



## CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS MATERIAIS QUE CONSTITUEM ESTRUTURAS SANDWICH COM NÚCLEO DE ESPUMA METÁLICA

HELDER MATA<sup>1</sup>, RENATO NATAL JORGE<sup>1</sup>, A. D. SANTOS<sup>2</sup>, MARCO P. LAGES  
PARENTE<sup>1</sup>, ROBERT A. FONTES VALENTE<sup>3</sup>, ANTONIO AUGUSTO FERNANDES<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade do Porto

IDMEC-Polo FEUP, Faculdade de Engenharia  
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

<sup>2</sup>Universidade do Porto

INEGI, Faculdade de Engenharia  
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

<sup>3</sup>Universidade de Aveiro

Departamento de Engenharia Mecânica  
Campus Universitário de Santiago 3810-193 Aveiro, Portugal

*(Recibido 5 de diciembre de 2011, para publicación 12 de junio de 2012)*

**Resumo** – Neste trabalho os autores visam estabelecer a caracterização mecânica de uma estrutura sanduíche, composta por duas chapas de alumínio (peles), separadas por um núcleo de espuma metálica de alumínio. A espuma metálica assume nesta estrutura uma função inovadora, devido à sua estrutura de matriz porosa, que vai influenciar consideravelmente o comportamento da estrutura. A espuma de alumínio é caracterizada estruturalmente pela sua topologia celular (células abertas ou fechadas), densidade relativa, tamanho das células e forma das células. Neste trabalho, a estrutura sanduíche utilizada tem um núcleo de espuma de células fechadas, do tipo ALPORAS com uma densidade relativa de 9% [1]. A caracterização mecânica da estrutura compósita é realizada recorrendo-se a diferentes ensaios experimentais de tracção e compressão, que permitem obter curvas de força/deslocamento e assim caracterizar o comportamento mecânico do compósito [2]. Os mesmos ensaios experimentais foram também simulados numericamente, utilizando-se o método dos elementos finitos. Os resultados obtidos experimentalmente permitiram obter os diferentes parâmetros necessários para os modelos constitutivos elástoplásticos utilizados no método dos elementos finitos. Os resultados numéricos e experimentais são comparados e foram tiradas as respectivas conclusões.

**Palavras-chave** – Estruturas Sandwich, caracterização mecânica, espumas metálicas.

### 1. INTRODUÇÃO

Os acidentes de viação representam actualmente uma das maiores causas de mortalidade. Especialistas em segurança rodoviária concordam que uma redução significativa de mortes e ferimentos pode ser alcançada com recurso à utilização de novos materiais com grande capacidade de absorção de energia. Neste campo, os sistemas de segurança passiva têm ainda grande potencial de evolução, podendo contribuir para reduzir mortes e lesões em acidentes, ajudando a aliviar os custos económicos e sociais associados a este problema.

Do ponto de vista ambiental, a utilização de materiais otimizados em termos de absorção de energia ao impacto, mais leves, irá ter uma influência directa sobre a eficiência térmica e o consumo dos motores, contribuindo para uma redução da emissão de gases poluentes para atmosfera.

É neste enquadramento que se insere, e que faz sentido o estudo/desenvolvimento de novos materiais, tais como o utilizado. O material compósito utilizado é composto por duas peles em chapa de alumínio, separadas por um núcleo em espuma de alumínio. Esta associação permite obter uma excelente resistência e rigidez relativa. As propriedades específicas deste compósito fazem dele um material altamente atractivo do ponto de vista das aplicações estruturais "ultra-light" [1].

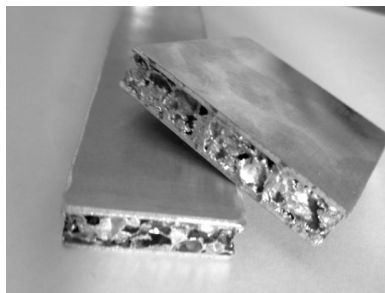
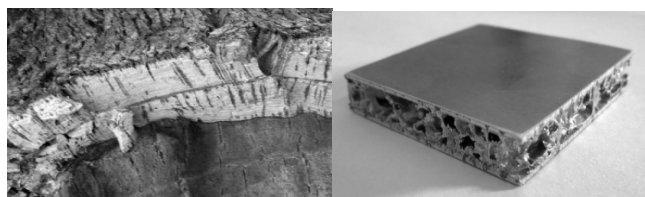


Fig. 1. Painéis com núcleo em espuma de alumínio estudados neste trabalho.



Materiais Celulares Naturais      Materiais Celulares Metálicos  
Fig. 2. Exemplos de materiais celulares naturais e metálicos.

