecanismos de deformação à tracção a região linear elástica inicial corresponde à flexão das arestas, tal como acontece à compressão. Analisando a curva de tracção, seguido da região linear, e por contraste com o comportamento à compressão existe um aumento de rigidez.

A explicação para este facto tem uma base geométrica uma vez que origina uma variação de ângulos na raiz dos pontos triplos, que vai inibir a influência do momento flector das arestas, à medida que estas se alinham com a direcção da força. No fim do alinhamento, o que ocorre é o esticar das arestas, embora nenhuma descontinuidade entre ambas seja visível.

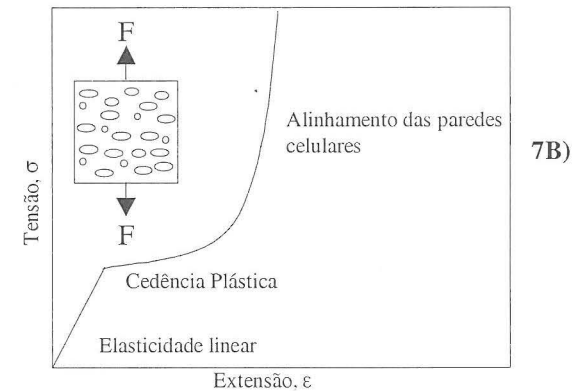
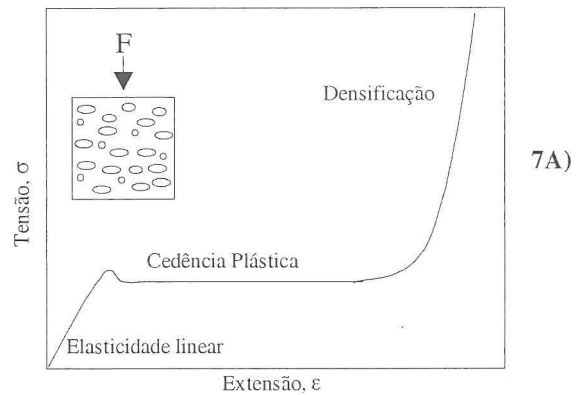


Figura 7: Curvas típicas de tensão - extensão de uma espuma metálica à compressão (7A) e à tracção (7B) [11].

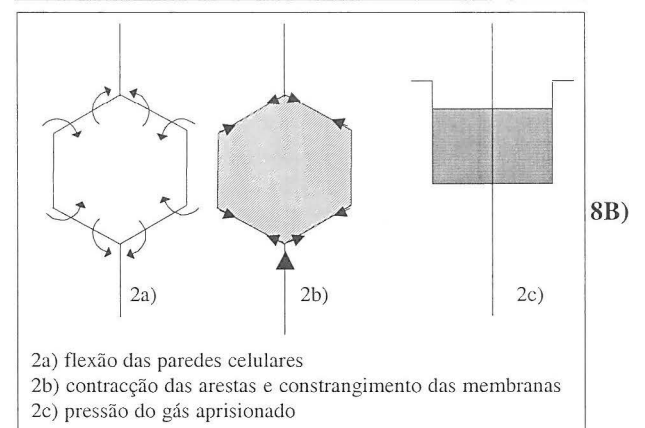
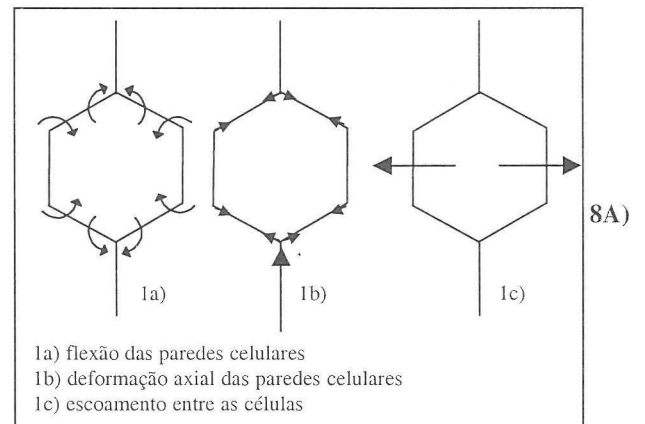


Figura 8: Mecanismos de deformação que ocorrem em espumas de células abertas (8A) e espumas de células fechadas (8B) [11].

As propriedades mecânicas dependem fortemente da densidade aparente das espumas metálicas. A resistência à compressão, a resistência à flexão e o módulo de Young aumentam rapidamente com o aumento da densidade, como se exemplifica na Figura 9.

Tal como o módulo de Young das espumas metálicas, a resistência à compressão apresenta valores mais elevados comparativamente com outros tipos de espumas.

