



C •

FCTUC

FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Projecto e Instalação de um Sistema de Barras de Hopkinson em Alumínio para Caracterização Dinâmica de Materiais Compósitos

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Projecto Mecânico

Autor

João Carlos Marques Esteves

Orientador

Professor Doutor José Maria Osório de Sousa Cirne

Júri

Presidente **Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro**
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais

Professor Doutor José António Martins Ferreira
Professor Catedrático da Universidade de Coimbra
Professor Doutor José Maria Osório de Sousa Cirne
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2011

Ao João

Agradecimentos

Ao Professor Doutor José Maria Osório de Sousa Cirne um grande agradecimento pela partilha do seu profundo conhecimento nesta área. Pela orientação e disponibilidade quando as coisas não corriam bem no laboratório e pela compreensão e serenidade que sempre transmitiu no decorrer deste trabalho.

Ao Doutor Hannes Koerber pela disponibilidade e oportunidade concedida, que durante uma semana me recebeu de braços abertos na FEUP, e me proporcionou um primeiro contacto prático, nesta área de conhecimento.

Um grande Obrigado! Ao meu Pai e à minha Mãe pela constante preocupação e apoio, que sempre deram tudo de si para o melhor dos seus filhos.

Um agradecimento especial ao Vasco Branco e à Olga Vale pela amizade e pelo apoio.

Resumo

Este trabalho teve por objectivo o desenvolvimento e instalação de dois sistemas de Barras de Hopkinson em Alumínio e posterior análise de materiais compósitos de baixa densidade. Um dos sistemas desenvolvidos era constituído por 3 barras com 30mm de diâmetro que será designado, sempre que referido posteriormente, por Sistema 30, e o outro por 3 barras de 16mm de diâmetro que será designado por Sistema 16. Um dos sistemas montados foi utilizado para testar materiais compósitos de baixa densidade, espuma sintática, constituídos por resina epoxídica com diferentes percentagens de micro fibras e micro esferas de vidro. Os dados foram posteriormente tratados com a utilização do software DAVID[®]. Pretendeu-se analisar e interpretar o comportamento do compósito com a variação da percentagem de micro esferas e micro fibras em solicitações a elevadas taxas de deformação. Verificou-se no comportamento das espumas sintáticas uma diminuição da tensão limite elástica e do módulo de elasticidade com o aumento da percentagem de micro-esferas.

Palavras-chave: Barra de Hopkinson; SHPB; Taxa de Deformação; Espuma Sintática;

Abstract

Two aluminium Hopkinson Pressure Bars have been developed and installed, one with three 30mm diameter bars called System 30 and other with three 16mm diameter bars called System 16. One of this systems was used to test and further study a low density composite.

The low density composite in test was made of epoxy resin and different quantities of microfiber and glass microsphere.

All acquired data was processed with DAVID software.

The objective was to analyse and interpret the behaviour of the composite according to the variation on the glass microsphere and microfiber content.

Whit the increase of microsphere it's verifying the decreasing of the elastic limit tension and the Young modulus.

Keywords Hopkinson Bar; SHPB; Pressure bar; High Strain Rate; Syntactic foam;

Índice

Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	vii
Simbologia e Siglas	viii
Simbologia.....	viii
Siglas	viii
1. Introdução	1
2. Propagação de Ondas de Tensão em Sólidos	3
3. Barra de Hopkinson: Breve Introdução Teórica.....	6
4. Extensometria	8
5. Instalação do Sistema	14
6. Opção por um Sistema de Barras	22
7. <i>Software</i> DAVID [®]	27
8. Análise e Discussão	30
9. Conclusão	36
10. Bibliografia.....	38
11. Anexo	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representação esquemática da propagação das ondas incidente e reflectida na Barra de Hopkinson.	5
Figura 2. Exemplo da propagação das ondas incidente, reflectida e transmitida, obtidas durante um ensaio pelos extensómetros colados nas barras de Hopkinson e gravadas pelo Osciloscópio.	5
Figura 3. Esquema da estrutura de um extensómetro de grelha simples.	8
Figura 4. Esquema da montagem experimental da ponte de Wheatstone.	10
Figura 5. Esquema da montagem experimental da ponte de Wheatstone numa barra de secção circular solicitada por forças de tracção.	12
Figura 6. Esquema da montagem experimental.	14
Figura 7. Vista geral da zona de ensaios da Barra de Hopkinson, Amplificador Vishay 2210A, osciloscópio Lecroy LT224.	15
Figura 8. Vista geral do velocímetro (4), consola de comando (3) de disparo e canhões de ar comprimido (5).	15
Figura 9. Estação de extensometria aplicada na barra de Hopkinson de 30mm de diâmetro.	18
Figura 10. Estação de extensometria aplicada na barra de Hopkinson de 16mm de diâmetro.	18
Figura 11. Esquema da montagem experimental do sistema de Barras de Hopkinson.	19
Figura 12. Amplificador Vishay 2210A.	20
Figura 13. Osciloscópio Lecroy LT224.	20
Figura 14. Extremidades das barras onde se intercala o provete.	21
Figura 15. Pormenor do provete de espuma sintática em posição de ensaio.	21
Figura 16. Esquema do provete intercalado entre as barras.	22
Figura 17. Onda incidente, reflectida e transmitida num ensaio no sistema de barras de 30mm de diâmetro com o compósito E15F01.	25
Figura 18. Onda incidente, reflectida e transmitida num ensaio no sistema de barras de 16mm de diâmetro com o compósito E15F01.	25
Figura 19. Imagem dos provetes utilizados nos ensaios experimentais. Provetes de secção quadrada com 11mm de lado e secção circular com 15 e 25 mm de diâmetro.	26
Figura 20. Janela de trabalho com as ondas para análise.	28
Figura 21. Janela de trabalho para aproximação gráfica das ondas em estudo através do DAVID [®]	29
Figura 22. Nomenclatura usada na identificação dos provetes.	30
Figura 23. Tensão - deformação para provetes apenas de resina epoxídica.	32
Figura 24. Taxa de deformação para resina epoxídica, ou seja, 0% de micro-esferas e 0% micro-fibras.	32
Figura 25. Variação da Tensão -Deformação para provetes E20F00 com diâmetros de 15mm e 25mm.	33
Figura 26. Variação da Taxa de deformação para o compósito E20F00 em provetes de diâmetro 15mm e 25mm.	34
Figura 27. Variação da Tensão/Deformação com a variação da percentagem de esferas. .	34

Figura 28. Variação da Taxa de Deformação com a variação da percentagem de micro-esferas 35

Figura 29. Comportamento da espuma sintática com a adição de micro-fibras 35

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades mecânicas do Alumínio 7075	16
Tabela 2. Propriedades mecânicas do Alumínio 7020	17
Tabela 3. Intervalos de velocidade do projectil admissíveis para secções circulares dos provetes.....	24
Tabela 4. Intervalos de velocidade do projectil admissíveis em secções rectangulares.....	24
Tabela 5. Variação das percentagens de micro esferas e micro fibras no compósito.....	31
Tabela 6. Densidade e módulo de elasticidade para os vários compósitos.	31

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

σ_c – Tensão de cedência

ε – Deformação

A_0 – Área da secção transversal da barra

A – Área do provete

ρ – Densidade

E – Módulo de Elasticidade

R – Resistência eléctrica

k – Factor Sonda do extensómetro

ν – Coeficiente de Poisson

$\varepsilon_T(t)$ -Deformação provocada pela onda transmitida

$\varepsilon_R(t)$ -Deformação provocada pela onda reflectida

Siglas

SHPB – Split Hopkinson Pressure Bar

OSL – Osciloscópio

ASTM – American Society for Testing and Materials

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

1. INTRODUÇÃO

A Barra de Hopkinson é um método de teste usado para a determinação do comportamento dos materiais a elevadas taxas de deformação. Só nas últimas décadas existiram avanços significativos no uso deste processo como método de análise do comportamento dos materiais. A título de exemplo, refira-se que a parte frontal de um automóvel em condições de impacto pode ter taxas de deformação de 300 s^{-1} . Do mesmo modo processos industriais como a extrusão a alta velocidade, estão sujeitos às mesmas elevadas taxas de deformação.

A técnica experimental da barra de Hopkinson foi uma consequência das experiências das ondas de tensão em fios de aço efectuadas por John Hopkinson em 1872 e mais tarde pelo seu filho Bertram Hopkinson por volta de 1905. (Gama, 2004)

Uma década depois, Bertram Hopkinson, em 1914, desenvolveu a Técnica da Barra de Pressão para experimentalmente determinar a relação de pressão-tempo devido ao impacto provocado por um projectil ou por um explosivo. (Kolsky, 1963)

Em 1941 Dennison Bancroft solucionou a equação de Pochhammer e Love de frequência na barra para velocidades longitudinais em barras cilíndricas. Bancroft expressou a velocidade das ondas longitudinais ao longo das barras cilíndricas em termos de ondas com comprimento de onda infinito, Coeficiente de Poisson, e da razão entre o diâmetro da barra e o comprimento de onda. A utilidade do trabalho de Bancroft aplicado sobre a Barra de ensaios de Hopkinson não era totalmente realizável até ao aumento significativo da capacidade de processamento de dados dos computadores actuais. Bancroft proporcionou avanços significativos na correcção da dispersão das ondas.

Em 1948 Davies usou unidades de condensadores para medir a deformação da barra durante a propagação da onda através desta, em conjugação com osciloscópio conseguiu gravar a onda de compressão na barra de Hopkinson. O sinal do condensador é proporcional á relação de deslocamento e tempo que por seu turno é proporcional à relação de pressão e tempo assumindo que a tensão de compressão na barra é inferior à tensão limite elástica do material de que é constituída a barra. A utilização de condensadores para

medir a deformação na barra aumentou significativamente a precisão da estrutura da Barra de Hopkinson original que usava o momento provocado por um lingote de aço, mas que introduzia uma força desconhecida necessária para quebrar a película de cola que colava o lingote de aço à barra.

Em 1949 Kolsky refez a Barra de Pressão de Hopkinson e em vez de usar um lingote de aço colado na extremidade da Barra de Pressão, usou um provete intercalado entre duas barras. Apresentou expressões para calcular as propriedades do material do provete baseadas nas deformações provocadas nas barras. As deformações eram medidas usando um circuito de condensadores similar ao de Davies. Esta nova estrutura do sistema de Barras de Pressão de Hopkinson exigia a medição das deformações nas duas barras. Esta última versão da Barra de Pressão de Hopkinson tornou-se a mais utilizada até hoje. Em alguma literatura a Barra de Pressão de Hopkinson pode aparecer mencionada como Barra de Kolsky.

Por fim, em 1970 Hauser utilizou extensómetros na Barra de Pressão de Hopkinson para medir o deslocamento na superfície da barra. (Kaiser, 1998)

A estrutura da Barra de Hopkinson actual consiste em duas barras nas quais é intercalado o provete do material a testar. Uma das extremidades da barra, considerada barra incidente ou *input bar*, é impactada com uma terceira barra, projectil, que vai produzir, uma onda de compressão que se propaga ao longo desta barra. Parte da onda de compressão vai ser reflectida, na passagem pelo provete, por este ser constituído por um material diferente e por ter diferentes dimensões, e parte será transmitida à segunda barra, denominada barra transmitida ou *output bar*.