Os materiais celulares são muito comuns na natureza, tais como a cortiça, madeira, coral, ossos, etc., e essa configuração apresenta diversas vantagens, uma vez que permite combinar uma rigidez elevada com uma densidade relativa baixa. No entanto, devido às dificuldades de produção e reprodução, só recentemente o uso de materiais celulares metálicos começou a ser mais comum. Estes são obtidos através de processos de fabrico ainda não totalmente controlados, sendo essa a razão pela qual o seu uso é ainda limitado [2]. Recentemente esses processos produtivos têm vindo a sofrer melhoramentos, permitindo aumentar a qualidade e reprodutibilidade das propriedades do produto final. Esta tendência deve-se ao incentivo da indústria pelo reconhecimento do grande potencial da aplicação desta classe de materiais. A combinação de uma elevada rigidez com uma baixa densidade, em conjunto com uma boa capacidade de absorção de energia, absorção de vibrações e isolamento térmico, levam à sua utilização para as mais diversas aplicações na indústria aeronáutica, aeroespacial e automóvel. Embora o mercado deste tipo de material seja bastante significativo, tem vindo a crescer rapidamente, devido ao melhoramento dos processos de produção, bem como dos modelos de cálculo numérico [2].

Este trabalho visa estabelecer a caracterização mecânica deste compósito, que pode ser dividida em duas, pelos dois tipos de material que compõem esta estrutura estudada. Feita esta caracterização a obtenção de parâmetros permitiu a construção de modelos numéricos, com vista ao desenvolvimento de processos de conformação plástica por hidroformagem destes painéis.

## 2. DESCRIÇÃO DO MATERIAL

A estrutura compósita utilizada neste estudo é composta por um núcleo de 8 mm de espuma metálica de alumínio com peles de 1 mm em chapa também de alumínio.

### 2.1. Espuma metálica

As espumas metálicas normalmente mantêm algumas das propriedades físicas do material de base. É um material não inflamável e permanecendo não inflamável, sendo geralmente reciclável, de acordo com o material de base que constituinte. Algumas espumas metálicas têm a capacidade de flutuar na água. O coeficiente de expansão térmica também é semelhante ao material de base, tendo no entanto uma condutividade térmica menor [3].

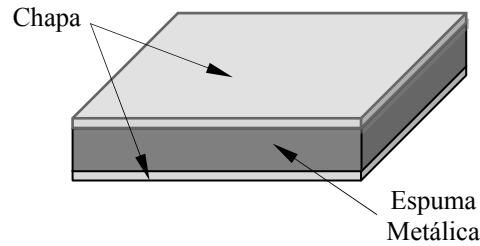


Fig. 3. Painéis com núcleo em espuma de alumínio usados.

A estrutura das espumas corresponde a arranjos tridimensionais de células, que podem ser divididas em dois grupos, de células abertas e de células fechadas. Se os poros da espuma partilham entre si as paredes e as arestas, então a estrutura da espuma diz-se de célula fechada. Quando os poros formam uma rede interligada, a espuma designa-se de espuma de célula aberta. Esta distinção é feita de acordo com a percentagem de porosidade presente na espuma metálica, sendo considerada de célula aberta quando 75-95% do volume da espuma é composta por vazios.

As espumas metálicas de célula fechada caracterizam-se por poderem partilhar entre si as paredes e as arestas. São geralmente feitas por injeção de um gás ou mistura de um agente que promove o aparecimento de porosidades (frequentemente  $TiH_2$ ) em metais fundidos. A fim de estabilizar as bolhas no metal fundido, é necessário um agente de formação de espuma de alta temperatura (para definir o tamanho das partículas sólidas). O tamanho dos poros, ou células, é geralmente entre 1 a 8 mm. As espumas metálicas de célula fechada são utilizadas principalmente como material de absorção de energia de impacto, à semelhança do polímero de espumas de um capacete de bicicleta, mas para impactos de cargas mais elevadas. Ao contrário de muitas espumas poliméricas, as espumas metálicas permanecem deformadas após o impacto, ou seja são deformadas plasticamente. São leves (geralmente 10-25% de densidade, normalmente de alumínio) e de elevada rigidez para o seu peso específico. São frequentemente propostas como um material estrutural leve, no entanto, ainda não são amplamente utilizados para esta finalidade. Este tipo de espuma de metálica, é usada também experimentalmente em próteses para animais [4-6].

A espuma que constitui os painéis em estudo é uma espuma de célula fechada conhecida por ALPORAS, desenvolvida pela Japonesa Shinko Wire Company na década de 90, e tem uma densidade relativa ( $\bar{\rho}$ ) de aproximadamente 9%.

## 2.2. Chapa de alumínio

A chapa de alumínio, é uma chapa da serie EN AW 5754 ( $AlMg_3$ ), sem tratamento térmico e laminada, e que se comporta como um material metálico sólido com um módulo de elasticidade de 70 GPa e com um coeficiente de Poisson de 0,33 [7].

## 3. MODELO CONSTITUTIVO DA ESPUMA

Para descrever numericamente o comportamento plástico das espumas metálicas foi usado neste trabalho o modelo constitutivo de Deshpande [8]. Este modelo constitutivo descreve o comportamento mecânico dos materiais porosos metálicos, completamente diferentes dos materiais metálicos sólidos. Este modelo foi desenvolvido especificamente para tratar espumas metálicas.