### 3.2.3. Resistência ao impacto

Uma das potenciais aplicações das espumas metálicas é a sua utilização nas estruturas de absorção de energia. A possibilidade de controlar o comportamento tensão - extensão através de uma selecção apropriada do material base, da morfologia (geometria celular) e da densidade relativa faz das espumas metálicas, materiais ideais para tais aplicações. Para a caracterização do comportamento de absorção de energia das espumas, é conveniente determinar a eficiência ( $\eta$ ). A eficiência da energia absorvida compara a deformação da energia absorvida pelo material real ou componente com um absorvedor de energia "ideal". O material "ideal" apresenta uma curva de compressão rectangular (Figura 11), isto é alcança directamente a extensão máxima admissível e mantém-se constante durante todo o processo de deformação. A eficiência ( $\eta$ ) é dada por [9]:

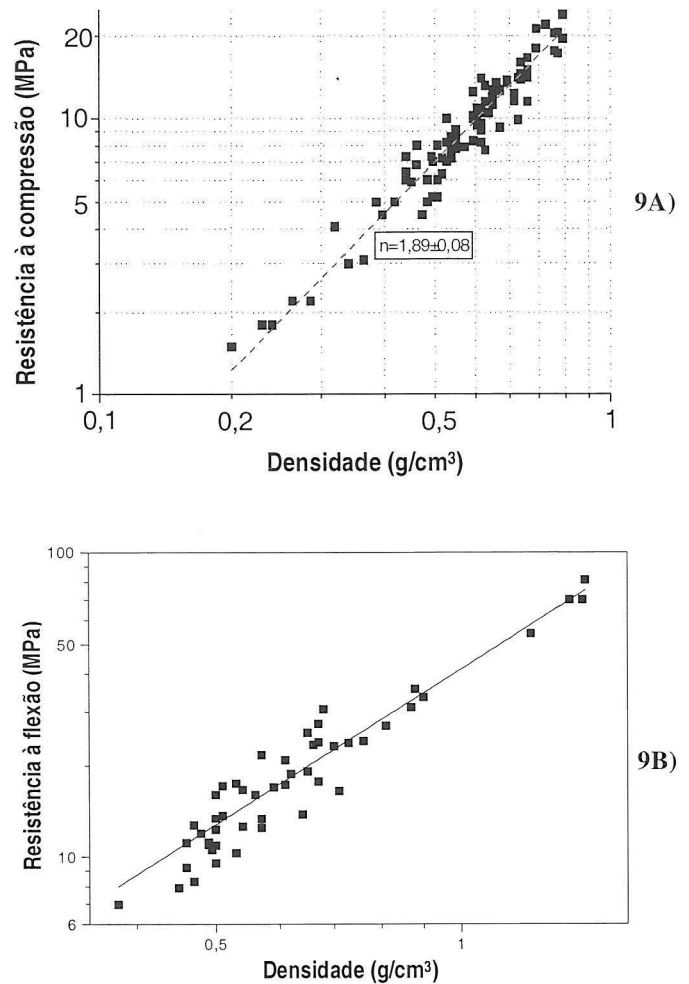
$$Q = -\lambda \frac{dT}{dx} S \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que  $F$  é a força,  $S$  é a deformação e  $F_{\max}$  é a força mais elevada que ocorre acima da deformação  $S$ .

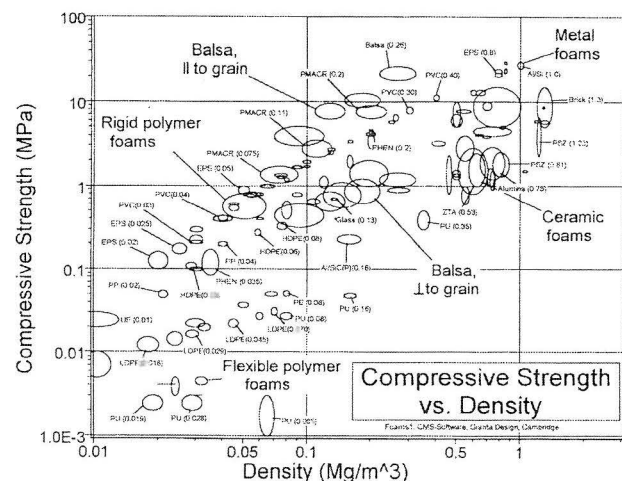
Durante um ensaio à compressão, todos os materiais incluindo as espumas apresentam uma variação de tensão. A eficiência também varia durante o processo de deformação e depende do comportamento mecânico e metalúrgico. A qualidade dos sistemas de absorção de energia é definida pela sua capacidade de retenção de energia sem atingir a zona de falha ou dano. O parâmetro crítico dos absorvedores de energia é a tensão máxima que ocorre durante a compressão.

A Figura 12 exemplifica o comportamento de deformação de espumas de alumínio com diferentes densidades submetidas à compressão.

