

Material compósito à base de gesso reforçado com fibras: caracterização mecânica

Luciana Silva¹, Aires Camões^{2, †}, Graça Vasconcelos²

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil
Azurém, P - 4800-058 Guimarães, Portugal*

RESUMO

Nos nossos dias, devido à cada vez maior escassez de recursos, é necessário desenvolver novos materiais de construção sustentáveis, que, para além de serem menos agressivos e mais económicos, também aumentem o nível de produtividade da construção e as condições sociais dos ocupantes sem gastos excessivos.

Neste contexto, procurou-se avaliar o efeito da incorporação de fibras tendo em vista a obtenção de uma argamassa inovadora, com melhor desempenho que as argamassas tradicionais.

Assim, foi realizado um trabalho com forte cariz experimental com o objetivo de desenvolver um material compósito à base de gesso para aplicação na construção, com incorporação de fibras e uma pequena percentagem de regranulado de cortiça e que seja dotado de uma trabalhabilidade adequada.

Para tal, foram selecionadas fibras têxteis, acrílicas, de vidro, de basalto, de banana e de sisal e estudou-se o efeito da sua incorporação em composições diferentes à base de gesso, procurando avaliar o seu comportamento, quer no estado fresco, quer no endurecido.

Com base nos resultados obtidos foi possível concluir que a introdução dos diferentes tipos de fibras se revelou mais vantajosa comparativamente a um compósito padrão, sem incorporação de fibras.

1. INTRODUÇÃO

Hoje em dia, existe uma enorme necessidade de empenho na procura de materiais inovadores e sustentáveis, se possível incorporando subprodutos de outras indústrias. Procura-se o desenvolvimento de materiais mais resistentes, duráveis e com elevada ductilidade. Além destas características, procura-se, também, utilizar materiais mais económicos e sustentáveis (Vila-Chã, 2012).

O trabalho desenvolvido foi elaborado de forma a permitir avaliar o comportamento de um compósito de gesso quando incorporadas fibras na sua composição.

Os objetivos principais deste trabalho consistem no desenvolvimento e respetiva caracterização de um material compósito à base de gesso reforçado com diferentes tipos de

¹ Mestre em Engenharia Civil

[†] Autor para quem a correspondência deverá ser enviada (aires@civil.uminho.pt)

² Professor Auxiliar

fibras: têxteis, de banana, de sisal, de vidro, de basalto e acrílicas. A utilização de fibras tem como principal propósito conferir uma maior ductilidade ao material compósito à base de gesso e melhorar o seu comportamento em fase de amolecimento (Oliveira, 2007 e Gomes, 2010).

As tarefas realizadas abrangeram a definição e caracterização das fibras, definição das composições do material compósito, fabrico das amassaduras e realização de diversos ensaios de modo a avaliar o comportamento do compósito.

2. MATERIAIS, COMPOSIÇÕES E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

2.1. Materiais e otimização da mistura

Os materiais envolvidos no fabrico da mistura foram o gesso, água, um retardador, regranulado de cortiça e diversos tipos de fibras.

O gesso utilizado foi um gesso comercial, tendo-se adotado o ácido cítrico como retardador adicionado com o objetivo de retardar o tempo de presa do gesso. O regranulado de cortiça foi utilizado para conferir um maior desempenho acústico e térmico ao compósito, para além da redução da sua massa volúmica. As fibras têxteis utilizadas provêm da reciclagem de pneus usados (Cunha, 2010). Espera-se, com a presença de fibras, conferir uma maior ductilidade ao material. Na Tabela 1, apresentam-se as principais propriedades das fibras selecionadas (fibras de sisal, banana, acrílica, vidro, basalto e têxteis).

Tabela 1 – Principais propriedades das fibras.

Tipo de fibras	Sisal	Banana	Acrílica	Vidro	Basalto	Têxtil
Diâmetro médio (μm)	269,4	325,89	22,41	13,00	10,00	20,69
Comprimento médio (mm)	10,00	10,00	6,00	10,00	10,00	2,11
TEX médio	39,67	29,98	0,25	600	600	-
Força de rotura (N)	13,76	3,55	-	0,37	0,40	-
Resistência à tração (MPa)	275,16	41,49	-	2787,57	5092,96	-
Tenacidade (N/TEX)	0,35	0,11	-	0,61	0,66	-
Alongamento máximo (%)	5,84	3,91	-	-	-	-

No total foram fabricadas 7 misturas diferentes: uma sem incorporação de fibras, designada “Padrão” e as restantes incorporando, cada uma, um diferente tipo de fibra.