### 3.1. Critério de cedência

A definição da superfície de cedência é obtida através da correlação de dados experimentais obtidos num ensaio multiaxial. Este ensaio consiste na aplicação progressiva e simultânea de pressão hidrostática  $p$ , e de uma carga uniaxial que provoca a tensão  $\sigma$ , Fig. 4.

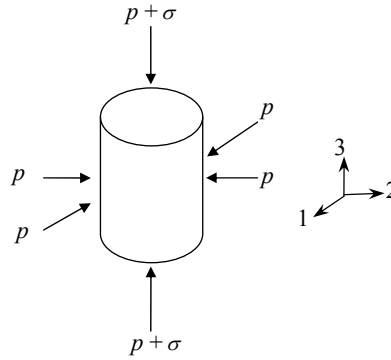


Fig. 4. Carga multiaxial do modelo Deshpande.

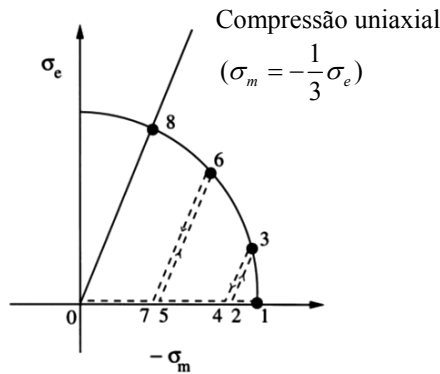


Fig. 5. Definição da superfície de cedência do modelo de Deshpande.

Espumas metálicas apresentam um comportamento aproximadamente linear elástico para pequenas deformações. Tal como para os metais sólidos a lei de Hooke é aplicável à parte linear elástica. Para sólidos isotrópicos e espumas metálicas consideradas isotrópicas a deformação elástica é dada por:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_2 + \sigma_3) \quad (1)$$

Nas espumas metálicas, quando há deformação plástica ocorre uma variação de volume, ao contrário dos metais totalmente sólidos, ditos incompressíveis. Para as espumas metálicas o critério de cedência pode ser formulado do seguinte modo:

$$\hat{\sigma} \geq \sigma_y \text{ com} \quad (2)$$

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

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (4)$$

$$\sigma_e \equiv \sqrt{\frac{3}{2} \boldsymbol{\sigma}'_{ij} : \boldsymbol{\sigma}'_{ij}} \quad (5)$$

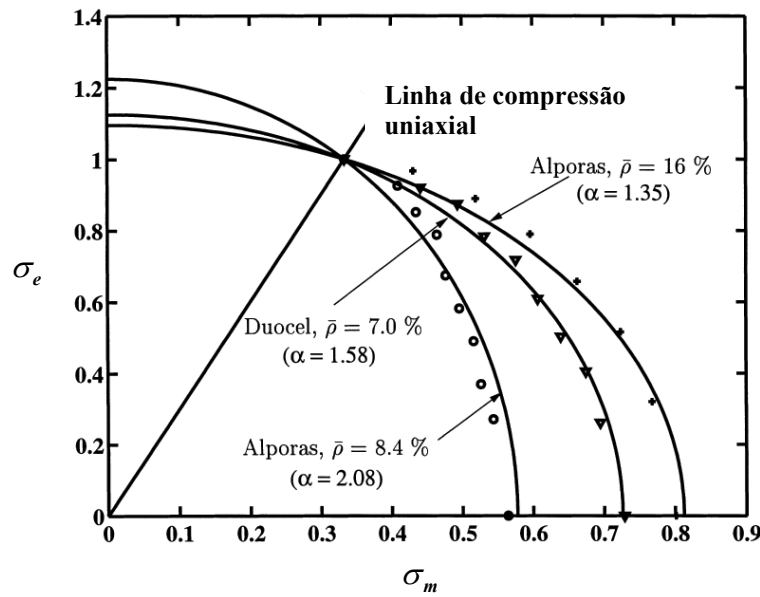


Fig. 6. Resultados da definição da superfície de cedência do modelo de Deshpande segundo o procedimento descrito nas Figuras 4 e 5.

Sendo  $\hat{\sigma}$  o equivalente de tensão,  $\sigma_e$  é a tensão equivalente de von Mises,  $\sigma_m$  é a pressão hidrostática,  $\alpha$  é um parâmetro que define a forma da superfície de cedência, e  $\sigma_y$  a tensão de cedência do material [1].

Considerando um referencial,  $\sigma_m$ , versus tensão equivalente,  $\sigma_e$ , Fig. 5, é possível obter os pontos 1, 3, 6, 8 que definem a superfície de cedência, através da variação da pressão  $p$ , e da carga uniaxial que promove a tensão  $\sigma$  do carregamento multiaxial, ou seja para obter o ponto 1 é aplicada apenas a pressão  $p$  até ser atingida a cedência do material. Para obter o ponto 3 é reduzindo o valor da pressão  $p$  até 2, e é aplicada a carga axial que provoca a tensão  $\sigma$  até ser atingida a cedência, ponto 3, e assim sucessivamente para os pontos 6 e 8, [8].