A energia absorvida por volume de material corresponde directamente à área sobreada abaixo da curva respectiva de tensão – extensão (Figura 12). A uma tensão de deformação constante verifica-se que as espumas metálicas tem a capacidade de absorver mais energia comparativamente com um metal maciço, quando submetidas acima de um determinado nível de tensão. A maioria da energia absorvida é irreversivelmente convertida em energia de deformação plástica, o qual corresponde a uma das vantagens das espumas metálicas. Em contraste, uma matriz densa deformada num regime de tensão linear elástica reversível, liberta a maior parte da energia retida antes da carga ser removida.



**Figura 9:** Variação da resistência à compressão (9A) e resistência à flexão [9] (9B) com a densidade de espumas de alumínio [12].



**Figura 10:** Comparação da resistência à compressão de espumas metálicas com outras espumas [4].

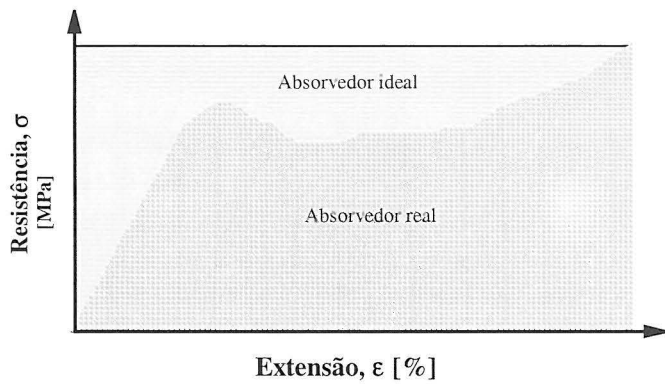


Figura 11: Representação esquemática da curva de resistência versus extensão [11].

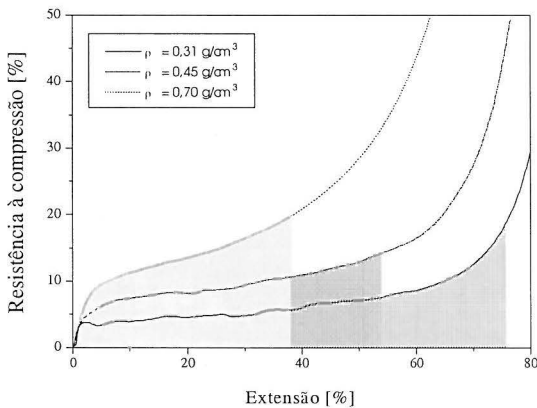
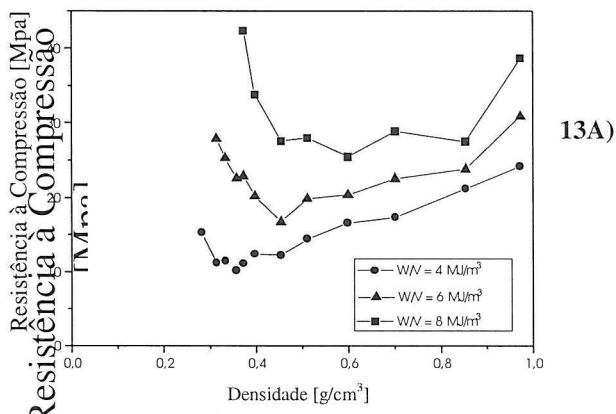
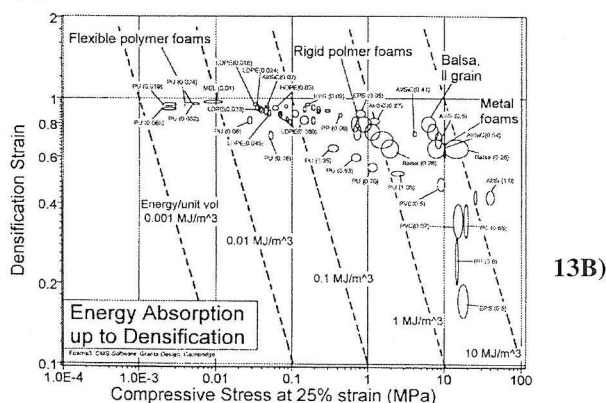


Figura 12: Curvas de compressão de espumas de alumínio com diferentes densidades [9].



13A)



13B)

Figura 13: Diagramas de absorção de energia A) espumas de alumínio [13] B) Comparação com outros tipos de espumas [4].

Propriedades como a densidade relativa, a morfologia celular, a anisotropia assim como os gradientes de densidade influenciam o comprimento da área de patamar durante a compressão. Num regime de densificação a eficiência diminui com um aumento da tensão.

A escolha dos absorvedores de energia pode ser feita através diagramas de absorção de energia (ver Figura 13). Para tal, espumas metálicas com diferentes densidades são testadas à compressão, a uma velocidade de extensão e temperatura constantes. A área abaixo de cada curva é medida e representa a energia absorvida por unidade de volume (W/V).