O objetivo da otimização da mistura consistiu em encontrar um material trabalhável e, para isso, considerou-se que o espalhamento adequado deveria encontrar-se entre os 155 mm e os 165 mm.

Para a otimização da mistura optou-se por fixar os valores da quantidade de gesso, de regranulado de cortiça, de ácido cítrico e das fibras. Assim, dosagem de água foi determinada por tentativas, de forma a manter o espalhamento dentro dos limites considerados adequados. Na Tabela 2, apresenta-se a composição adotada para os compósitos à base de gesso desenvolvidos.

Tabela 2 – Composição dos compósitos à base de gesso (relações mássicas).

Material	Quantidade (%)
Gesso	100
Ácido cítrico	0.05
Regranulado de cortiça	5
Fibras	1

Na Tabela 3, apresentam-se as razões água/gesso obtidas, bem como os correspondentes resultados obtidos nos ensaios de espalhamento realizados.

Quadro 3 – Composição final de cada mistura e resultados do ensaio de espalhamento.

Mistura	Razão água/gesso	Espalhamento (mm)
Padrão	0.450	165/165
Têxtil	0.455	160/160
Sisal	0.475	160/160
Vidro	0.515	160/159
Acrílica	0.530	160/160
Basalto	0.533	155/155
Banana	0.540	160/160

2.2. Conservação e cura

Após a desmoldagem, que ocorreu cerca de 1 hora depois do enchimento, todos os provetes foram mantidos em estufa a uma temperatura de 40 °C até serem ensaiados. Procedeu-se, também, à monitorização da temperatura da mistura, que foi feita com recurso a um sistema de aquisição de dados que permitiu registar a temperatura por intermédio de uma sonda inserida num provete com 100x100x850 mm³. As leituras tiveram início logo após a introdução da mistura no molde.

Durante o mesmo período, efetuou-se o controlo da perda de massa das misturas, para além do registo da temperatura e da humidade ambiente.

2.3. Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas

O ensaio de velocidade de propagação de ondas de ultrassons foi baseado na norma NP EN 12504-4 (2007). Utilizou-se um provete com 100x100x850 mm³ e a velocidade de propagação dos ultrassons por transmissão direta foi registada durante 300 horas.

Foram ainda efetuadas medições nos provetes cilíndricos utilizados para avaliação do comportamento em compressão, antes da realização do respetivo ensaio.

2.4. Resistência à flexão e compressão

As resistências à flexão e à compressão foram determinadas com base no disposto nas normas EN 13279-2 (2004) e EN 1015-11 (1999). Moldaram-se, para cada tipo de composição, nove provetes prismáticos de 40x40x160 mm³, que foram posteriormente ensaiados após conservação durante sete dias em estufa a 40 °C.

2.5. Comportamento em compressão

O comportamento em compressão uniaxial foi, também, avaliado com base na norma EN 13279-2 (2004) cujo ensaio permitiu, para além da respetiva curva tensão x extensão, a determinação do módulo de elasticidade e da resistência à compressão. Para tal, foram usados 3 provetes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura (ϕ 100x200 mm), ensaiados após conservação durante sete dias na estufa a 40 °C.

2.6. Energia de fratura

O ensaio para obtenção da energia de fratura em flexão foi realizado segundo a RILEM FMC1 (1985). Para cada composição foram submetidos a ensaio três provetes com 100x100x850 mm³, após conservação durante sete dias em estufa a 40 °C.

3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

3.1. Controlo da temperatura da mistura

Foram monitorizadas as misturas produzidas com fibras de vidro, banana, basalto e sisal. O instante zero representa o instante do início da monitorização, que ocorreu cerca de 10 minutos após o instante em que a água entrou em contacto com o gesso durante a realização da amassadura. Estes 10 minutos representam o tempo aproximado que demorou a encher o molde, vibrar a mistura e a iniciar o ensaio de monitorização da temperatura.