O resultado do conjunto de pontos obtidos por Deshpande [8], para diferentes espumas e diferentes densidades é dado pela Fig. 6.

### 3.2. Modelo Deshpande

Com base nos resultados experimentais da definição experimental da superfície de cedência anteriormente apresentada, mas considerando agora um referencial  $p, q$ , Fig. 7:

O critério de cedência  $\phi$  pode ser estabelecido do seguinte modo:

$$\phi \equiv \hat{\sigma} - \sigma_y \leq 0 \quad (6)$$

$$\phi = \frac{q^2 + \alpha^2 p^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{\alpha}{3}\right)^2}} - \sigma_y = 0 \quad (7)$$

O fluxo plástico assume-se normal à superfície de cedência, e pode ser definido por:

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p = \dot{\gamma} \mathbf{N} \quad (8)$$

Em que  $\dot{\gamma}$  é o fluxo plástico e  $\mathbf{N}$  é o vector de fluxo.

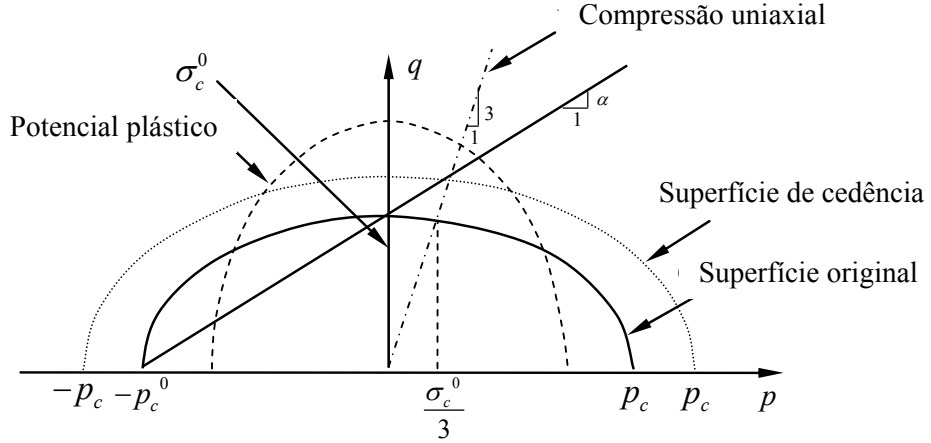


Fig. 7. Modelo Deshpande em referencial  $p, q$  [9], [10].

O coeficiente de Poisson plástico também pode ser definido com base na expressão do fluxo plástico associativo (8) como sendo:

$$\nu_p = \frac{\frac{1}{2} - \left(\frac{\alpha}{3}\right)^2}{1 + \left(\frac{\alpha}{3}\right)^2} \quad (9)$$

Resolvendo a equação anterior em ordem a  $\alpha$ , é possível definir o parâmetro que define a forma da superfície de cedência em função do coeficiente de Poisson plástico

$$\alpha^2 = \frac{9(1 - 2\nu_p)}{2(1 + \nu_p)} \quad (10)$$

Decompondo o tensor das deformações nas componentes elástica e plástica, é possível rescrever o tensor das deformações elásticas da seguinte forma:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p \quad (11)$$

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \dot{\gamma} \mathbf{N} \quad (12)$$

Dado que o modelo em causa é de fluxo associativo, o potencial plástico,  $\Psi$  é igual à função de cedência  $\phi$ , logo,

$$\mathbf{N} = \frac{\partial \phi}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \frac{\partial \phi}{\partial q} \frac{\partial q}{\partial \boldsymbol{\sigma}} + \frac{\partial \phi}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad (13)$$

$$\Leftrightarrow \mathbf{N} = \frac{3q}{\sqrt{(q^2 + \alpha^2 p^2)(\alpha^2 + 9)}} \frac{\partial q}{\partial \boldsymbol{\sigma}} + \frac{3p\alpha^2}{\sqrt{(q^2 + \alpha^2 p^2)(\alpha^2 + 9)}} \frac{\partial p}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad (14)$$

Sendo  $q = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S} : \mathbf{S}}$  a tensão de von Mises, a sua derivada é uma derivada tensorial, dada por:

$$\frac{\partial q}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \left( \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S} : \mathbf{S}} \right) = \frac{3}{2} \frac{\mathbf{S}}{\sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S} : \mathbf{S}}} : \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \frac{3}{2} \frac{\mathbf{S}}{q} : \frac{d}{d\boldsymbol{\sigma}} \left( \boldsymbol{\sigma} - \frac{p}{3} \mathbf{I} \right) = \frac{3}{2} \frac{\mathbf{S}}{q} : \left( \boldsymbol{\Pi} - \frac{1}{3} \mathbf{I} \otimes \mathbf{I} \right) \Leftrightarrow \frac{\partial q}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \frac{3}{2} \frac{\mathbf{S}}{q} \quad (15)$$