Para cada densidade existe um valor mínimo de tensão de cedência. Assume-se que uma espuma quase ideal absorve a uma tensão mínima. As espumas metálicas têm vindo a mostrar uma maior capacidade de absorção e dissipação de energia comparativamente com outros tipos de espumas (ver Figura 13B), pelo que poderão ser utilizadas como barras protectoras frontais e laterais, reforço da carroçaria, tectos de abrir, capôts, etc. devido à sua elevada capacidade de absorção e dissipação de energia que, para além de diminuir o consumo de combustível do veículo devido à diminuição de peso, origina o aumento da segurança passiva dos passageiros.

### 3.3. Propriedades térmicas

As espumas metálicas poderão ser utilizadas como isolantes térmicos, devido à sua baixa condutividade. Factores como uma baixa fracção em volume de fase sólida existente nas espumas, um reduzido tamanho de células que suprime os fenómenos de convecção e de radiação através da absorção repetida e reflectida pelas paredes celulares, e mesmo uma baixa condutividade das células contribuem para tais aplicações. As espumas de células fechadas tem uma baixa condutividade térmica comparativamente com um isolamento convencional. A condutividade térmica ( $\lambda$ ) é definida pela seguinte equação de acordo com a lei de Fourier [5]:

$$\eta = \frac{\int_0^s F(s') ds'}{F_{\max}(s)s} \quad (\text{Eq. 4})$$

em que  $Q'$  é o variação de caudal térmico através do provete,  $dT/dx$  é o gradiente de temperatura e  $S$  é a área de secção recta.

A condutividade térmica das espumas metálicas é atribuída apenas às paredes metálicas das células, a qual é dada pela condutividade térmica do metal base. A parte restante é a célula preenchida por um gás que tem em geral uma muito baixa condutividade térmica quando comparada com o material de base. Como mencionado atrás as espumas caracterizam-se pela baixa fracção de sólidos (em volume) sendo a sua densidade relativa ( $\rho^*/\rho_s$ ) definida como o quociente entre densidade da espuma ( $\rho^*$ ) e a densidade do sólido (material de base) que compõe as paredes ou segmentos unitários da célula ( $\rho_s$ ). Deste modo a condutividade térmica depende fortemente da condutividade térmica do material de base, e diminui com a diminuição da densidade da espuma. Verifica-se que pode

ocorrer um ligeiro aumento da condutividade com o aumento da temperatura de serviço. No entanto tal poderá não ocorrer devido à possibilidade de fenómenos de oxidação.

### 3.4. Propriedades eléctricas

Apenas uma pequena percentagem da espuma é electricamente condutora, a qual corresponde ao valor da condutividade eléctrica do material de base constituinte das paredes celulares. As paredes celulares tem tendência a serem continuamente cobertas por filmes de óxidos electricamente não - condutores. As células fechadas são preenchidas com gás formando um dieléctrico. A condutividade eléctrica diminui com a diminuição da densidade de uma forma não-linear. A condutividade eléctrica aumenta linearmente com a densidade relativa, analogamente como a condutividade térmica. A constante de proporcionalidade reflecte a redução na condutividade devido à irregularidade do patamar da espuma. A condutividade eléctrica pode ser descrita usando a mesma constante de proporcionalidade como no caso da condutividade térmica (2/3). A resistividade  $R$ , é similarmente descrita por [5]:

$$R^* \propto \frac{R}{\rho^* / \rho_s} \quad (\text{Eq. 5})$$

Em que  $\rho^*$  é a densidade da espuma e  $\rho_s$  é a densidade do sólido (material de base) que compõe as paredes ou segmentos unitários da célula.

### 3.5. Propriedades acústicas

As propriedades acústicas – a energia sonora que se propaga no material é convertida em energia térmica através da fricção entre as membranas. As espumas, especialmente as de estrutura aberta (células inter - ligadas), absorvem o som (*input*), o qual é reflectido no interior da espuma entre as células. A superfície das células vibram convertendo a energia sonora em energia térmica (calor). Verifica-se que uma considerável diminuição de energia sonora, a qual é reflectida no interior das células. A capacidade de absorção sonora do material é definida pelo seu coeficiente de absorção que corresponde ao quociente entre a intensidade sonora não reflectida à superfície e a intensidade de som incidente. Este coeficiente varia com a frequência e o ângulo de incidência. O coeficiente de absorção é função da espessura do material, da densidade da espuma e do tamanho de célula.