Conforme é possível observar na Figura 1, na mistura com fibras de vidro, de banana e de basalto, durante a primeira hora e meia, verificou-se um aumento acentuado da temperatura até atingir cerca de 50 °C e que corresponde à reação exotérmica de hidratação do gesso. Entre a primeira hora e meia e as 7 horas, a temperatura das misturas diminuiu sucessivamente até estabilizar na ordem dos 25 °C.

Para a mistura com fibras de sisal a evolução da curva foi semelhante mas o aumento da temperatura verificou-se durante a primeira hora.

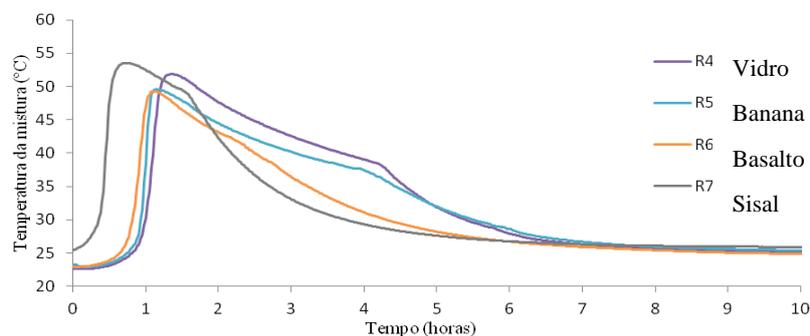


Figura 1 – Representação gráfica da temperatura das misturas ao longo das primeiras 10h.

3.2. Controlo de massa, de temperatura ambiente e humidade ambiente

A Tabela 4 apresenta o valor para o qual se verificou a estabilização da perda de massa; analisando-a, em conjunto com a Figura 2, pode-se concluir que foi a mistura com fibras acrílicas a que teve maior perda de massa e que a mistura com fibras têxteis apresentou a menor.

Tabela 4 – Perda de massa final para todas as misturas.

Mistura	Perda de massa final (%)
Padrão	19.44
Têxtil	17.54
Acrílica	25.19
Vidro	22.38
Banana	23.48
Basalto	23.55
Sisal	19.44

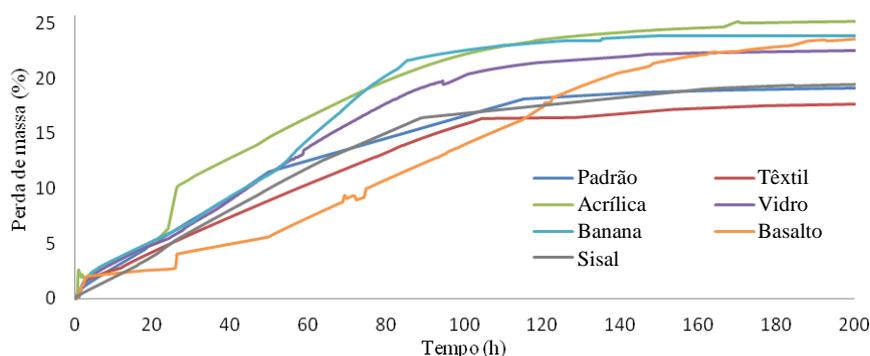


Figura 2 – Perda de massa das misturas ao longo de 200 horas.

Voltando à análise da Figura 2, verifica-se que a mistura com fibras de basalto foi a que teve menor perda de massa nas primeiras horas. As restantes misturas, até próximo das 18 horas, apresentam um comportamento semelhante, apesar de, após este tempo, a mistura com fibras acrílicas se destacar pelo aumento mais visível da perda de massa. As misturas com fibras têxteis, de sisal e a mistura padrão apresentaram um comportamento semelhante ao longo do tempo.

3.3. Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas

Nas Figuras 3 e 4 são apresentados os resultados obtidos para instantes de tempo diferentes: nos primeiros 240 minutos, nas primeiras 24 horas e ao longo de 200 horas.