Na barra transmitida e na barra incidente são colocados extensómetros que vão registar a intensidade e o tempo de passagem da onda de compressão.

É demonstrado que as ondas, reflectida e transmitida, são proporcionais para os provetes na razão de tensão-deformação respectivamente.

Através da análise das ondas incidente, transmitida e reflectida registadas nas estações de extensometria é possível caracterizar o comportamento dos materiais ensaiados.

2. PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE TENSÃO EM SÓLIDOS

Os corpos com dimensões finitas e descontinuidades influenciam significativamente a propagação de ondas de tensão. As mais comuns dessas descontinuidades são as variações de secção, as interfaces, os apoios e solicitações e as heterogeneidades dos materiais.

Quando um corpo sólido, em equilíbrio, é sujeito a um impacto com outro produzem-se ondas de tensão que se propagam a todos os pontos desse corpo a velocidade finita. A velocidade de propagação é uma característica das propriedades do material do qual é feito o corpo.

O movimento das partículas nas barras é feito sob a forma de três tipos de ondas que se podem propagar ao longo das mesmas: ondas longitudinais, ondas de torção e ondas de flexão. As ondas longitudinais produzem movimentos axiais das partículas que as constituem. Nas ondas de torção as partículas têm movimento relativo perpendicular à direcção de propagação da onda de tal modo que cada secção se mantém plana embora rodando em torno de um eixo. As ondas de flexão provocam movimentos laterais das partículas da barra produzindo movimentos perpendiculares ao eixo da barra.

Destes três tipos de ondas apenas as ondas longitudinais interessam, sendo as ondas de torção e de flexão desprezáveis, devido ao tipo de solicitação a que a barra está sujeita, solicitação esta provocada pelo impacto de um projectil numa extremidade da barra segundo o mesmo eixo axial, e também, pelo modo como a barra está apoiada que tende a eliminar os movimentos perpendiculares ao eixo da barra.

Nas barras, as descontinuidades com efeitos significativos na propagação da onda incluem a variação do diâmetro da secção, o fim da barra e a variação do material (conhecido como a variação da impedância). Para muitas das aplicações da Barra de Hopkinson a variação da secção ocorre no contacto com as interfaces do provete do material a ensaiar.

Como nenhuma barra pode ter comprimento infinito, existem algumas formas diferentes de extremidades. Algumas das formas mais comuns dessas extremidades são, a extremidade fixa, extremidade livre, ou mesmo a junção com uma outra barra. Como o próprio nome sugere, considere-se a extremidade livre quando a barra não tem nada acoplado e considera-se extremidade fixa quando tem algo acoplado. Desde que a barra tenha a extremidade livre deve examinar-se o efeito que provoca na propagação da onda. Quando a onda encontra a extremidade livre é reflectida de volta.

Existem dois resultados importantes quando se analisa as condições da extremidade livre: na extremidade livre, quando a reflexão ocorre, o valor deslocamento na barra aumenta para o dobro, ou seja, qualquer medição da pressão na barra deve ser distante o suficiente da extremidade, e por outro lado, é devido às condições fronteira da extremidade que a onda reflectida tem sinal oposto do da onda incidente. Então, a onda inicial que era de compressão será reflectida como uma onda de tracção, (Graff, 1991).

De forma esquematizada, na figura 1, encontra-se a teoria de propagação unidimensional de ondas elásticas longitudinais na barra de Hopkinson. O impacto de um projectil cilíndrico gera uma onda incidente na primeira barra, na figura denominada input bar. Este impulso vai carregar dinamicamente o provete intercalado entre a primeira barra e a segunda barra, output bar. O objectivo é avaliar a força $F(t)$ e a velocidade $v(t)$ nas interfaces, E, entre as duas barras e o provete nelas intercalado. Esta análise envolve o conhecimento das deformações $P(t)$ e $N(t)$ provocadas pela propagação das ondas no sentidos considerados positivo e negativo. Estas ondas são geradas pelo impacto do projectil na extremidade esquerda da input bar. Parte da onda gerada pelo impacto é reflectida pelo provete na interface da input bar. Parte é transmitida à segunda barra, output bar, (Bacon, 2001).

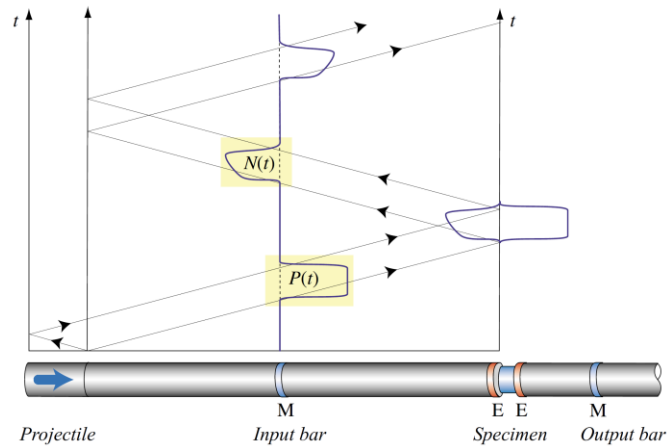


Figura 1. Representação esquemática da propagação das ondas incidente e reflectida na Barra de Hopkinson.

A onda reflectida é uma onda de tracção e a onda transmitida à segunda barra, através do provete, é uma onda de compressão, como a onda incidente. A deformação provocada por estas três ondas é recolhida através de um sinal eléctrico nas duas estações de extensometria M, e registada no osciloscópio, figura 2.

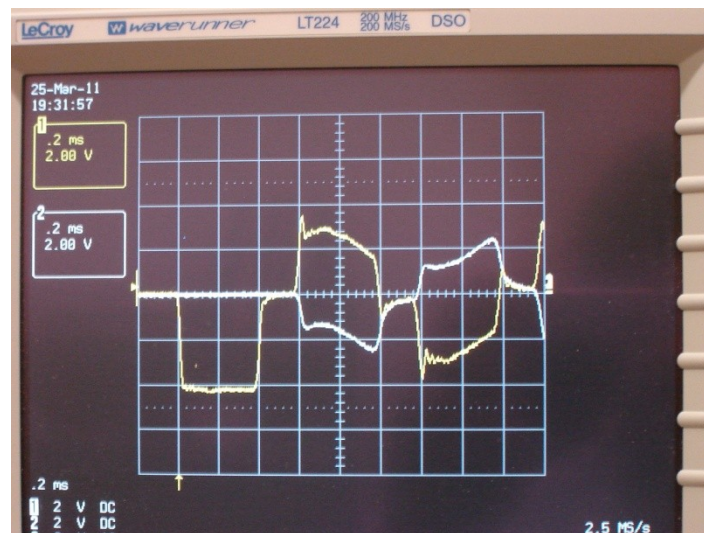


Figura 2. Exemplo da propagação das ondas incidente, reflectida e transmitida, obtidas durante um ensaio pelos extensómetros colados nas barras de Hopkinson e gravadas pelo Osciloscópio.

3. BARRA DE HOPKINSON: BREVE INTRODUÇÃO TEÓRICA

Partindo da obrigatoriedade de que a tensão nas barras esteja abaixo da tensão limite elástica do material do qual são constituídas, a tensão no provete, a deformação e a taxa de deformação podem ser calculada a partir das ondas obtidas nos ensaios experimentais. Segundo algumas condições, essas ondas serão as ondas reflectida e transmitida através do provete.

Kolsky desenvolveu a seguinte relação para o cálculo da tensão no provete de material a ensaiar, (Kaiser,1998).

$$\sigma_s(t) = E \frac{A_0}{A} \varepsilon_T(t) \quad (1)$$

onde E é o módulo de elasticidade da barra transmitida, A_0 é a área da secção transversal da barra transmitida, A é a secção transversal do provete e $\varepsilon_T(t)$ é a onda de deformação transmitida.

A taxa de deformação no provete é obtida segundo a equação

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

onde $\varepsilon_R(t)$ é a onda de deformação reflectida na barra incidente, L é o comprimento inicial do provete, e C_0 é a velocidade de propagação de onda da barra incidente calculada como,

$$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

em que E e ρ são o módulo de elasticidade e a densidade, respectivamente. A equação 3.2 ao ser integrada em relação ao tempo, equação 3.4, obtemos a deformação no provete.

$$\varepsilon_S(t) = -\frac{2C_0}{L} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt \quad (4)$$

Estas equações existem desde os anos 40 mas só na última década, com o aumento da capacidade de processamento dos computadores é que foi possível fazer avanços nesta área.

Uma análise mais aprofundada pode ser encontrada na bibliografia indicada. (Kaiser, 1998), (Kolsky, 1963).

4. EXTENSOMETRIA

A análise da propagação de ondas de tensão nas barras, produzidas pelo impacto do projectil, é feita indirectamente pela colocação de extensómetros na superfície das barras, os quais detectam a deformação produzida no instante da passagem da onda de tensão.

Este método tem a vantagem de ser não destrutivo e de ser económico. Existem diversos tipos de extensómetros, sendo que neste trabalho foram utilizados extensómetros de resistência eléctrica.

Um extensómetro consiste num filamento de uma liga condutora, em forma de grelha, depositado num filme de pequena espessura de material polimérico, figura 3.

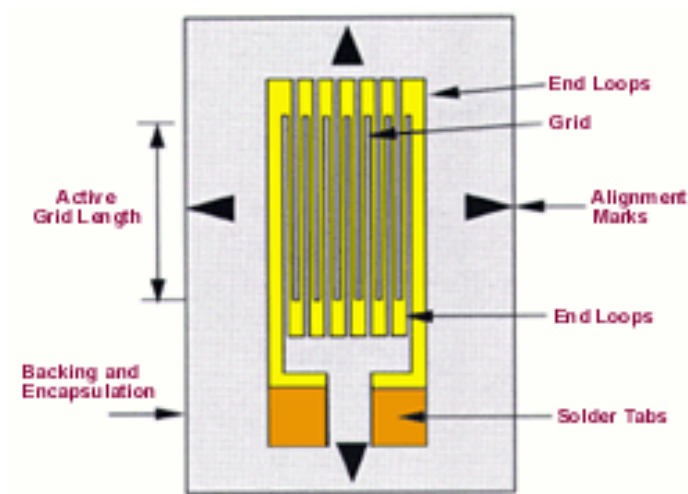


Figura 3. Esquema da estrutura de um extensómetro de grelha simples.

O filamento possui uma determinada resistividade eléctrica, r , comprimento l , e uma área de secção transversal A e uma resistência R que é uma função da geometria.

O extensómetro é colado na superfície na qual se pretende medir a deformação, de forma que a deformação do extensómetro seja solidária com a da superfície e na direcção longitudinal. A área da secção do filamento do extensómetro sofrerá variações

com a variação do seu comprimento, sendo coeficiente de Poisson representativo da proporcionalidade entre essas variações.

O princípio de funcionamento do extensómetro baseia-se no facto da resistência da grelha aumentar com o aumento da deformação e diminuir com a diminuição da mesma, produto de uma combinação de variações do seu comprimento, área e resistividade.

O intervalo de variação de medida está relacionado com a deformação que o extensómetro pode registar e está dependente das propriedades mecânicas da base polimérica e da grelha.