A velocidade de amortecimento vibracional na estrutura do material pode ser definido pelo factor de perda. Este factor ( $\eta$ )

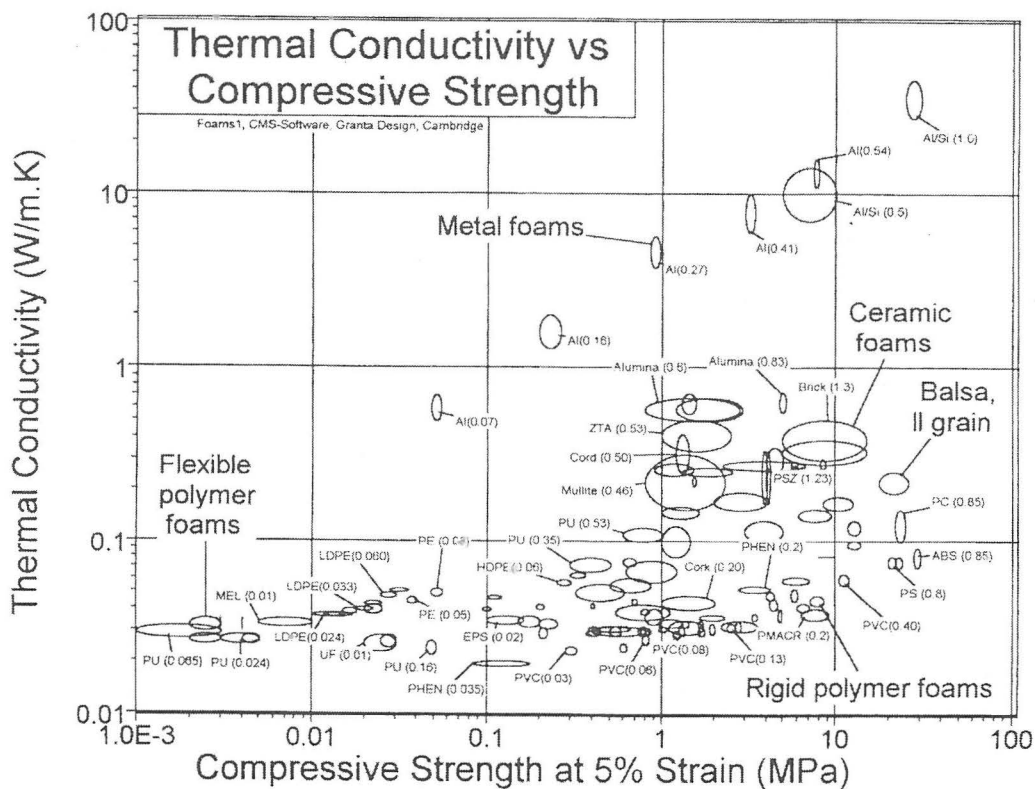


Figura 14: Variação da condutividade térmica com a resistência à compressão [4].



é usualmente determinado pelo decaimento da amplitude ( $d$ ) de resposta de vibração à frequência de ressonância ( $f_n$ ) de acordo com a seguinte equação [5]:

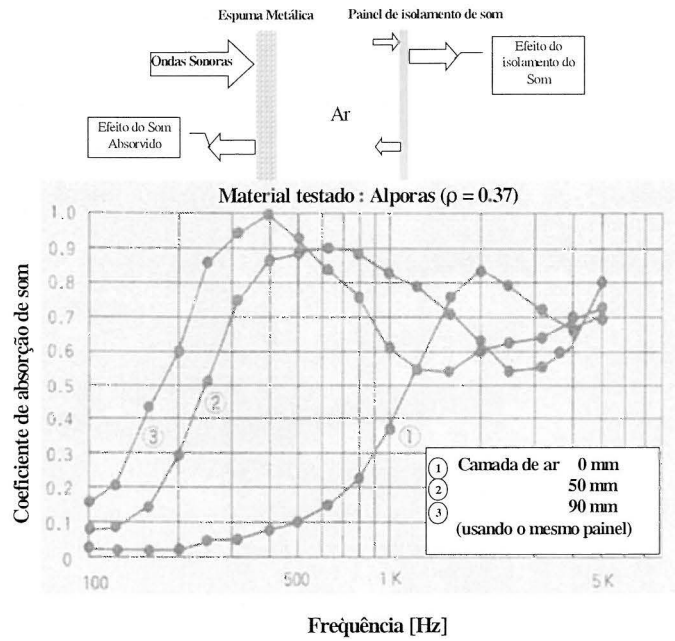
$$\eta = 0,036 \frac{d}{f_n} \quad (\text{Eq. 6})$$

A vibração nas estruturas celulares é dissipada através da deformação plástica nas paredes finas das células. Isto pode também ser reduzido pelo atrito entre as superfícies das fendas que aparecem nas paredes das células.