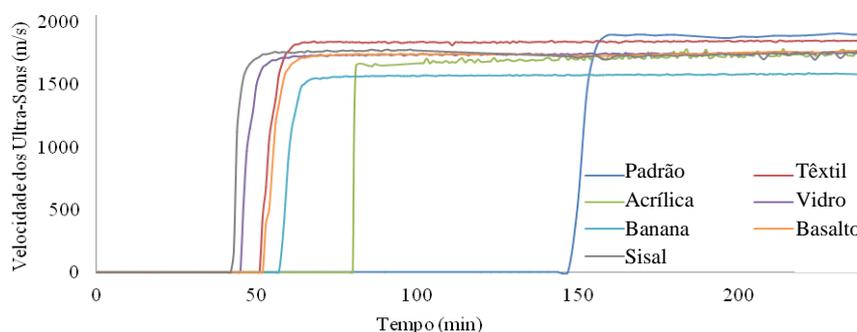


Figura 3 – Evolução da curva da velocidade das ondas de ultrassons desde o instante zero até aos 240 minutos.

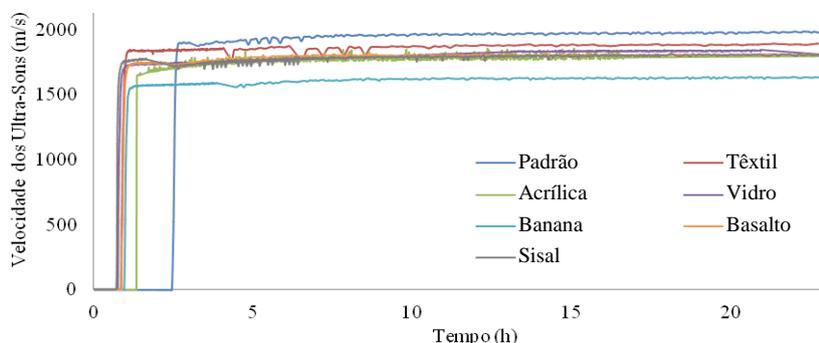


Figura 4 – Evolução da curva da velocidade das ondas de ultrassons durante as primeiras 24 h.

Analisando a Figura 3 pode-se concluir que as misturas apresentaram tempos de início de endurecimento distintos. Considerou-se que o início de endurecimento corresponde ao

momento a partir do qual o equipamento deteta a receção de ondas, uma vez que enquanto o compósito estiver demasiado fluído não se verifica transmissão de ondas.

Por observação da Figura 4 pode-se concluir que, ao fim de 24 horas, todas as misturas estão estabilizadas, sendo que o compósito que envolve as fibras de banana é o que apresenta menor velocidade (cerca de 1500 m/s), seguindo-se das misturas com fibras acrílicas, vidro, basalto e sisal que rondam os mesmo valores (cerca de 1700 m/s). A mistura que contém fibras têxteis apresenta uma velocidade de aproximadamente 1800 m/s e a maior velocidade verifica-se para a mistura padrão (próxima dos 1900 m/s).

3.4. Resistência à flexão e à compressão em provetes 40x40x160 mm³

Nas Tabelas 5 e 6 estão apresentados os valores médios das tensões de rotura registados no ensaio de flexão e compressão, respetivamente, bem como os correspondentes coeficientes de variação (CoV), resultantes dos ensaios de provetes com 40x40x160 mm³.

Tabela 5 – Tensão de rotura por flexão, f_n , em provetes 40x40x160 mm³.

Mistura	f_n (MPa)	CoV (%)
Padrão	3.1	0.9
Têxtil	2.8	0.7
Acrílica	3.3	0.3
Vidro	5.1	0.7
Banana	2.4	1.9
Basalto	4.2	1.1
Sisal	3.0	0.6

Tabela 6 – Tensão de rotura por compressão, f_c , em provetes 40x40x160 mm³.

Mistura	f_c (MPa)	CoV (%)
Padrão	4.1	6.2
Têxtil	5.1	4.2
Acrílica	4.1	6.8
Vidro	4.8	4.6
Banana	3.9	3.2
Basalto	4.7	4.8
Sisal	4.9	4.5

Relativamente à tensão de rotura por flexão (Tabela 5), verificou-se um melhor desempenho para as misturas fabricadas com fibras de vidro e fibras de basalto. Já as misturas contendo fibras têxteis e fibras de banana foram as que apresentaram pior resistência. Salienta-se que estes dois tipos de compósito apresentaram pior resistência à flexão do que a mistura padrão, que foi fabricada sem incorporação de qualquer tipo de fibra.