Sendo  $p = \frac{1}{3} \text{tr}(\boldsymbol{\sigma})$  a pressão hidrostática, a sua derivada é uma derivada tensorial, dada por:

$$\frac{\partial p}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \left( \frac{1}{3} \mathbf{I} : \boldsymbol{\sigma} \right) = \frac{1}{3} \mathbf{I} \quad (16)$$

Por sua vez, a deformação plástica efectiva é dada por:

$$\dot{\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}}^p = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p} \quad (17)$$

Substituindo na equação os valores de (8) vem:

$$\dot{\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}}^p = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\gamma}^2 \mathbf{N} : \mathbf{N}} = \dot{\gamma} \sqrt{\frac{2}{3} \mathbf{N} : \mathbf{N}} \quad (18)$$

O modelo de Deshpande [8] pode então resumir-se da seguinte forma [11]:

Lei elástica:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}^e : \boldsymbol{\varepsilon}^e$$

Critério de cedência:

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\alpha}{3}\right)^2}} \left[ q^2 + \alpha^2 p^2 \right] - \sigma_y(\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^p) = 0$$

Lei de evolução plástica:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p = \dot{\gamma} \mathbf{N}$$

Tensor elástico da taxa de deformação:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \dot{\gamma} \mathbf{N}$$

Evolução da variável de encruamento:

$$\dot{\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}}^p = \dot{\gamma} \sqrt{\frac{2}{3} \mathbf{N} : \mathbf{N}}$$

Critério carregamento/ descarregamento:

$$\phi \leq 0, \dot{\gamma} \geq 0, \phi \dot{\gamma} = 0$$

## 4. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

### 4.1. Ensaio de Compressão

Para obter os parâmetros numéricos requeridos pelo modelo numérico, anteriormente apresentado e que foi utilizado neste trabalho, realizaram-se três ensaios de compressão uniaxial de amostras de espuma, idênticas à espuma dos painéis. A Fig. 8 ilustra o procedimento para a realização deste ensaio e do qual foi possível registar valores de força/deslocamento para este material, que serão posteriormente comparados com os valores numéricos. Este ensaio é também um dos ensaios mais usados para caracterizar o comportamento mecânico das espumas metálicas.

A Fig. 9 mostra de forma esquemática as dimensões das amostras usadas neste ensaio, e das quais foi possível obter valores de força/deslocamento para a espuma.

### 4.2. Ensaio de Tração

Foram realizados ensaios de tração a provetes obtidos dos painéis compósitos, tal como se mostra na Fig. 10.

Os provetes foram obtidos de acordo com a norma ASTM E 8M-04, e solicitados nas extremidades, tal como se mostra na Fig. 11.

A Fig. 12 mostra os três provetes depois de realizados os ensaios de tração. Os resultados deste ensaio levam à obtenção de três curvas força/deslocamento.



Fig. 8. Ensaio de compressão uniaxial.

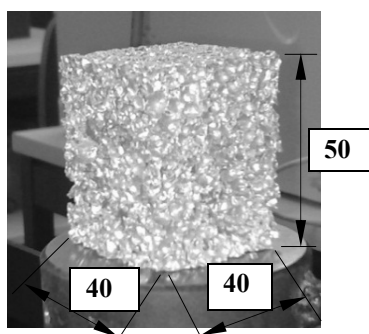


Fig. 9. Amostras usadas no ensaio de compressão uniaxial.



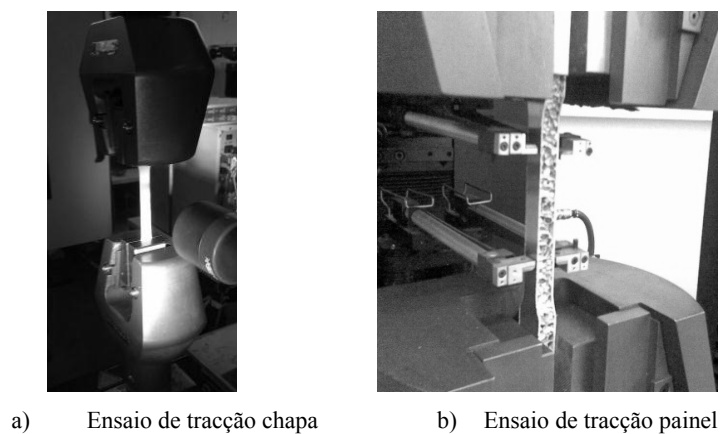
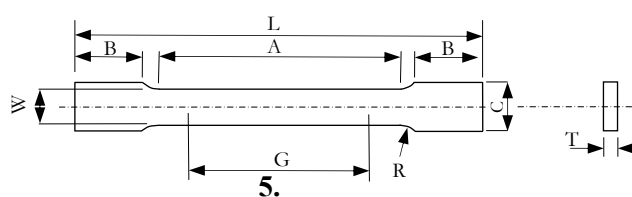


Fig. 10. Ensaio experimental de tracção.