A sensibilidade define o valor mais pequeno de deformação que pode ser medido na escala associada à deformação do extensómetro. Esta característica e o intervalo de variação de medida estão relacionados e são fornecidos pelo fabricante.

Outro factor característico do extensómetro é o factor de sonda, (gage factor), K.Hoffmann (1984), fornecido pelo fabricante. Este factor é essencialmente uma constante de proporção e designa a razão entre a variação relativa da resistência eléctrica $\Delta R/R$ do extensómetro e a deformação ε , fonte da variação da resistência eléctrica.

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (5)$$

A grande maioria dos extensómetros de grelha metálica é construída em ligas Constantan, Karma, Nichrome V, e tem um factor de sonda próximo de 2. A tolerância do factor de sonda depende da série de extensómetro, varia $\pm 0,5\%$ ou $\pm 1\%$.

A resistência eléctrica, R , da secção uniforme de uma grelha, de comprimento l , área A , e resistividade ρ , é dada por:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (6)$$

A partir de cálculos matemáticos, demonstrados teoricamente (Rilley and Dally, 1987) obtém-se:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l}(1 + 2\nu) \quad (7)$$

Reescrevendo a equação 4.3 e considerando a lei de Hooke, tem-se:

$$\varepsilon = \frac{dl}{l} \quad (8)$$

Substituindo em 4.3,

$$S_A = \frac{dR/R}{\varepsilon} = 1 + 2\nu + \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon} \quad (9)$$

S_A é a sensibilidade da liga metálica usada no condutor e define a variação da relação $\Delta R/R$ e a deformação aplicada ε . (Rilley and Dally, 1987).

O aproveitamento desta característica é efectuado através de um circuito eléctrico denominado Ponte de Wheatstone, esquematizada na figura 3.

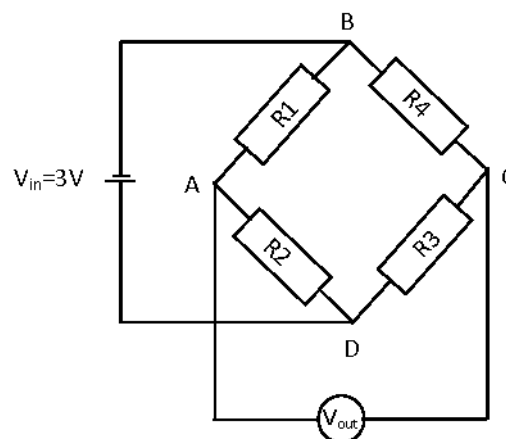


Figura 4. Esquema da montagem experimental da ponte de Wheatstone.

A ponte de Wheatstone é o circuito mais usado para a leitura de deformações produzidas, por solicitações estáticas ou dinâmicas, com extensómetros.

Se os nodos A e B, estão sujeitos a uma diferença de tensão de alimentação do circuito V_{in} , então a diferença de tensão entre os nodos B e D será V_{out} . O valor da tensão V_{out} , depende da razão entre as resistências R_1/R_2 e R_4/R_3 .

Considerando a razão entre as tensões V_{in} e V_{out} , tem-se:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (10)$$

A ponte considera-se em equilíbrio se

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 0 \quad (11)$$

o que obriga que $R_1=R_2=R_3=R_4$ ou $R_1/R_2=R_4/R_3$.

Se as resistências R_1 a R_4 variarem a ponte irá ter uma variação de tensão V_{out} se se assumir que a variação da resistência ΔR é muito inferior ao próprio valor de cada uma das resistências R_i , o que é sempre verdade para todo o tipo de extensómetros metálicos.

Considerando as quatro resistências iguais entre si e iguais a R , obtém-se:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (12)$$

Tendo em consideração a equação 4.1, fica

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (13)$$

É este balanço que permite a utilização da Ponte de Wheatstone para a medição de deformações. A ponte tem de ser equilibrada antes da aplicação das deformações, ou seja $V_{out}=0$ V.

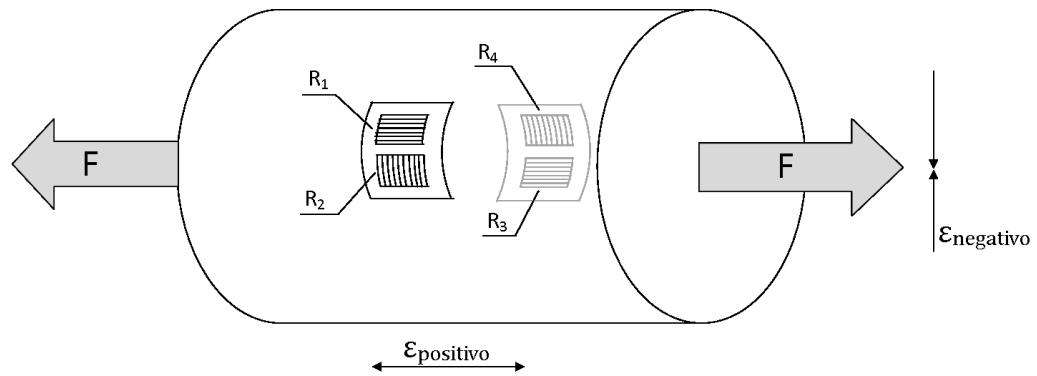


Figura 5. Esquema da montagem experimental da ponte de Wheatstone numa barra de secção circular solicitada por forças de tracção.

A deformação na direcção da força na barra de secção cilíndrica, $\epsilon_1 = \sigma/E$, normal a esta direcção, tem uma contracção

$$\epsilon_2 = -\nu \cdot \epsilon_1 \quad (14)$$

O coeficiente de Poisson, ν , toma o valor aproximado de 0,33 para o Alumínio, k é o factor de sonda. Assim, tem-se uma variação de resistência determinada por:

$$\Delta R_1 = \epsilon_1 \cdot k \cdot R_1 \quad (15)$$

na grelha R_1 do extensómetro. Em R_2 esta variação será dada por

$$\Delta R_2 = -\nu \cdot \epsilon_1 \cdot k \cdot R_2 \quad (16)$$

Este tipo de análise também se aplica para R_3 e R_4 , respectivamente.

Com os extensómetros ligados entre si na forma de ponte de Wheatstone completa, figura 3, o sinal de saída, V_{out} , descrito através da equação 4.9, pode ser obtido

$$\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = \frac{k}{4} [\epsilon_1 - (-\nu\epsilon_1) + \epsilon_3 - (-\nu\epsilon_3)] \quad (17)$$

Com $\nu \approx 0,33$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \varepsilon$ e $\varepsilon_2 = \varepsilon_4 \approx -0,33\varepsilon$, obtemos

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} \approx \frac{k}{4} \cdot 2,66 \cdot \varepsilon_1 \quad (18)$$

5. INSTALAÇÃO DO SISTEMA

O sistema de Barra de Hopkinson permite a medição da força aplicada e da velocidade do impulso. Para a determinação da deformação provocada pela passagem das ondas de impacto nas barras procedeu-se à instrumentação das mesmas. A aquisição e visualização do sinal obtido durante o ensaio é feito através de um osciloscópio digital que permite armazenar dados para posterior tratamento utilizando folhas de cálculo Excel e o *software* DAVID[®], construído na linguagem de Labview.

A montagem do sistema de barras de Hopkinson encontra-se esquematizada na figura 6. Os sinais obtidos nas estações de extensometria são amplificados pelo Amplificador Vishay 2210A e recolhidos pelo osciloscópio Lecroy LT224. A utilização do amplificador é de extrema necessidade uma vez que os sinais recolhidos nas pontes de Wheatstone são de baixa amplitude pelo que a sua captação e tratamento por parte do osciloscópio se tornaria muito difícil sem a prévia amplificação.

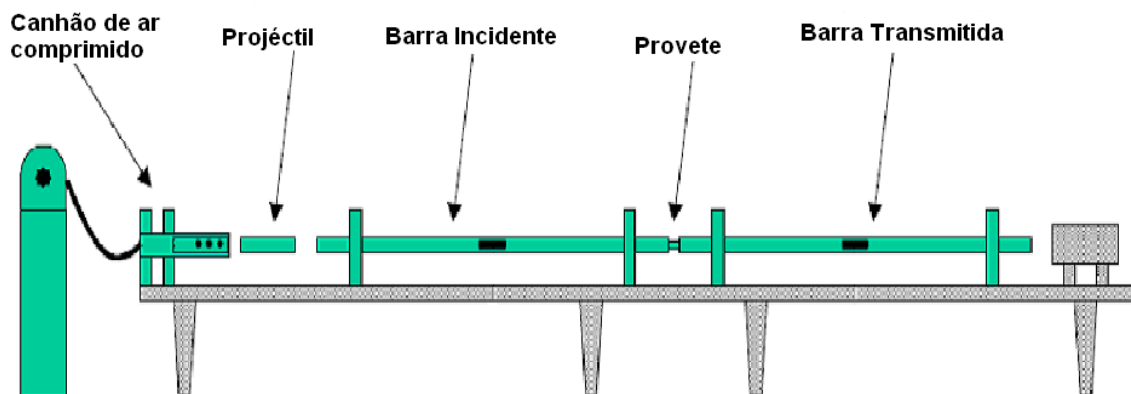


Figura 6. Esquema da montagem experimental.

Na vista geral de todo o aparato experimental da Barra de Hopkinson, figuras 7 e 8, é possível observar os Sistemas de Barras de Hopkinson identificados nesta tese por Sistemas 30 e 16, com o amplificador (1), osciloscópio (2).

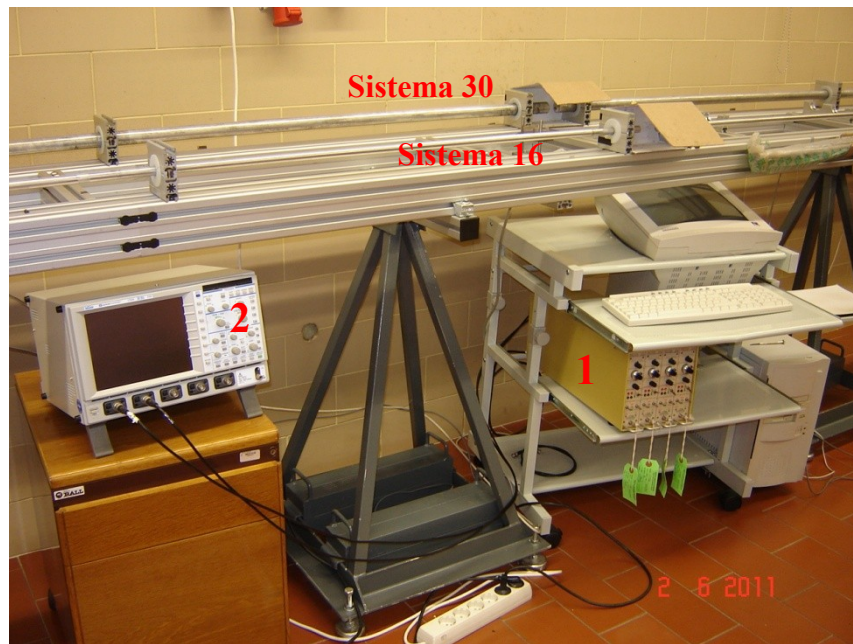


Figura 7. Vista geral da zona de ensaios da Barra de Hopkinson, Amplificador Vishay 2210A, osciloscópio Lecroy LT224.