Examinando os resultados obtidos para a tensão de rotura por compressão (Tabela 6), verifica-se que todas as misturas possuem bom comportamento à compressão e, tal como no ensaio de resistência à flexão, o compósito de banana voltou a apresentar uma tensão de rotura à compressão ligeiramente inferior à da mistura padrão.

3.5. Comportamento em compressão em provetes cilíndricos $\phi 100 \times 200$ mm

Para os diferentes compósitos foram determinados os diagramas tensão-extensão obtidos através dos ensaios de compressão uniaxial, que permitiram caracterizar o comportamento das diferentes misturas em estudo. Para tal, conforme descrito em 2.5, foram submetidos a ensaio provetes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

Dos resultados obtidos (Figura 5) observou-se que, para a maioria dos provetes, o comportamento dos compósitos compreende um tramo linear, seguindo-se uma fase de comportamento não linear antes de ser atingido o pico de resistência. Este comportamento não linear poderá estar associado à microfissuração que se desenvolve antes de a carga máxima ter sido atingida. Seguidamente, no regime pós-pico, as várias composições apresentaram um comportamento semelhante, que se traduziu num ramo descendente muito suave ao qual está associada uma variação ligeira da resistência à compressão para deformação elevada. Este comportamento traduz a natureza dúctil da argamassa de gesso reforçada com fibras, qualquer que seja o seu tipo.

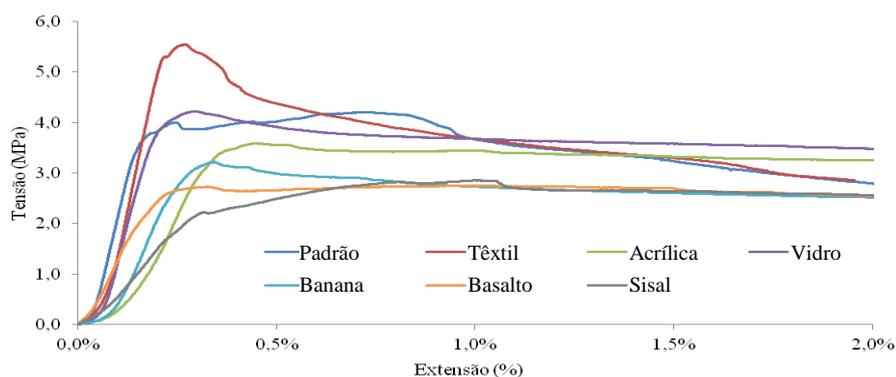


Figura 5 – Diagrama tensão-extensão em compressão uniaxial de todas as misturas.

Analisando as resistências à compressão obtidas (Tabela 7) e confrontando-as com as apresentadas na Tabela 6, constata-se que os valores são, em geral, semelhantes. Por observação dos resultados constantes na Tabela 7, verifica-se, também, que as misturas com fibras têxteis, de vidro e também a mistura padrão foram as que apresentaram maior resistência e que as misturas com fibras vegetais de sisal e banana foram as que apresentaram menor resistência à compressão uniaxial.

Tabela 7 – Tensão de rotura por compressão, $f_{c\phi}$, em provetes $\phi 100 \times 200$ mm para as diferentes misturas.

Mistura	$f_{c\phi}$ (MPa)	CoV (%)
Padrão	4.9	12.1
Têxtil	5.7	19.0
Acrílica	4.7	19.3
Vidro	4.4	5.8
Banana	3.3	8.9
Basalto	3.4	13.5
Sisal	3.1	19.6

Para as diferentes argamassas de gesso reforçadas com fibras foram, também, determinados os módulos de elasticidade em compressão com base no ajuste linear aos diagramas cíclicos tensão-extensão, até uma carga máxima de 30% do valor da resistência à compressão.

Os valores do módulo de elasticidade consideraram-se como correspondentes ao valor médio das inclinações do ramo de carga dos diagramas tensão-extensão no último ciclo de carga.