$G=50$ ,  $W=12.5$ ,  $R=20$ ,  $L=200$ ,  $A=75$ ,  $B=50$ ,  $C \approx 20$ ,  
 $T$ - Espessura [mm]

Fig. 11. Provetes usados no ensaio de tracção.

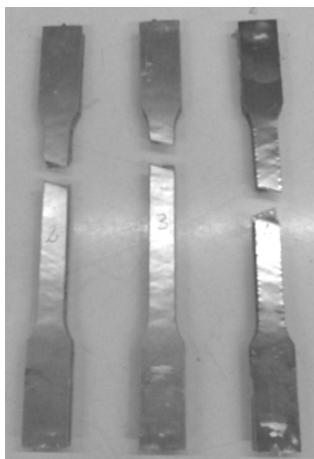


Fig. 12. Resultado final da tracção experimental do material.

Tabela 1. Propriedades da Chapa de alumínio.

	AW 5754
Módulo Young $E$ [GPa]	70
Coefficiente Poisson $\nu$	0.33
Tensão de cedência [MPa]	118

## 5. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Os dados obtidos dos ensaios experimentais foram utilizados para a realização de simulações numéricas destes mesmos ensaios. As tabelas 1 e 2 mostram as propriedades usadas para as chapas de alumínio e para o núcleo de espuma também de alumínio.

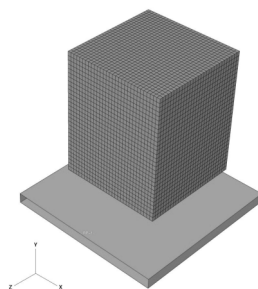
Para as chapas foi assumido um comportamento elástoplástico isotrópico com as propriedades da tabela 1.

Para o núcleo em espuma metálica foi assumido um comportamento elástoplástico, sendo a parte plástica da espuma modelada com o modelo constitutivo de Deshpande [8] anteriormente apresentado. Foram necessárias as propriedades que se mostram na tabela 2 assim como o conjunto de pontos força/deslocamento obtidos através do ensaio de compressão uniaxial.

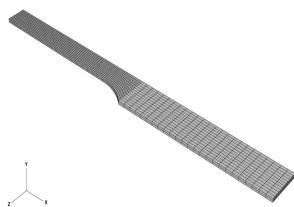
A Fig. 13 mostra as malhas de elementos finitos utilizadas nas simulações numéricas tendo-se utilizado o software Abaqus [9] para a análise. Para a malha de elementos finitos relativamente ao ensaio de compressão, foram utilizados 27000 elementos do tipo C3D8RH, com um total de 29791 nós, tendo sido modelado apenas 1/8 do modelo real (Fig. 13a). A simulação do ensaio de tração da chapa utilizou 3048 elementos, do tipo C3D8R com um total de 4992 nós, tendo-se simulado apenas 1/4 da geometria real (Fig. 13b). Para a simulação do provete obtido a partir dos painéis, foram utilizados 2000 elementos para a pele, e 5000 elementos para a espuma, com um total de 9072 nós. Nesta segunda simulação apenas se modelou 1/8 da geometria real (Fig. 13c).

Tabela 2. Propriedades da Espuma de alumínio

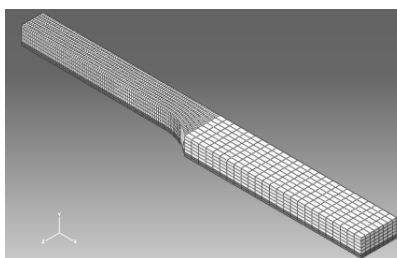
	Módulo Young E [GPa]	Coefficiente Poisson $\nu$	Compression Yield Stress Ratio $k$	Coefficiente Poisson Plástico $\nu_p$
Elástico	0.354	0.33		
Plástico			1.71	0.013



a) Modelo numérico usado para ensaio de compressão uniaxial;



b) Modelo numérico usado para ensaio de tração só chapa;



c) Modelo numérico usado para ensaio de tração painéis;

Fig. 13. Modelos numéricos usados.

## 6. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A Fig. 14 mostra a elevada variação de volume que o provete real e a malha de elementos finitos sofrem, devido à compactação da espuma.

A Fig. 15 mostra os gráficos obtidos para a evolução dos valores de força/deslocamento associados ao ensaio de compressão, registados experimentalmente e obtidos numericamente.