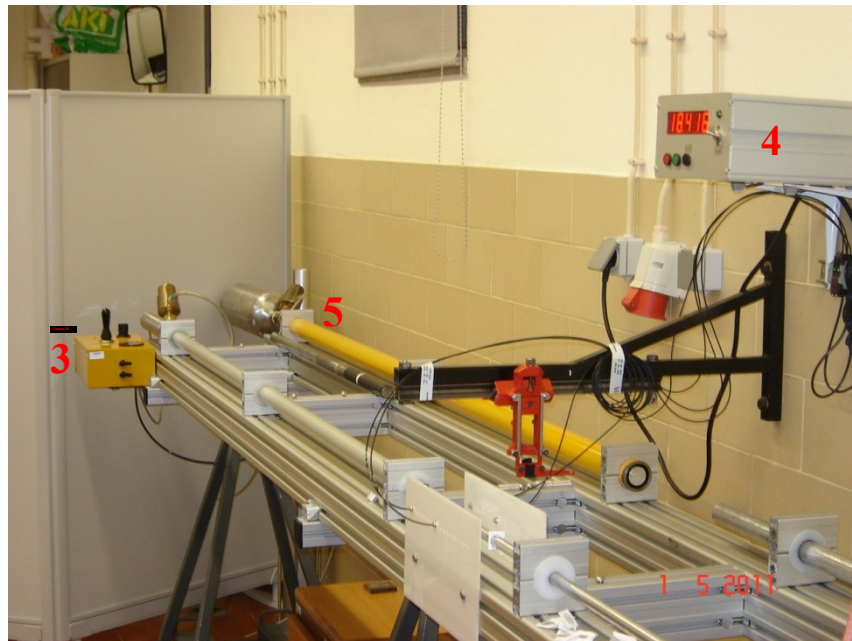


Figura 8. Vista geral do velocímetro (4), consola de comando (3) de disparo e canhões de ar comprimido (5).

O impacto inicial, que provoca a onda de compressão que se propaga ao longo da barra, é efectuado pela barra denominada projectil que é carregada no canhão de ar comprimido (5) e disparada a partir da consola de comando (3). A velocidade do projectil é registada pelo velocímetro (4) montado à saída do canhão, figura 8.

A consola de comando proporciona o controlo da pressão do depósito de ar comprimido permitindo que a velocidade de disparo do projectil seja a mesma na repetição dos ensaios.

A instalação do sistema de Barras de Hopkinson pode dividir-se nas seguintes fases:

1. Medição e maquinação dos varões de Alumínio;
2. Fixação dos extensómetros;
3. Montagem das estações de extensometria nas barras sob forma de Ponte Wheatstone completa;
4. Montagem do sistema, ligação com amplificador e osciloscópio.

Cada um dos dois sistemas de barras é constituído por três barras. O projectil com 1m de comprimento e as barras incidente e transmitida com 3m de comprimento cada.

Os varões foram facejados no torno mecânico garantindo que as faces ficariam perfeitamente perpendiculares ao eixo axial da barra, e com acabamento superficial de elevada qualidade.

No Sistema 30 foi utilizado o Alumínio Al 7075, cujas principais propriedades mecânicas se encontram indicadas na tabela 1.

Tabela 1. Propriedades mecânicas do Alumínio 7075

Propriedades Mecânicas	Al 7075
Massa específica	2810 kg/m ³
Módulo de Young	72 GPa
Tensão de Ruptura	505 MPa
Tensão de Cedência	435 MPa
Alongamento	12%
Dureza Brinell	140 HB

No Sistema 16 é usado o Alumínio Al 7020, tabela2.

Tabela 2. Propriedades mecânicas do Alumínio 7020

Propriedades Mecânicas	Al 7020
Massa específica	2780 kg/m ³
Módulo de Young	70 GPa
Tensão de Ruptura	380 MPa
Tensão de Cedência	335 MPa
Alongamento	12 %
Dureza Brinell	120 HB

A instalação de extensómetros requereu alguns cuidados especiais. A superfície devidamente preparada assegurou ligações fortes e estáveis, condição necessária para se conseguir uma boa transmissão das deformações da superfície para o extensómetro.

Os extensómetros aplicados nas barras são extensómetros de dupla grelha do tipo folha, com uma resistência por grelha de $120\Omega \pm 0,4\%$ da marca Micro-Measurements.

Na barra de Al 7075, Sistema 30, foram utilizados extensómetros de referência CEA-06-125UT-120 com um factor de sonda $2,060 \pm 0,5\%$, na barra de Al 7020, no Sistema 16, foram utilizados extensómetros de referência CEA-06-062UT-120 com um factor de sonda de $2,065 \pm 0,5\%$

A fixação dos extensómetros foi efectuada segundo a metodologia proposta pela HBM.

A superfície deve estar livre de defeitos e quimicamente limpa. No polimento da superfície foi utilizada lixa P220 e P1200. Na limpeza da superfície de fixação dos extensómetros foi utilizada uma solução de ácido fosfórico, e um composto alcalino de água amoniacal. Depois da medição e marcação do local onde seria instalado o extensómetro, foi utilizada cola com base de cianocrilato para a fixação do mesmo. Por fim, depois de montado o circuito na forma ponte Wheatstone, foi aplicada um revestimento de poliuretano, M-Coat A, nos extensómetros, nos terminais e nas ligações, com o objectivo de proteger os extensómetros de contaminações que pudessem afectar a

sua estabilidade. Nas figuras 9 e 10 são mostrados pormenores das montagens dos extensómetros nas estações de medida dos Sistemas 30 e 16 respectivamente.

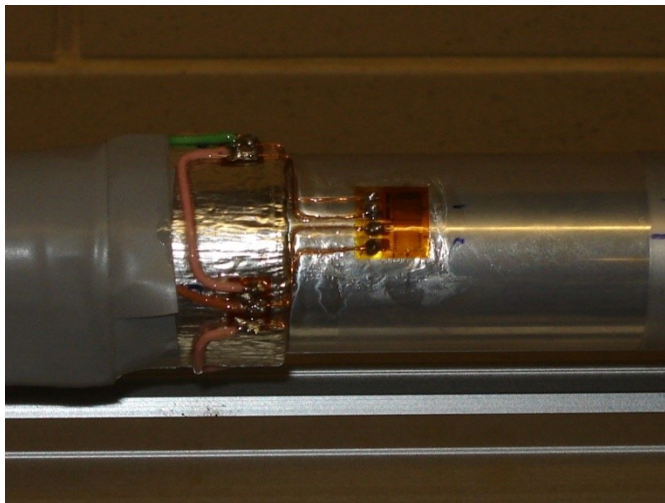


Figura 9. Estação de extensometria aplicada na barra de Hopkinson de 30mm de diâmetro.

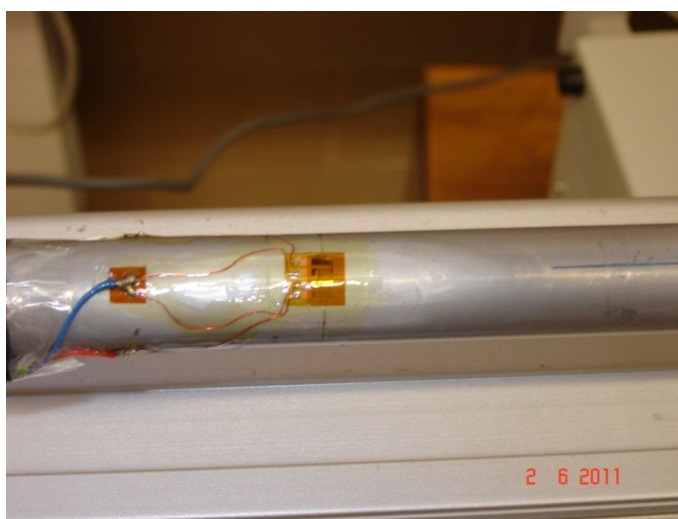


Figura 10. Estação de extensometria aplicada na barra de Hopkinson de 16mm de diâmetro.

Os extensómetros deverão ser integrados num circuito eléctrico apropriado de modo que a variação da resistência eléctrica do extensómetro, proporcional à sua deformação, seja transformada numa variação da diferença de potencial, medida recorrendo a equipamento apropriado e eliminando as ondas de flexão que poderão advir de impactos não coaxiais.

A Ponte de Wheatstone é o circuito comumente usado para a leitura de deformações produzidas em extensômetros, quer por solicitações estáticas quer por solicitações dinâmicas.

Na figura 11 é apresentado o esquema que ilustra o circuito geral do sistema de Barras de Hopkinson.

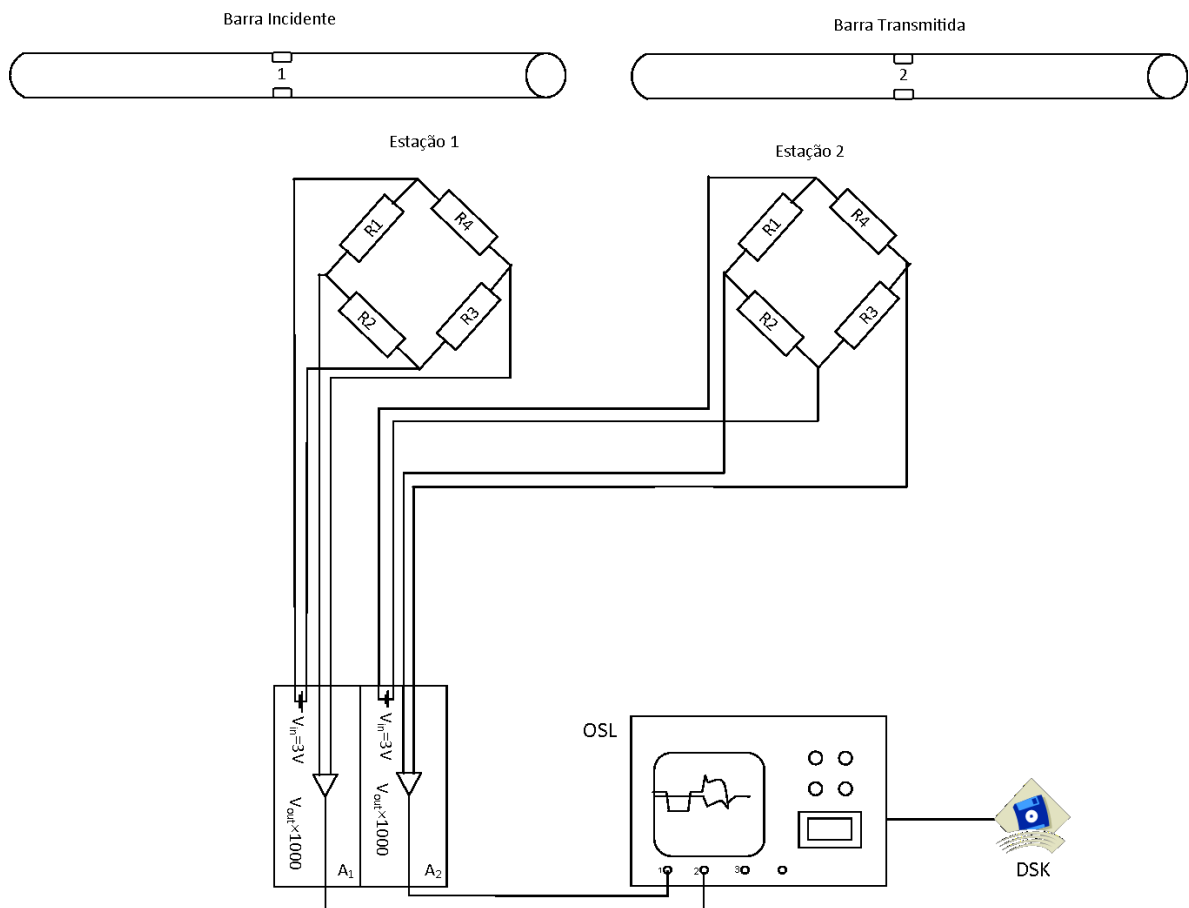


Figura 11. Esquema da montagem experimental do sistema de Barras de Hopkinson.