Na Tabela 8 são apresentados os valores médios do módulo de elasticidade em compressão e do coeficiente de variação dos diferentes compósitos.

Tabela 8 – Módulo de elasticidade em compressão, E_c , dos compósitos.

Mistura	E_c (MPa)	CoV (%)
Padrão	3589.4	7.3%
Têxtil	3745.7	5.2%
Acrílica	2887.5	6.3%
Vidro	3257.4	5.3%
Banana	2470.0	24.1%
Basalto	2689.2	13.8%
Sisal	2839.8	13.0%

3.6. Comportamento em flexão em provetes 100x100x850 mm³

Na Figura 6 apresentam-se os resultados do comportamento em flexão e na Tabela 9 os respectivos valores médios e coeficientes de variação da energia de fratura.

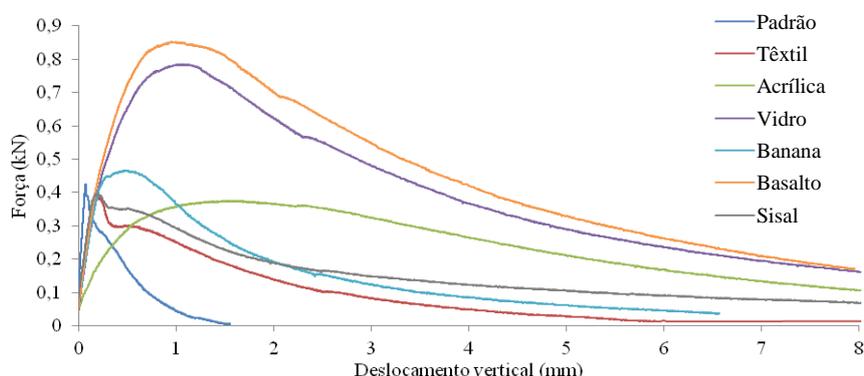


Figura 6 – Diagrama força-deslocamento para o cálculo da energia de fratura.

Tabela 9 – Valores médios e coeficientes de variação da energia de fratura, G_f .

Mistura	G_f (N/m)	CoV (%)
Padrão	76.0	3.0
Têxtil	208.3	4.4
Acrílica	239.1	2.7
Vidro	428.1	11.4
Banana	179.0	14.4
Basalto	394.6	3.8
Sisal	230.4	4.7

A análise dos diagramas força-deslocamento presentes na Figura 6 permite observar que existem diferenças de comportamento para as diferentes argamassas reforçadas com fibras. Verifica-se que o comportamento na fase inicial é muito semelhante não se detetando diferenças significativas ao nível da rigidez. As diferenças verificadas são ao nível da força máxima atingida e do regime pós-pico. As misturas com incorporação de fibras de vidro e de basalto são as que apresentaram maior força máxima e um comportamento bastante dúctil, indiciando o bom comportamento das respectivas fibras.

O comportamento pós-pico, caracterizado por uma diminuição acentuada da resistência para valores de deslocamento crescentes, é diferente apesar de alguns grupos seguirem uma tendência.

Estes comportamentos permitem antecipar que a energia de fratura é consideravelmente superior no caso dos compósitos reforçados com fibras. Estes resultados são confirmados pelos valores mais elevados da energia de fratura apresentados na Tabela 9.

Ao analisar a Figura 6 e a Tabela 9, pode-se agrupar o comportamento dos compósitos em 3 classes distintas.

A mistura padrão comportou-se como uma mistura frágil quando comparada com as restantes, sem grande capacidade de absorção de energia, conforme seria de esperar.

No segundo grupo destacaram-se as misturas com fibras de vidro e basalto. Neste grupo verifica-se que as forças máximas atingidas são relativamente próximas e substancialmente superiores às restantes, ultrapassando claramente a resistência da mistura padrão, o que demonstra a capacidade de reforço conferida por estas fibras. Foram para estas duas misturas que se verificaram os maiores valores da energia de fratura.

No terceiro grupo incluem-se as restantes misturas. Neste grupo verifica-se que qualquer das fibras incorporadas se revelou benéfica, superando o desempenho da mistura padrão, pois as suas curvas, no ramo pós pico, são mais alongadas, revelando uma capacidade de absorção de energia superior.