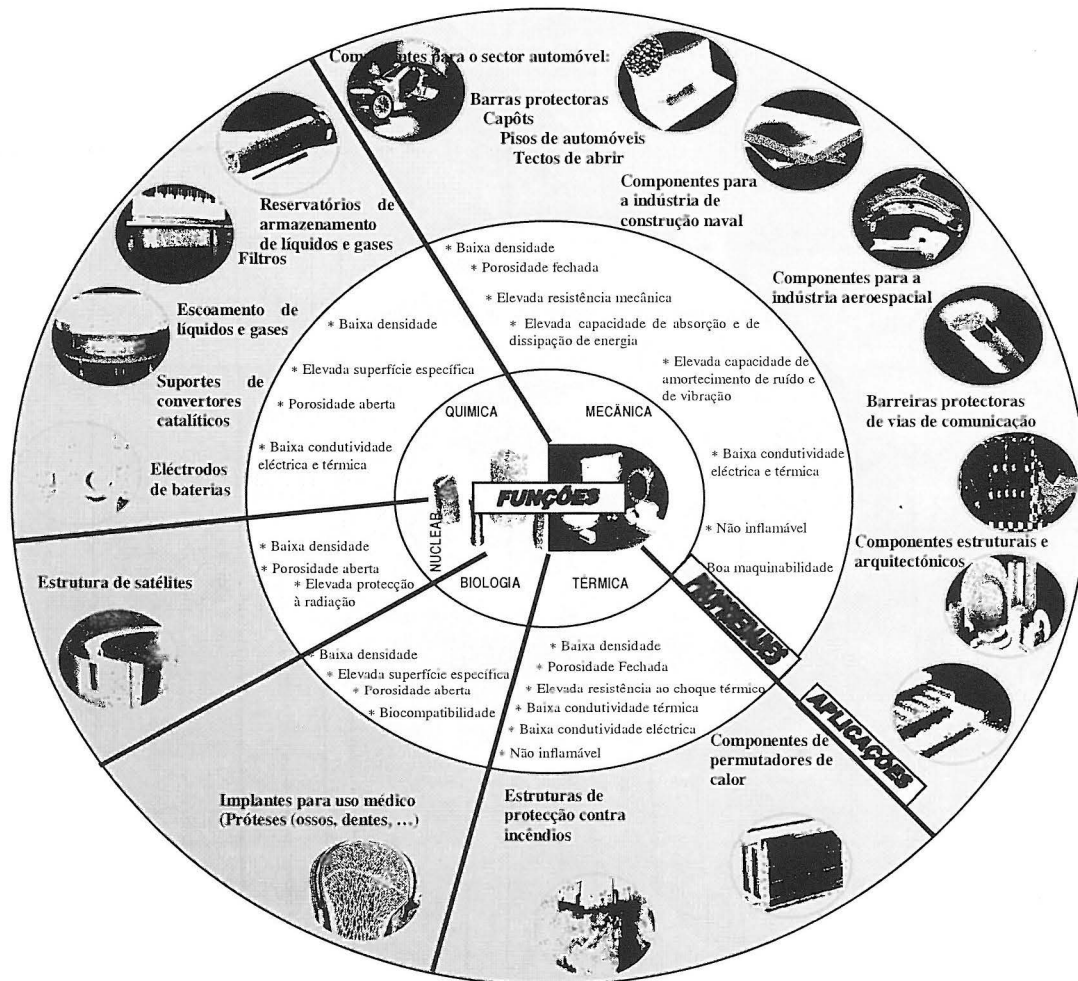
Na Figura 15 apresenta-se a variação do coeficiente de absorção de som com a frequência para uma espuma de alumínio comercial “Alporas” de densidade 0.37 g/cm<sup>3</sup>. A uma porosidade muito fina e uma estrutura aberta corresponde uma capacidade mais elevada de absorção de som.

**4. Aplicações**

Consoante o tipo de estrutura das espumas metálicas – de células abertas e de células fechadas - assim se identificam as suas aplicações [6, 11, 15 - 16]. A Figura 16 mostra as actuais



**Figura 15:** Variação do coeficiente de absorção com a frequência [14].



**Figura 16:** Principais aplicações das espumas metálicas [6, 11, 15-16].

aplicações mais importantes das espumas metálicas indicando as propriedades mais relevantes para cada tipo de aplicação. Como se pode observar as espumas de células abertas tem como aplicações principais na indústria química, preferencialmente os filtros, os reservatórios de armazenamento de fluídos e gases e mesmo os permutadores de calor devido a factores como a porosidade aberta, a elevada área específica e a baixa condutividade térmica e eléctrica. Contrariamente as espumas de estrutura fechada apresentam as suas principais aplicações no domínio da indústria de transportes. Na aplicação específica relacionada com o sector automóvel, estas poderão ser utilizadas nas barras protectoras frontais e laterais, no reforço da carroçaria, nos capôs e outros componentes, que devido à sua elevada

capacidade de absorção e dissipação de energia, para além de diminuir o consumo de combustível do veículo devido à diminuição de peso, origina também o aumento da segurança passiva dos passageiros.