Analisando o gráfico apresentado da Fig. 15, a espuma assume para uma solicitação de compressão um comportamento inicial do tipo linear-elástico, atingindo rapidamente o patamar de cedência, o que fisicamente é interpretado como sendo o início do colapso das células. Esse patamar vai-se manter até à compactação das células que constituem a espuma. Depois de concluída a compactação de todas as células, verifica-se que passa a existir um grande aumento da força para pequenos deslocamentos, o que resulta como consequência da aproximação a um comportamento mecânico de um material sólido. Por outro lado é visível pelo gráfico que os resultados numéricos obtidos para a espuma metálica, com base

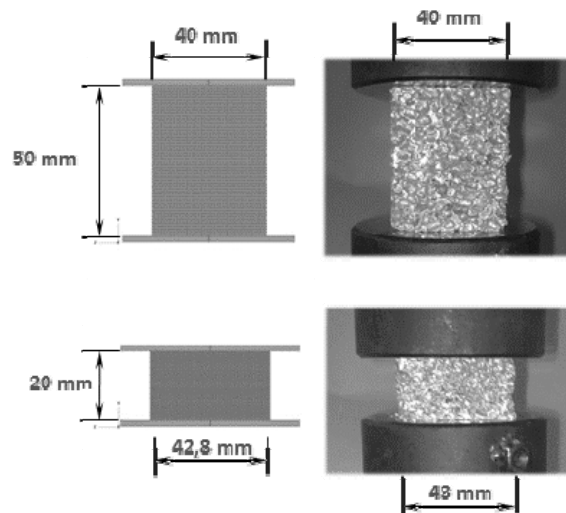


Fig. 14. Resultado final da compactação experimental/numérica do material.

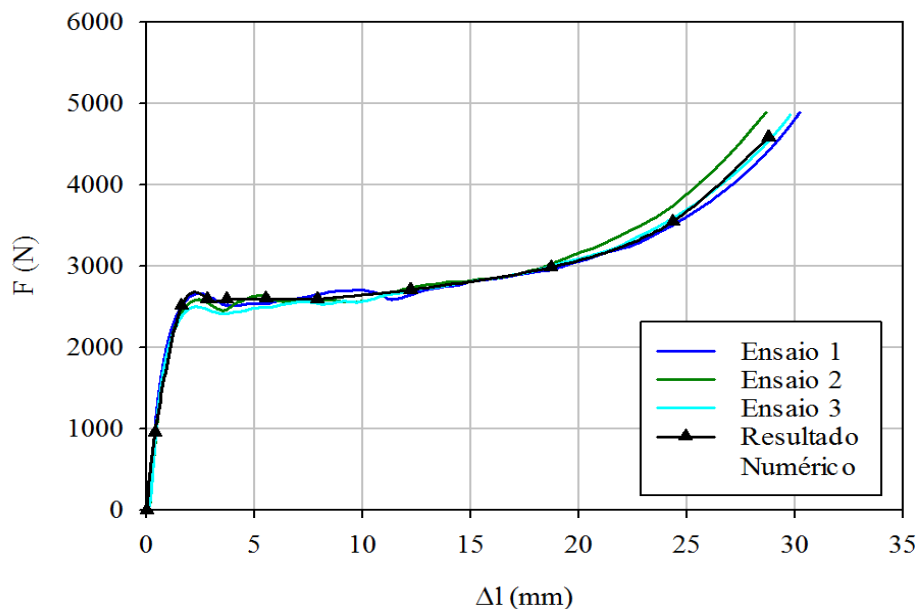


Fig. 15. Pontos força/deslocamento para o ensaio de compressão uniaxial.

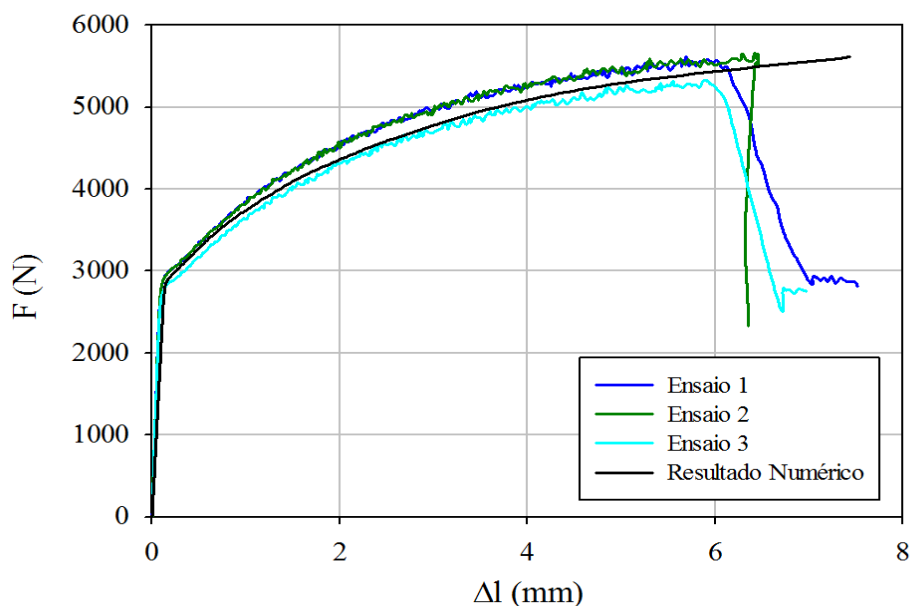


Fig. 16. Pontos força/deslocamento para o ensaio de tracção usando provetes dos painéis.

na utilização do modelo material de Deshpande, estão de acordo com o comportamento mecânico obtido experimentalmente.