Legenda:

R_1 - Grelha de extensômetro de dupla grelha 120Ω ;

R_2 - Grelha de extensômetro de dupla grelha 120Ω ;

R_3 - Grelha de extensômetro de dupla grelha 120Ω ;

R_4 - Grelha de extensômetro de dupla grelha 120Ω ;

OSL – Osciloscópio Lecroy LT224;

DSK – unidade de armazenamento tipo disquete;

A1 e A2 – Amplificador de sinal Vishay 2210A;

O amplificador Vishay 2210A, figura 12, para além de alimentar as estações de extensometria com uma tensão, V_{in} de 3V, amplifica o sinal de saída, V_{out} , 1000 vezes antes de ser recolhido no osciloscópio. Sem esta amplificação o sinal seria de muito difícil leitura no osciloscópio. O amplificador tem também a função de equilibrar as estações de extensometria, isto é, sem deformação aplicada nas barras e nos extensómetros, garantindo que $V_{out}=0V$. Existem factores, por exemplo, as juntas soldadas de ligação dos cabos, resistência dos cabos, que influenciam o equilíbrio do circuito ponte Wheatstone na estação de extensometria.



Figura 12. Amplificador Vishay 2210A.

A obtenção dos dados foi feita a partir do osciloscópio Lecroy LT224, figura 13, sendo o armazenamento dos dados efectuado em ficheiros tipo ASCII, para posterior tratamento em folhas de cálculos Excel.

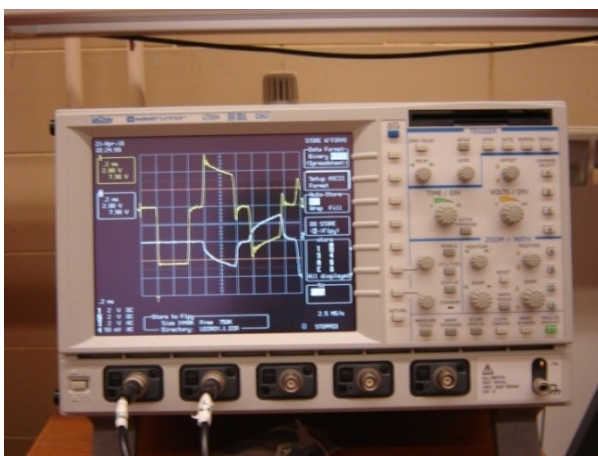


Figura 13. Osciloscópio Lecroy LT224.

Na figura 14 é visível as extremidades das barras dos dois sistemas, Sistema 30 e Sistema 16, onde se intercala os provetes de espuma sintática a ensaiar. Nas interfaces de contacto dos provetes com as barras, foi colocada uma fina película de lubrificante para reduzir o atrito no movimento relativo das interfaces de forma a eliminar o efeito de embarrilamento que poderia ocorrer no provete durante o ensaio. Um provete de espuma sintática intercalado nas barras, figura 15, encontra-se preparado para o ensaio experimental, depois de intercalado e centrado com as barras.



Figura 14. Extremidades das barras onde se intercala o provete.



Figura 15. Pormenor do provete de espuma sintática em posição de ensaio

6. OPÇÃO POR UM SISTEMA DE BARRAS

Antes da realização dos ensaios experimentais do material compósito optou-se por um dos dois sistemas de Barras de Hopkinson. A opção feita foi fundamentada numa análise via numérica e experimental.

Numa primeira abordagem, foi efectuada uma análise numérica a partir das equações de equilíbrio que regem o funcionamento da Barra de Hopkinson.

Com o apoio de uma folha de cálculo em Excel foi analisada a melhor relação entre a área da secção e a velocidade do projectil a ser disparado de forma a conseguir-se uma amplitude semelhante nas ondas transmitida e reflectida recolhidas pelo sistema de aquisição de sinal.

A folha de cálculo teve por princípio o equilíbrio de forças e velocidades nas interfaces das barras e do provete que nelas se encontra intercalado.

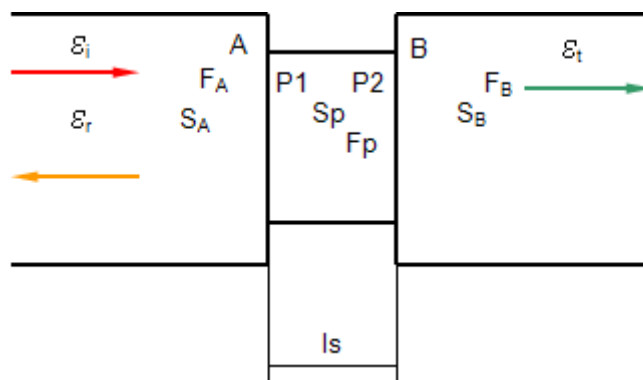


Figura 16. Esquema do provete intercalado entre as barras.

A deformação depende da velocidade das partículas

$$v = -C_0 \cdot \varepsilon \quad (19)$$

Considerou-se que as velocidades das partículas das barras, nas duas interfaces A e B são iguais, $V_A=V_B$, sendo as respectivas velocidades dadas por:

$$V_A = C_0(\varepsilon_i - \varepsilon_r) \quad (20)$$

$$V_B = C_0 \varepsilon_t \quad (21)$$

As interfaces A e B estão sujeitas às forças F_A e F_B , perpendiculares a essas mesmas interfaces, e foram obtidas a partir:

$$F_A = S_A E_b (\varepsilon_i + \varepsilon_r) \quad (22)$$

$$F_B = S_B E_b \varepsilon_t \quad (23)$$

sendo S_A e S_B as secções das barras e E_b o módulo de elasticidade do material de que são constituídas as barras.

As forças nas interfaces do provete são dadas por:

$$F_s = \sigma_y S_p \quad (24)$$

sendo S_p a secção do provete e σ_y a tensão, perpendicular à interface entre a barra e o provete, a que se encontra sujeito o provete.

Tendo em consideração que existe equilíbrio de forças nas interfaces entre o provete e as barras, então, na interface A, $F_s=F_A$:

$$\sigma_y S_p = S_A E_b (\varepsilon_i + \varepsilon_r) \quad (25)$$

E na interface em B, $F_S = F_B$:

$$\sigma_y S_p = S_B E_b \varepsilon_t \quad (26)$$

Assim, tomando em consideração os diâmetros e as áreas dos provetes existentes e procurando a velocidade do projectil adequada para ambas as Barras de Hopkinson, obtemos o intervalo de velocidades a aplicar ao projectil nos ensaios práticos, por forma a que amplitude de uma das ondas, reflectida ou transmitida, seja no mínimo 2/3 da outra. Condição necessária para se conseguirem bons resultados na utilização do programa DAVID[®]. Para os provetes de secção circular tem-se, tabela 3:

Tabela 3. Intervalos de velocidade do projectil admissíveis para secções circulares dos provetes

Diâmetro provete [mm]	Barra Hopkinson 30mm [m/s]	Barra Hopkinson 16mm [m/s]
25	---	---
20	16 < Vp < 23	---
15	9 < Vp < 13	---
10	4 < Vp < 6	14 < Vp < 21

Para provetes de secção rectangular tem-se, tabela 4:

Tabela 4. Intervalos de velocidade do projectil admissíveis em secções rectangulares.

Área [mm ²]	Diâmetro Equivalente [mm]	Barra Hopkinson 30mm [m/s]	Barra Hopkinson 16mm [m/s]
170	14,71	8,5 < Vp < 13	---
160	14,273	8 < Vp < 12,5	---
150	13,82	7,5 < Vp < 11,5	---
140	13,352	7 < Vp < 10,5	---
130	12,867	6,5 < Vp < 10	---
120	12,361	6 < Vp < 9	---
110	11,835	5,5 < Vp < 8	---

A viabilidade de se utilizar o Sistema 16 só foi verificável para provetes com uma área igual ou inferior a 98mm². Acima desse valor para se conseguir uma amplitude das ondas transmitidas e reflectida adequada havia a necessidade de disparar o projectil a velocidades próximas ou superiores ao permitido pelo canhão de ar comprimido utilizado.

Na verificação experimental, utilizando os dois sistemas de barras, foram efectuados alguns ensaios experimentais com provetes de espuma sintática, constituída por 15% de micro-esferas e 1% de micro-fibras, para posterior comparação das amplitudes das respectivas ondas.

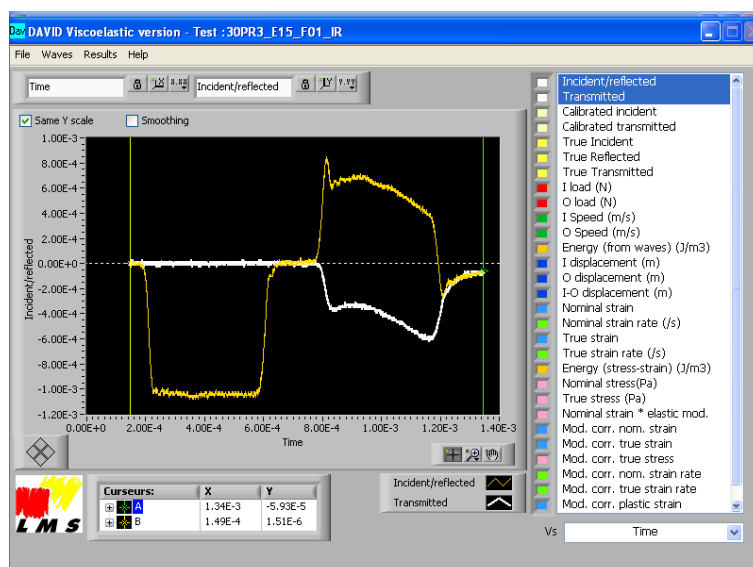


Figura 17. Onda incidente, reflectida e transmitida num ensaio no sistema de barras de 30mm de diâmetro com o compósito E15F01.