### 5. Principais empresas e instituições envolvidas neste mercado

Na tabela 3 apresentam-se as principais instituições e/ou empresas que fabricam e comercializam espumas metálicas.

Na tabela 4 apresentam-se as principais instituições envolvidas na área das espumas metálicas.

**Tabela 3:** Principais instituições e/ou empresas fabricantes de espumas metálicas [11].

Processo de fabrico	Nome da empresa e/ou instituição	Nome Comercial	Exemplos de espumas metálicas	Aplicações
A partir de metal fundido				
Expansão directa do metal fundido	Shrinko Fire (Japão)	Alporas	Al e suas ligas (estrutura fechada)	Isolamento de som, componentes estruturais.
	Cymat (Canada)	Alcan		
	Hidroaluminium (Noruega)			
Solidificação eutética de sólido - gás	Dnepropetrovsk Metallurgical Institute DMI (Ucrânia)	Gasar	Al, Cu, Ni, Mo, Be, Co, Cr, W, aço (estrutura fechada)	
Método de Fundição de precisão	ERG Materials Division (USA)	Duocel	Al, Cu, Ti, Ni (estrutura aberta)	Semicondutores, aplicações criogénicas
A partir de pós metálicos				
Pulverotecnologia	Fraunhofer Institute (Bremen, Alemanha)		Al e ligas, Ti, Pb, Ni-Cr, Fe-Cr, Aços	Aplicações estruturais, componentes para a indústria automóvel, naval, ...
	Mepura (Áustria)	Alulight-panels	Al, Ti, Ni-Cr, Fe-Cr	
Aprisionamento de gás inerte	Mc Donnell Douglas	Al		
A partir de partículas ionizadas				
Técnicas de deposição	Dunlop Ltd.(GB)	RETIMET	Ni, Cu, Pb, Zn, Fe, Co, Cd (estrutura aberta)	Eléctrodos para baterias, eléctrodos para electrólise, filtros, ...
	Sumitomo(Japão)	CELMET		
	SEAC International B.V.	Recemat		
Deposição por vazamento	Illichimann (Alemanha)	Alulight-castings	Al (estrutura fechada)	Aplicações estruturais

**Tabela 4:** Principais instituições envolvidas na área das espumas metálicas [6, 11, 15-16].

Instituição/Universidade	Tarefas
À nível da avaliação e caracterização das propriedades	
University of Cambridge (Inglaterra)	Modelização matemática e avaliação das propriedades mecânicas
University of Stuttgart (Alemanha)	Testes multi-axiais
Technical University of Vienna (Institut für Bodenkunde) (Áustria)	Comportamento à fadiga
Fraunhofer-Institute Chemnitz (Alemanha)	Comportamento mecânico de estruturas de compósitos baseada em espumas
ING Grenoble (França)	Testes e modelização
Tech. Universität Braunschweig (Alemanha)	Comportamento à fadiga
A nível da identificação das potenciais aplicações das espumas	
National Physical Laboratory (EUA)	Identificação das potenciais aplicações das espumas
A nível da avaliação da cinética do processo de formação e desenvolvimento da espuma metálica e sua modelização matemática.	
Fraunhofer-Institute for Advanced Materials	Desenvolvimento de ferramentas e meios que permitam a visualização do processo de expansão durante a formação da espuma, e avaliação da sua cinética.
Technical University of Vienna (Áustria)	Idem
University of Dublin	Modelização matemática do processo de expansão.
Departamento de Materiais e Tecnologias de Produção do INETI	Cinética do processo, Modelização matemática do processo de expansão.

Recomenda-se ao leitor que esteja interessado nesta área para ver a página da NET: <http://www.metalfoam.net/>.

## 6. Perspectivas futuras de aplicações das espumas metálicas

Apesar das inúmeras aplicações das espumas metálicas de estrutura fechada já demonstradas, é na indústria de transportes e principalmente no sector automóvel, que estas apresentam grandes potencialidades. O sector automóvel é um dos sectores que mais influencia a economia do mercado da Europa. Os Países da União Europeia operam neste sector de actividade apresentando legislação e mesmo consciencializando as empresas para a importância da segurança, salvaguardando simultaneamente, os aspectos ambientais e de qualidade. Num contexto de mercado exigente e concorrencial, as empresas são impelidas a considerar a segurança passiva e activa dos passageiros e a respeitar objectivos exigentes no respeitante aos consumos de combustível. Neste contexto, as grandes construtoras de automóveis tentam lançar no mercado veículos de baixo consumo (mais leves) e mais seguros que garantam a protecção do habitáculo em caso de acidente. Desta forma, existe a necessidade de uma procura constante de novos materiais para satisfazer estes dois requisitos. Relativamente ao aspecto da segurança, passa por soluções como a incorporação de barreiras protectoras de materiais que tenham uma elevada capacidade de absorver energia ao impacto, de forma a proteger o habitáculo em caso de acidente. Por outro lado, a diminuição de consumo passa pela utilização de materiais leves.