Utilizando os resultados da caracterização para a espuma pelo ensaio de compressão uniaxial e os ensaios de tracção para as peles, é possível modelar numericamente os painéis estudados, simulando um ensaio à tracção da estrutura compósita. A Fig. 16 mostra uma comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e numericamente. É possível observar que foi obtida uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais.

## 7. CONCLUSÕES

As curvas obtidas experimentalmente a partir do ensaio de compressão uniaxial, que permitem caracterizar a espuma e a curva numérica com base no modelo elástoplástico de Deshpande apresentam comportamentos semelhantes, tal como é visível no gráfico da Fig. 15. Com o ensaio de compressão também é possível concluir que a espuma metálica quando comprimida sofre uma grande variação de volume. A espuma apresenta uma baixa taxa de expansão lateral, como se comprova nos resultados experimentais e numéricos, mostrados na Fig. 14.

Pela conjugação da caracterização e modelação dos dois tipos de material enquanto estrutura compósita para uma solicitação de tracção é possível concluir que pelos valores de força atingidos, pela forma da curva característica obtida, e pela baixa capacidade de suportar forças de tracção por parte da espuma, que as forças de tracção são fundamentalmente suportadas pelas duas chapas de alumínio demonstrando o seu papel de material resistente no compósito.

Por fim e como forma de melhorar o estudo efetuado seria interessante a realização de trabalhos experimentais complementares, para captar fenómenos de anisotropia associada a ambos os materiais que constituem estes painéis para verificar de que forma esse fenómeno pode fazer variar os comportamentos verificados neste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento concedido pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior - Fundação Para a Ciência e Tecnologia (Portugal) e pelo FEDER / FSE, sob concessão PTDC / EME - TME / 098050 / 2008.

## REFERÊNCIAS

- [1] Ashby, M.F. *et al.*, *Metal foams: a design guide*, Oxford, Butterworth-Heinemann (2000)
- [2] Baumeister, J. *et al.*; “Aluminium foams for transport industry”, *Materials and Design*, **18**, 217-220 (1997)
- [3] Topin, F. *et al.*, “Experimental Analysis of Multiphase Flow in Metallic foam: Flow Laws, Heat Transfer and Convective Boiling”, *Advanced material Engineering*, **8**(9), 890-899 (2006)
- [4] Banhart, J., “Manufacture, Characterization and application of cellular metals and metal foams”, *Progress in materials Science*, **46**, 559-632 (2001)
- [5] Mata, H. *et al.*, “Study of sandwich shells with metallic foam core”, *Int. J. Mater Form*, **3**(1), 903– 906 DOI 10.1007/s12289-010-0914-x, Springer-Verlag France (2010)
- [6] Mata, H. *et al.*, “FEM analysis of Sandwich Shells with Metallic Foam Cores”, *Key Engineering Materials*, **473**, 659-666 (2011)
- [7] Technical Data Sheet EN AW 5754, Gleich Aluminum (2010)
- [8] Deshpande, V.S., Fleck, N.A., “Isotropic Constitutive Model for Metallic Foams”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **48**, 1253–1276 (2000)
- [9] Abaqus, Inc. Abaqus Analysis User's Manual Version 6.4.
- [10] Hanssen, A.G. *et al.*, “Validation of constitutive models applicable to aluminium foams”, *International Journal of Mechanical Sciences*, **44**, 359–406 (2001)
- [11] Neves, M.P.R., *Modelação Constitutiva do Comportamento Mecânico de Espumas Metálicas*, Dissertação de Mestrado, Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto (2009)

## MECHANICAL CHARACTERIZATION OF MATERIALS WHICH CONSTITUTE SANDWICH STRUCTURES WITH FOAM CORE OF METAL

**Abstract** – In this paper the author’s aim to establish the mechanical characterization of a sandwich structure consisting of two aluminum sheets (skins), separated by a metal foam core also in aluminum. The metal foam takes an innovative function in this structure because of its porous matrix structure, which considerably influence the behavior of the structure. The aluminum foam is structurally characterized by their cellular topology (open or closed cell), relative density, cell size and shape of the cells. In this work, the sandwich structure used has a core of closed cell foam, the kind Alporas with a relative density of 9% [1]. The mechanical characterization of composite structure is performed using a number of different experimental tensile and compression tests, which will allow obtaining the curves of force/displacement. These tests allowed characterizing the mechanical behavior of the composite [2]. The same experimental tests were also simulated numerically using the finite element method. The results obtained experimentally possible to obtain the different parameters needed for the elastoplastic constitutive models used in the finite element method. The numerical and experimental results are compared and the conclusions were taken.

**Keywords** – Sandwich Structures, Mechanical Characterization, Metal Foams.