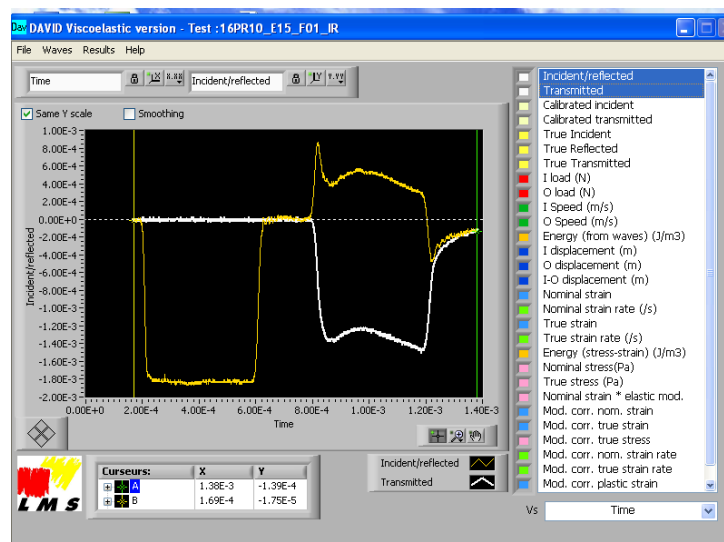


Figura 18. Onda incidente, reflectida e transmitida num ensaio no sistema de barras de 16mm de diâmetro com o compósito E15F01.

Comparando os ensaios realizados nos dois sistemas de barras concluiu-se que no Sistema 30 a amplitude da onda transmitida seria mais próxima da amplitude da onda reflectida, para uma velocidade do projectil de 10 m/s, enquanto que no Sistema 16, com a velocidade de projectil superior a 18 m/s, o melhor que se conseguiu obter foram ondas, figura 18, com uma diferença de amplitudes bastante superiores às dos ensaios no Sistema 30. Ou seja, o Sistema 30 estaria mais próximo do nosso objectivo de reduzir a diferença de amplitudes ao mínimo. Sendo assim foi este sistema foi considerado o mais adequado para a realização dos ensaios neste trabalho, proporcionando as melhores amplitudes de ondas para posterior análise através do programa DAVID[®].

Para os ensaios experimentais dispôs-se de três tipos de provetes com geometrias diferentes, figura 19. Nos ensaios foram utilizados provetes de secção rectangular, com aproximadamente 11 mm de lado, e provetes de secção circular, com diâmetros de 15 e 25mm, sendo estes últimos inadequados para ensaios no Sistema 16 devido a possuírem um diâmetro superior ao do sistema de barras.



Figura 19. Imagem dos provetes utilizados nos ensaios experimentais. Provetes de secção quadrada com 11mm de lado e secção circular com 15 e 25 mm de diâmetro.

Concluiu-se que o sistema de barras mais adequado para a realização dos ensaios seria o Sistema 30, dando a possibilidade de realizar ensaios com todos os tipos de provetes e sendo mais fácil de obter ondas de impacto com as amplitudes mais indicadas para o *software* disponível.

7. SOFTWARE DAVID®

O programa DAVID® construído em linguagem Labview, foi desenvolvido pelo Professor Doutor Gérard Gary da École Polytechnique, França. Este programa oferece uma análise completa dos ensaios realizados num sistema da Barra de Hopkinson. Executa uma análise numérica dos dados recolhidos nos ensaios experimentais. Admite ainda a flexibilidade de as barras e o projectil poderem ser constituídos de diferentes materiais e dimensões.

No programa foi previamente definido o diâmetro das três barras, os seus comprimentos, e densidades, a velocidade da propagação da onda nas barras e o módulo de Poisson do material do qual são constituídas as barras, a distância a que se encontram as estações de extensometria das interfaces das barras com o provete e ainda da razão da Deformação/Volt, obtida a partir da equação 27, com a tensão de alimentação das estações de extensometria, $V_{in}=3V$ para ambos os sistemas de barras, e k é o factor de sonda fornecido pelo fabricante dos extensómetros, Micro-Measurements Division.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} \approx \frac{k}{4} \cdot 2,66 \cdot \varepsilon_1 \quad (27)$$

Tendo em conta que o sinal obtido, V_{out} , das estações de extensometria é amplificado 1000 vezes tem-se:

$$\frac{\varepsilon}{V_{out}} = \frac{4}{2,66 \cdot V_{in} \cdot k \cdot 10^3} \quad (28)$$

No Sistema 30 utilizado nos ensaios experimentais do compósito, o factor de sonda, k , fornecido pelo fabricante dos extensómetros de referência, usados por este sistema, é de $2,060 \pm 0,5\%$.

Substituindo os valores na equação 28, vem:

$$\frac{\varepsilon}{V_{out}} = \frac{4}{2,66 \times 3 \times 2,06 \times 10^3} \quad (29)$$

Obtém-se assim, para a razão deformação por unidade de tensão, o valor de:

$$\frac{\varepsilon}{V_{out}} = 2,433 \times 10^{-4} \quad (30)$$

Aos dados recolhidos nos ensaios, correspondentes às ondas incidente, transmitida e reflectida, a serem tratados através do DAVID®, foram ainda introduzidas a área da secção transversal do provete, a espessura do provete, o peso do provete, a velocidade de disparo do projectil, e a razão de deformação por unidade de tensão, ε/V_{out} , das estações de extensometria obtida na equação 30.

As figuras 20 e 21 mostram o *software* DAVID® já em processo de análise dos dados provenientes de um ensaio experimental.

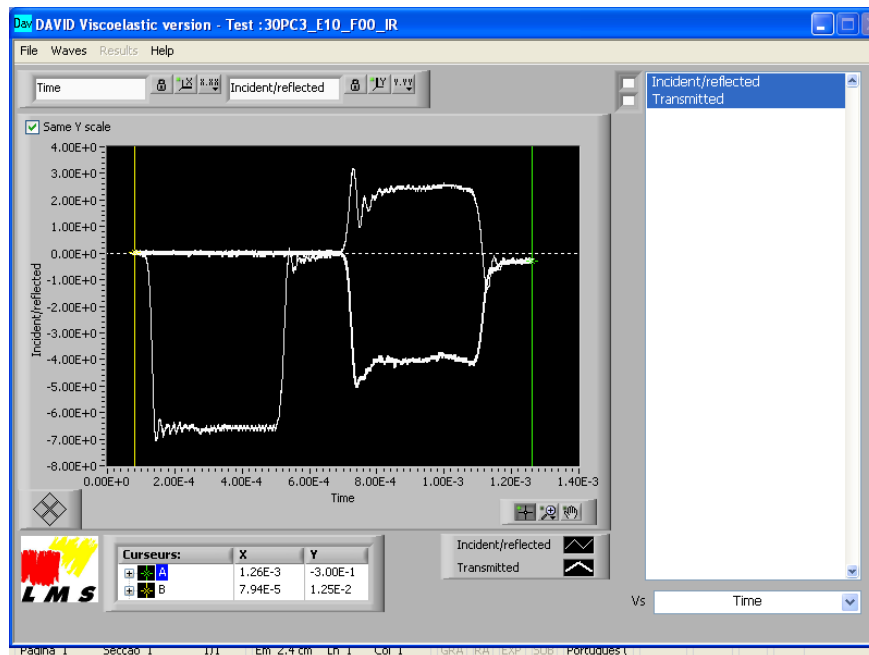


Figura 20. Janela de trabalho com as ondas para análise.

A figura 21 ilustra uma das fases do programa DAVID® em que se executa graficamente uma aproximação das ondas recolhidas no ensaio experimental com as ondas teóricas calculadas pelo programa.

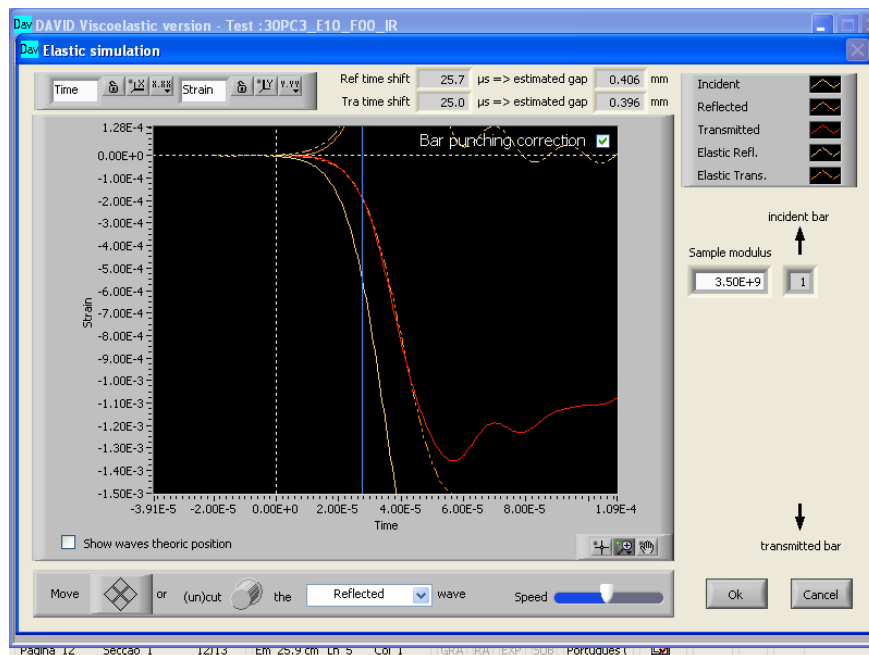


Figura 21. Janela de trabalho para aproximação gráfica das ondas em estudo através do DAVID®.

Todo o processo interno, de cálculo e análise das ondas em estudo, do programa DAVID® está documentado no seu manual, “DAVID® Instruction manual”,(GARY, 2009), que se encontra em anexo.

8. ANÁLISE E DISCUSSÃO

As espumas sintáticas derivam da mistura de resina, como matriz, e micro-esferas ocas pertencentes a uma classe de materiais compósitos de baixa densidade. As suas propriedades mecânicas e de fractura ainda não se encontram totalmente compreendidas. Apesar da exacta pré-determinação da sua densidade ser difícil as espumas sintáticas tem sido utilizadas como núcleo de materiais compósitos intercalados devido à sua baixa densidade, à sua elevada rigidez e baixa absorção da humidade. (Wouterson, 2006).

Apesar destas vantagens apresenta algumas limitações na aplicação devido ao seu comportamento quebradiço quando submetido a solicitações mecânicas. Para se disponibilizar este tipo de material para condições de impacto, e capacidade de deformação, é necessário o aumento da resiliência da espuma sintática, (Wouterson, 2007).

A espuma sintática em estudo é constituída por resina epoxídica com diferentes percentagens de micro-esferas e micro-fibras de vidro, tabela 5. Procurámos analisar o seu comportamento, a elevadas taxas de deformação, consoante a variação da percentagem de esferas na sua constituição como ainda o efeito provocado pela inclusão de micro-fibras de vidro.

A nomenclatura utilizada nos provetes ensaiados é indicada na figura 23.



Figura 22. Nomenclatura usada na identificação dos provetes.

onde:

- 1- Diâmetro da barra de Hopkinson: 16mm ou 30mm;
- 2- Secção do provete ensaiado: PR- Secção Rectangular; PC- Secção Circular
- 3- Numeração do provete;
- 4- Percentagem de micro esferas: E00 = 0%; E2.5=2,5%; E10=10%; E15=15%;
- 5- Percentagem de micro fibras: F00=0%; F01=1%; F03=3%;
- 6- Diâmetro do provete de secção circular, 15 ou 25mm (omitido quando se trata de provetes de secção rectangular).

Tabela 5. Variação das percentagens de micro esferas e micro fibras no compósito.