Conclui-se, assim, que todas as fibras, com maior ou menor diferença, conferem um melhor comportamento ao compósito, sendo, portanto, a sua incorporação nas misturas vantajosa.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos ao longo da campanha experimental realizada é possível concluir que, das fibras que foram selecionadas, seria de esperar que as de vidro ou basalto apresentassem os melhores resultados devido à sua superior resistência à tração e, de facto, nos ensaios que indicam a resistência do material, isso verificou-se. Tal deve ter ocorrido devido à maior capacidade de reforço associada a estas fibras devido, não à sua maior resistência à tração, mas ao maior módulo de elasticidade, que se estima seja tanto maior quanto a respetiva tensão de rotura. Em relação às fibras que se esperaria um pior comportamento, banana e sisal, também foi observado que tiveram o pior desempenho em parte dos ensaios que foram realizados.

Relativamente à razão água/gesso para a otimização do compósito, chegou-se à conclusão que a mistura que necessita de uma menor quantidade de água é a padrão e a que necessita de maior é a de fibras de banana.

No ensaio de ultrassons, ao fim de 24 horas todas as misturas apresentaram uma velocidade de propagação de onda de ultrassons estabilizada. Neste ensaio, o compósito de banana apresentou menor velocidade de onda de ultrassons, enquanto a mistura padrão apresentou a maior.

No ensaio de resistência à flexão, a mistura com fibras de vidro apresentou o melhor comportamento e a mistura com fibras de banana apresentou o pior, um dos resultados que se estariam à espera de acordo com as características das fibras. No entanto, é de destacar que a mistura padrão apresenta melhor comportamento que outros compósitos nos provetes $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$.

Já para o ensaio de compressão nos provetes $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, a mistura com fibras têxteis foi a mistura que apresentou melhor comportamento, enquanto a banana apresentou o pior.

Na compressão uniaxial em provetes $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$, a mistura com fibras têxteis voltou a apresentar o melhor comportamento, enquanto a mistura com fibras de sisal apresentou o valor inferior. Para o módulo de elasticidade a mistura com fibras têxteis apresentou o valor mais elevado e a mistura com fibras de banana o menor. Desta forma, as fibras inseridas no compósito garantem maior rigidez ao compósito.

Como conclusão geral, salienta-se que os resultados registados para as composições com melhores desempenhos se revelaram de acordo com o expectável, *i.e.*, melhor comportamento para as fibras de origem mineral: basalto e vidro. Em relação ao compósito

com fibras têxteis, como não foi possível caracterizar as propriedades mecânicas da própria fibra, este compósito surpreendeu pelos bons resultados obtidos.

No ensaio de flexão, para obtenção da energia de fratura, as misturas com fibras de vidro e com fibras de basalto apresentaram os melhores resultados. Mesmo as fibras dotadas de piores características mecânicas conferiram ao compósito um comportamento mais dúctil quando comparados com a mistura sem fibras.

Conclui-se, então, que todas as fibras cumprem um papel importante no compósito. Nos ensaios de flexão nos provetes 40x40x160 mm³ não se verificou esta tendência o que levou à conclusão que para estes tipos de compósitos (com incorporação de fibras) estes ensaios não aparentam ser fidedignos pois, aparentemente, a orientação das fibras não foi a mais adequada.

5. REFERÊNCIAS

Cunha, S., Desenvolvimento de uma solução de paredes divisórias com incorporação de resíduos, *Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil*, Universidade do Minho, Guimarães (2010).

EN 1015-11, Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, *European Committee for Standardization*, Belgium (1999).

EN 13279-2, Gypsum binders and gypsum plasters – Part 2: Test methods, *European Committee for Standardization*, Belgium (2004).

Gomes, A., Revestimentos com fibras para reabilitação, *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil*, Universidade de Aveiro (2010).

NP EN 12504-4, Ensaios do betão nas estruturas – Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons, *Instituto Português da Qualidade* (2007).

Oliveira, L., Alves, P. e Dias, S., Desempenho de argamassas reforçadas com fibras acrílicas, *2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção*, Lisboa (2007).

Vila-Chã, N., Estudo de um material compósito à base de gesso e cortiça, *Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil*, Universidade do Minho (2012).