As espumas metálicas, em particular as espumas de alumínio e suas ligas, apresentam baixo peso, elevada resistência ao impacto e elevada capacidade de amortecimento de ruído e vibrações relativamente aos materiais actualmente utilizados (alumínio e aço), tornando-as as mais adequadas para este tipo de aplicações.

Actualmente, existem vários Projectos de Investigação a decorrer na Europa e nos Estados Unidos entre Grandes Marcas Construtoras de Automóveis e Institutos de Investigação que estão a testar as espumas metálicas - que tem revelado ser um potencial concorrente dos actuais materiais usados como aço e ligas de alumínio. Actualmente, está a decorrer um projecto que envolve a empresa de componentes automóveis Alemã Karmann (Osnabrück, na Alemanha) com a BMW (Munique) que tem como objectivo testar estruturas do tipo *Sandwich* (metal - espuma metálica) para aplicações na indústria automóvel [16]. Convém salientar que a empresa Karmann (na Alemanha) tem já uma linha de produção de componentes de espumas de alumínio e está a incorporá-los no Mercedes CLK [16]. No entanto, convém ainda salientar que outras marcas de automóveis com a Renault (em França), a Fiat (em Itália) tem também projectos de investigação com Infra-estruturas Tecnológicas para testarem e desenvolverem componentes em espumas metálicas, em particular as de alumínio e suas ligas. Nos aviões as espumas metálicas de estrutura aberta poderão ser utilizadas como reservatórios de combustível, devido ao seu baixo peso.

No domínio da construção civil as espumas metálicas estão a ser já utilizadas no Japão nos túneis rodoviários, em auditórios, e mesmo em revestimentos de edifícios, para isolamento de som e de calor [14].

As espumas metálicas de estrutura aberta tem as suas potenciais aplicações na indústria química, estando já a ser utilizadas como filtros, suportes catalíticos, reservatórios de fluídos e eléctrodos para baterias. No campo da medicina é um dos campos que se prevê sucesso na aplicabilidade deste tipo de espumas, em particular espumas de titânio, como implantes devido a biocompatibilidade e à elevada resistência à corrosão [11].

## Referências

- [1] M. Judge, "Foam sweet foam", *New Scientist*, 27 Sep. (1997), 34-37
- [2] <http://www.ifam.fgh.com>
- [3] Duocell product information, ERG INC. Oakland G., USA (1996)
- [4] M. Ashby and L. Gibson, "Cellular solids - Structure and Properties", Pergmon Press GB (1997)
- [5] M.F. Ashby, A. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.N.G. Wadley, "Metal Foams - A design guide", Butterworth-Heinemann (2000)
- [6] J. Banhart, M. F. Ashby, N. A. Fleck (Editors), I Proc. Internacional Conference: Metal Foam and Porous Metal Structures", MIT Verlag, 14-16 June (1999), Bremen, Germany.
- [7] J. Banhart, J. Baumeister M. Weber, "Damping properties of foamed aluminium", *Mat Sci. Eng. A205*, (1996), 221-228
- [8] I. Duarte, A. Ferreira, J. Banhart, "Espumas Metálicas - Processos de Fabrico, Propriedades e Aplicações PARTE I - Processos de fabrico", submetido nesta revista
- [9] J. Banhart, J. Baumeister, "Deformations characteristics of metal foams", *J. Mat. Sci.*, vol.33, (1998), 1431-1440
- [10] [http://deas-www.harvard.edu/users/faculty/evans/technical\\_articles/](http://deas-www.harvard.edu/users/faculty/evans/technical_articles/)
- [11] I. Duarte, "Metal foams - Kinetics and Joining", Relatório Final, European Commission - Marie Curie Training Programme, Contrato N.º ERB-BRMA-CT98-5103, IFAM (Bremen), Alemanha, Oct. 98-Set. 99
- [12] J. Banhart, J. Baumeister and M. Weber, "Aluminium foams for automotive applications", 22th International Symposium on Automotive Technology & Automation, Florence, 3-6.6, (1996), 8 pages
- [13] J. Baumeister, J. Banhart, M. Weber, "Aluminium foams for transport industry", *Materials & Design*, vol.18, N.º 4/6, (1997), 217-220
- [14] Alporas product information, Shinko Wire Co. Ltd., Japan (undated)
- [15] J. Banhart, M. F. Ashby, N. A. Fleck (Editors), II Proc. Internacional Conference: Metal Foam and Porous Metal Structures", MIT Verlag, 14-16 June (2001), Bremen, Germany
- [16] <http://www.metalfoam.net/>