Provetes	% micro-esferas	% micro-fibras
PC E00 F00 15	0	0
PR E00 F00	0	0
PR E2,5 F00	2,5	0
PR E05 F00	5	0
PR E10 F00	10	0
PC E10 F00 25	10	0
PC E20 F00 15	20	0
PC E20 F00 25	20	0
PR E2,5 F01	2,5	1
PR E2,5 F03	2,5	3
PR E15 F01	15	1

Na tabela 6 são indicados as densidades e módulos de elasticidade obtidos para cada um dos materiais ensaiados. Estes resultados são a média dos valores dos diversos ensaios efectuados com cada um dos compósitos que foram objecto deste estudo. Para cada variação da composição da espuma sintática foi executado um conjunto de pelo menos três ensaios.

Tabela 6. Densidade e módulo de elasticidade para os vários compósitos.

Provetes	densidade [Kg/m³]	E [GPa]
PC E00 F00 15	1012,9	3,5
PR E00 F00	1115,1	3,5
PR E2,5 F00	1069,7	3,5
PR E05 F00	996,4	3,2
PR E10 F00	869,43	3
PC E10 F00 25	863,8	3
PC E20 F00 15	725,9	2,8
PC E20 F00 25	735,53	2,8
PR E2,5 F01	1036,1	3,5
PR E2,5 F03	1038,2	3,5
PR E15 F01	1015,8	3,5

Nas figuras 23 e 24, realizado em ensaios com provetes de resina epoxídica, está patente a repetibilidade dos ensaios através do Sistema de Barras de Hopkinson.

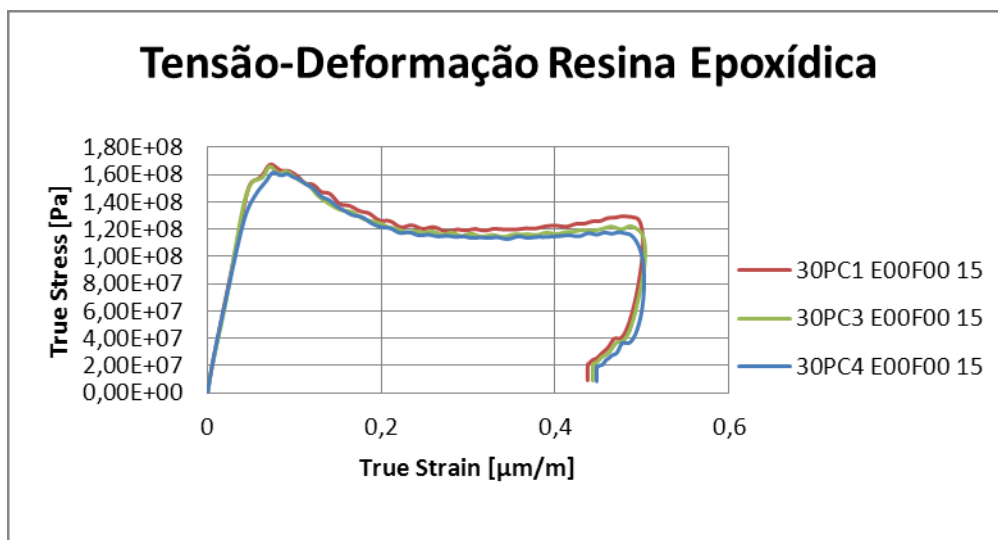


Figura 23. Tensão - deformação para provetes apenas de resina epoxídica.

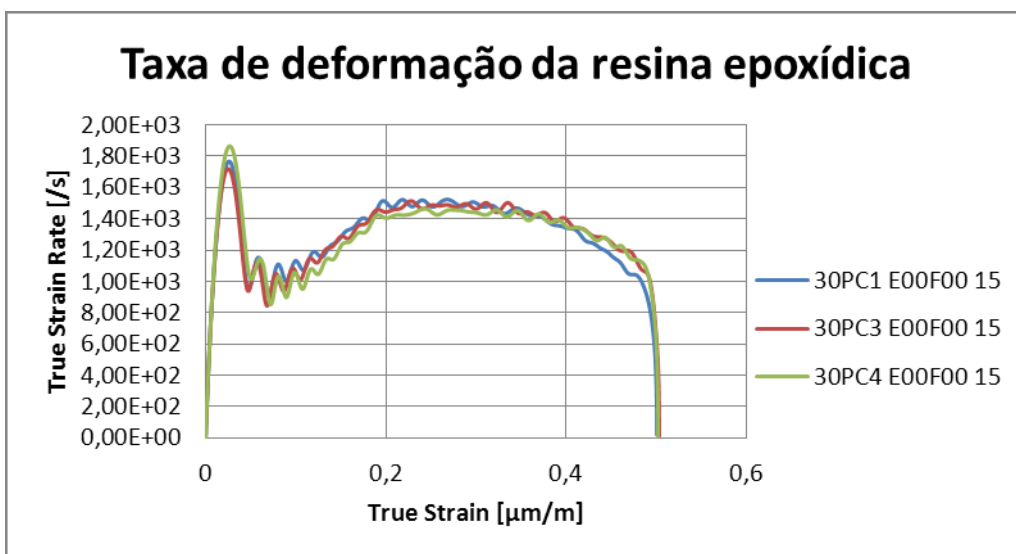


Figura 24. Taxa de deformação para resina epoxídica, ou seja, 0% de micro-esferas e 0% micro-fibras.

O comportamento dos dois tipos de provetes de E20F00, (provetes de espuma sintática com 20% de micro-esferas e 0% de micro-fibras), nas figuras 25 e 26, é idêntico na zona de comportamento elástico. Na zona de cedência plástica exibe um comportamento diferenciado, com os provetes de maiores dimensões, 25 mm, estes a sofrerem maior deformação e a possuírem maiores taxas de deformação. Este facto deve-se à variação da velocidade do projectil necessária para se conseguirem amplitudes de onda, incidente e reflectida, satisfatórias para posterior análise através do *software* DAVID[®]. Essa variação de velocidade do projectil, de 15 m/s para os ensaios em provetes de 25mm de diâmetro e de 10 m/s para os ensaios em provetes de 15mm de diâmetro, induz a uma maior energia de impacto para maiores velocidades do projectil.

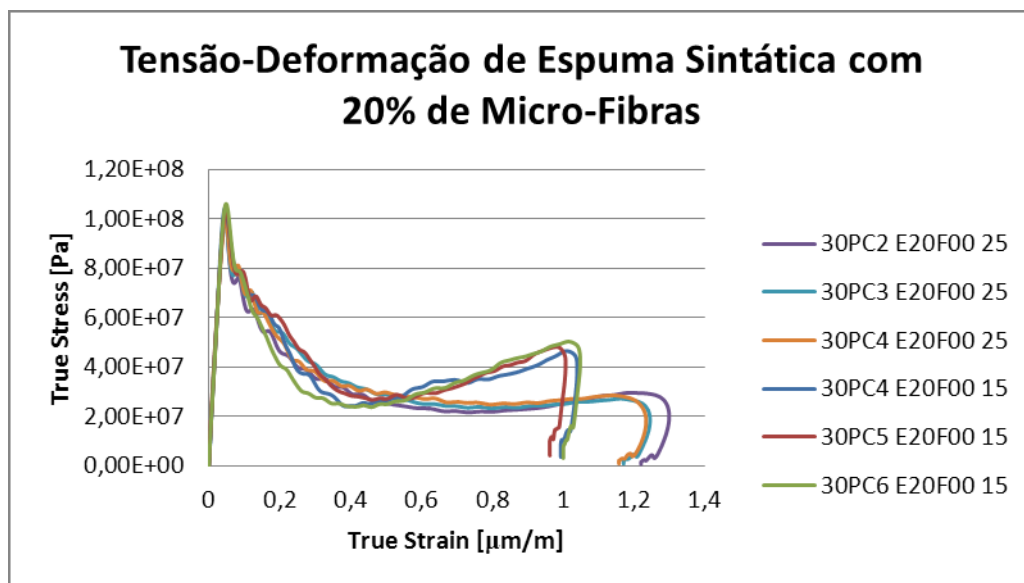


Figura 25. Variação da Tensão -Deformação para provetes E20F00 com diâmetros de 15mm e 25mm.

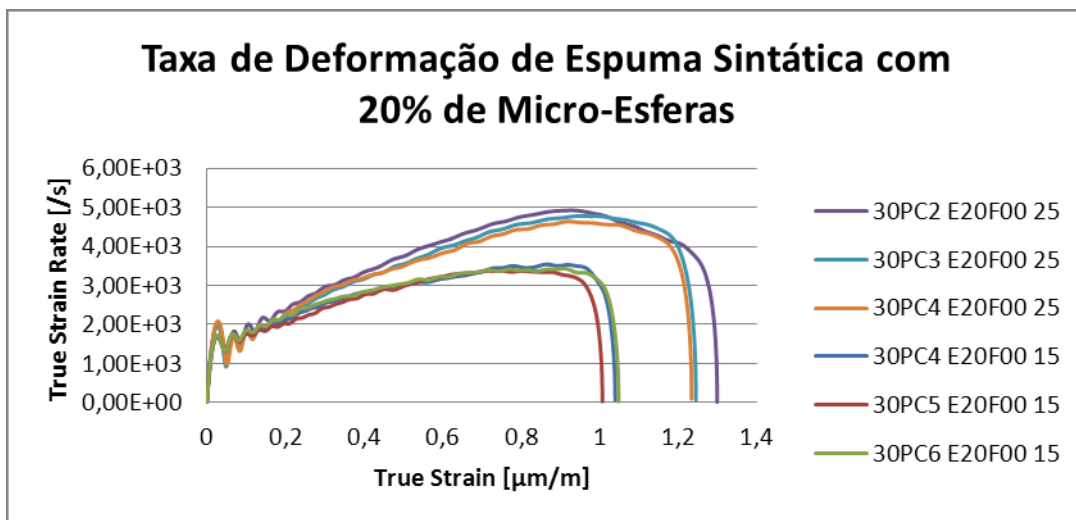


Figura 26. Variação da Taxa de deformação para o compósito E20F00 em provetes de diâmetro 15mm e 25mm.

Com o aumento da percentagem de esferas na constituição do compósito, e não obstante a energia de impacto ser constante, verificou-se uma diminuição do módulo de elasticidade, tabela 6, e uma diminuição significativa da tensão limite elástica, σ_c , figura 27.

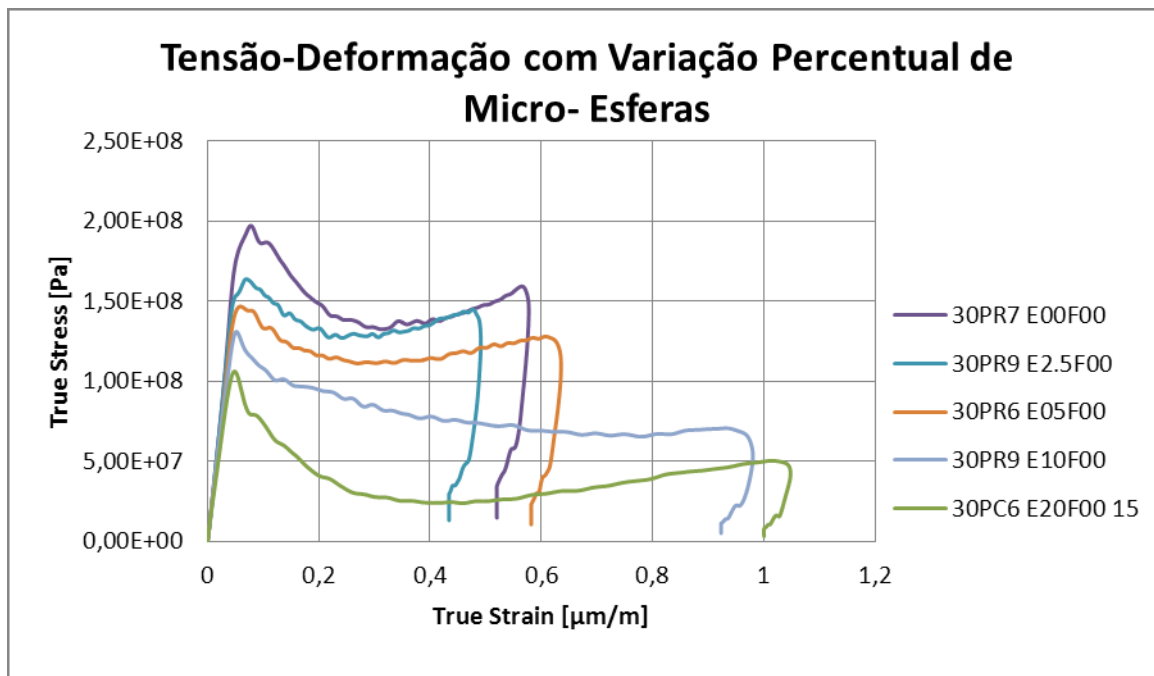


Figura 27. Variação da Tensão/Deformação com a variação da percentagem de esferas.

A taxa de deformação máxima, na zona de comportamento elástico do gráfico, figura 28, manteve-se sensivelmente constante em todos os ensaios, em $\pm 1700 \text{ s}^{-1}$.

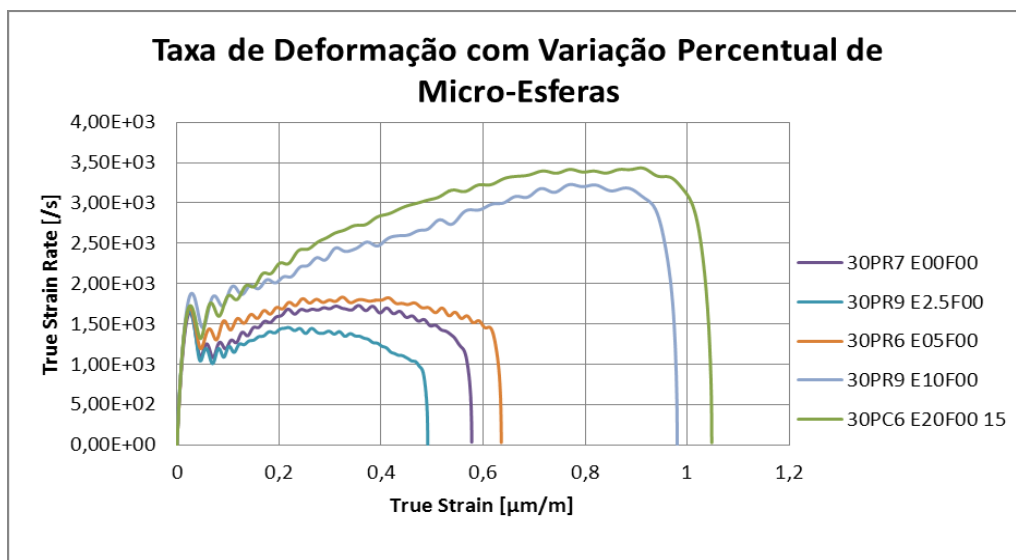


Figura 28. Variação da Taxa de Deformação com a variação da percentagem de micro-esferas.

Embora o número de ensaios efectuados com espumas sintáticas associadas a micro-fibras de vidro não permita tirar conclusões definitivas, figura 29, a inclusão deste reforço em percentagens de 1% e 3%, em espumas sintáticas com percentagens de 2,5% e de 15% de micro-esferas, parece permitir que se conclua que se verifica uma estabilização na tensão limite elástica, $\sigma_c = 160 \text{ MPa}$, com um aumento da tenacidade da espuma sintática.

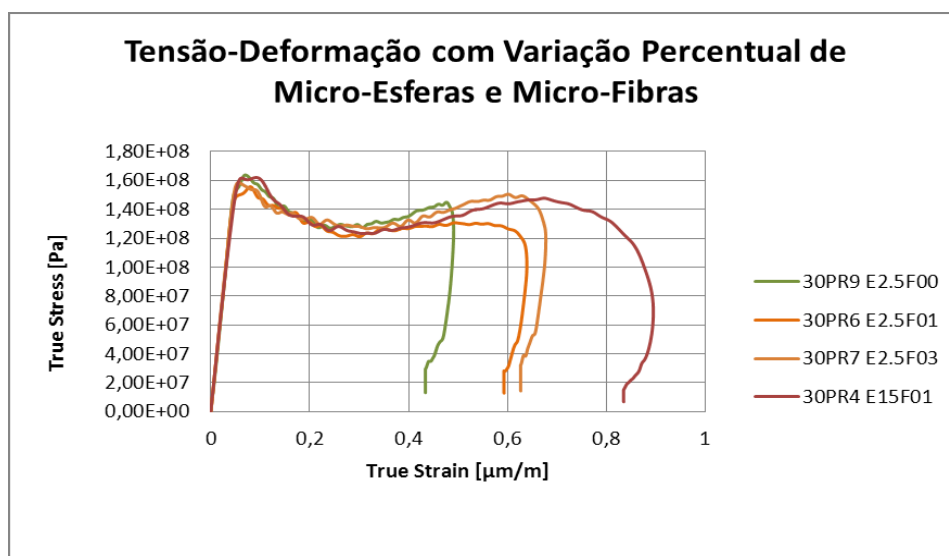


Figura 29. Comportamento da espuma sintática com a adição de micro-fibras.

9. CONCLUSÃO

Todos os objectivos propostos neste trabalho, projecto e construção de dois sistemas de barras de Hopkinson e execução de ensaios experimentais ao compósito constituído por resina epoxídica com variação nas percentagens de micro-esferas e micro-fibras de vidro, foram atingidos com êxito.

Os dois sistemas de Barras de Hopkinson encontram-se em condições de perfeito funcionamento, ficando o laboratório equipado com mais dois sistemas de barras prontas para utilização futura em ensaios experimentais a elevadas taxas de deformação.

Na análise dos resultados obtidos nos ensaios experimentais das espumas sintáticas pode concluir-se que o aumento da percentagem de esferas provocou uma diminuição no módulo de elasticidade, de 3,5 GPa para 2,8 GPa, bem como uma redução da tensão de cedência, de 200 MPa para provetes de resina epoxídica para 100 MPa com a adição até 20% de micro-esferas.

A adição de micro-fibras, de 1% e 3% na espuma sintática com 2,5% de micro-esferas, não provocou alteração do valor da tensão de cedência, 160 MPa, nem o valor do módulo de elasticidade, $E=3,5$ GPa, mantendo-se também idêntica a taxa de deformação na zona de comportamento elástico do compósito, ± 1700 s⁻¹.

Na espuma sintática com 1% de micro-fibras o aumento de 2,5% para 15% de micro-esferas não provocou alteração no módulo de elasticidade, $E=3,5$ GPa, nem na tensão de cedência, $\sigma_c=160$ MPa, provocando no entanto um aumento na taxa de deformação para 2200 s⁻¹.

Não obstante os resultados obtidos, há algumas alterações que poderiam ter sido efectuadas de modo a melhorar a eficácia do sistema de barras.

Na estrutura de disparo do projectil, melhorando a precisão do controlo da pressão do ar poder-se-ia ter melhorado o controlo da velocidade do projectil. A substituição do manómetro por um digital seria uma hipótese.

Na fabricação do material compósito utilizado nos ensaios poder-se-ia ter melhorado o processo de mistura das micro fibras e das micro esferas na matriz de resina epoxídica, uma vez que o material apresentava bolhas de ar e alguma porosidade, o que dificultou a execução de alguns ensaios.

Por último, poder-se-iam ter utilizado amostras com uma maior variedade de percentagens de micro-fibras para uma análise e compreensão mais ampla da variação das propriedades do compósito em estudo com a variação deste elemento.

Num trabalho futuro seria interessante utilizar diferentes endurecedores, variar o tempo e temperatura de cura para posterior estudo do seu efeito nas propriedades do compósito em causa.

10. BIBLIOGRAFIA

- ASM-Handbook, (2000) “Mechanical Testing Evaluation”, ASM-International.
- Bacon, Christophe, (2001), “*A LabView Virtual Instrument for Hopkinson treatment*” version 1.0, Laboratoire de Mécanique Physique Université Bordeaux 1, France.
- Bazle A Gama, Sergey L Lopatnikov, John W Gillespie Jr, (2004), “Hopkinson bar experimental technique: A critical review”, American Society of Mechanical Engineers.
- Cirne, J.M.O.S., (1987) “Propagação de Ondas de Tensão em corpos elásticos”, Tese de Doutoramento em Ciências de Engenharia, Mecânica Estrutural, F.C.T.U.C., Coimbra.
- Ferreira, F., “*Programa para Quantificar as Intensidades das Ondas Reflectida e Transmitida Simulando o Ensaio num Provete de Comportamento Puramente Plástico de Dimensões e Propriedades Determinadas*”. Folha de Cálculo em Excel, DEM-FEUP.
- G GARY, (2009), “DAVID Instruction manual”. (Labview Version 9106), LMS, École Polytechnique, França.
- Graff, Karl F. (1991), “Wave Motion in Solids”, Dover Publications.
- Kaiser, Michael Adam, (1998), “Advancements in the Split Hopkinson Bar Test” Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering, Blacksburg, Virginia.
- Kolsky, H., (1963) “Stress Waves in Solids”, Dover Publications, New York.
- K. Hoffmann (1984), “How to avoid or minimize errors in strain gauge measurement”, HBM.

K. Hoffmann (1984), "An introduction to strain gauge techniques by practical experiments" HBM.

K. Hoffmann (1984), "Practical hints for application of strain gauges" HBM.

K. Hoffmann (1984), "Measuring elementary load cases with strain gauges" HBM.

K. Hoffmann (1984), "The strain gauge a universal tool of experimental stress analysis", HBM.

K. Hoffmann, (1984), "Applying the Wheatstone Bridge Circuit", HBM

Rilley, William F.; Dally, James W; (1987) "Strain Measurements methods and related instrumentation".

Smith, William F., (1996), "Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais", McGraw-Hill.

Wouterson Erwin M., Boey Freddy Y.C., Xiao Hu, Shing-Chung Wong, (2007), "Effect of fiber reinforcement on the tensile, fracture and thermal properties of syntactic foam", ELSEVIER.

Wouterson Erwin M., Boey Freddy Y.C., S.-C. Wong, L. Chen, X. Hu, (2007), "Nano-toughening versus micro-toughening of polymer syntactic foams", ELSEVIER.

<http://aluminium.matter.org.uk/aluselect/default.asp>

http://aluminium.matter.org.uk/aluselect/09_mech_browse.asp

11. ANEXO