MATERIAIS DE MATRIZ CIMENTÍCIA DE ELEVADO DESEMPENHO PARA O REFORÇO ESTRUTURAL

Barros, Joaquim[1]; Esmaeeli, Esmaeel[2]; Baghi, Hadi [3]

[1] Universidade do Minho, ISISE, Prof. Catedrático, e-mail: barros@civil.uminho.pt
[2] Universidade do Minho, ISISE, Aluno Doutoramento, e-mail: esmaeeli@civil.uminho.pt
[3] Universidade do Minho, ISISE, Aluno Doutoramento, e-mail: hadibaghi@gmail.com

RESUMO

No presente trabalho avaliam-se as potencialidades de materiais com endurecimento em tração (designados na bibliografia inglesa por "Strain Hardening Cement Composites-SHCC") no reforço à flexão de estruturas com comportamento frágil, e no reforço ao corte de vigas de betão armado (BA). No reforço à flexão foi aplicada uma camada de SHCC, de 15 e 20 mm de espessura, na face de tração de vigas de alvenaria formadas por tijolos maciços de argila ligados por argamassa de baixa resistência, tendo-se constatado que esta técnica de reforço, de fácil e rápida execução, permite aumentar significativamente, quer a capacidade de carga como a deformabilidade deste tipo de elementos estruturais. Para o reforço ao corte de vigas de BA foram pré-fabricados painéis de SHCC de 18 mm de espessura, os quais foram aplicados nas faces laterais das vigas a reforçar por intermédio de adesivo epóxi. Um dos grupos de vigas foi reforçado aplicando nas suas faces laterais manta de fibras de carbono (CFRP) segundo a técnica "Externally Bonded Reinforcement-EBR", sobre a qual foi aplicado o tipo de painel de SHCC anteriormente referido, recorrendo a adesivo epóxi. Os resultados dos ensaios demonstraram que ambas as técnicas, somente com painel de SHCC, e com SHCC mais manta de CFRP, permitem aumentar significativamente a rigidez e a capacidade de carga de vigas de BA, em especial neste último caso, em resultado da adequada sinergia de efeitos dos materiais envolvidos.

Palavras chave: Materiais de matriz cimentícia com endurecimento em tração; CFRP; reforço à flexão; reforço ao corte.

ABSTRACT

In the present work the potentialities of strain hardening cement composites (SHCC) are assessed for the flexural strengthening of brittle structural elements, as well as for the shear strengthening of reinforced concrete (RC) beams. For the flexural strengthening, masonry beams, formed by massive clay bricks bonded by low strength mortar, were strengthened with a layer of SHCC of 15 or 20 mm thickness applied in the tensile surface of these beams. The results have evidenced the possibility of increasing significantly the load carrying capacity and the deformability of this quite brittle type of structural elements. For the shear strengthening of RC beams it was explored the potentialities of applying prefabricated panels of 18 mm thickness on the lateral faces of the beams. In one of the groups of beams, a sheet of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) was combined with the SHCC. The results demonstrated the capacity of these techniques to increase the load carrying capacity and the stiffness of RC beams failing in shear, mainly when SHCC is combined with CFRP, due to the favorable synergy effect of the ductile character of SHCC and the high tensile strength and elasticity modulus of CFRP.

Keywords: Strain hardening cement composites; CFRP; flexural strengthening; shear strengthening.

1. INTRODUÇÃO

Desde início da última década do século passado tem-se assistido ao desenvolvimento de novos materiais de matriz cimentícia reforçados com fibras em que a sua resistência à tração é superior à de início da fendilhação da sua matriz e ocorre para deformação muito superior à correspondente ao início da fendilhação, em geral superior a 2% (Li and Wu, 2001). Estes materiais são designados por compósitos de matriz cimentícia com endurecimento em tração ("*Strain Hardening Cement Composites* - SHCC" na língua inglesa), e caracterizam-se pela formação de um padrão difuso de fissuras entre a fase de início da fendilhação da matriz e a fase de degeneração de micro-fissuras em macro-fenda de rotura, a qal ocorre no momento em que a tensão máxima de tração é alcançada. O caráter de material com endurecimento (*strain hardening*) ou amolecimento (*strain softening*) é determinado com base em ensaio de tração com provete sem qualquer entalhe, tal como representado na Figura 1.

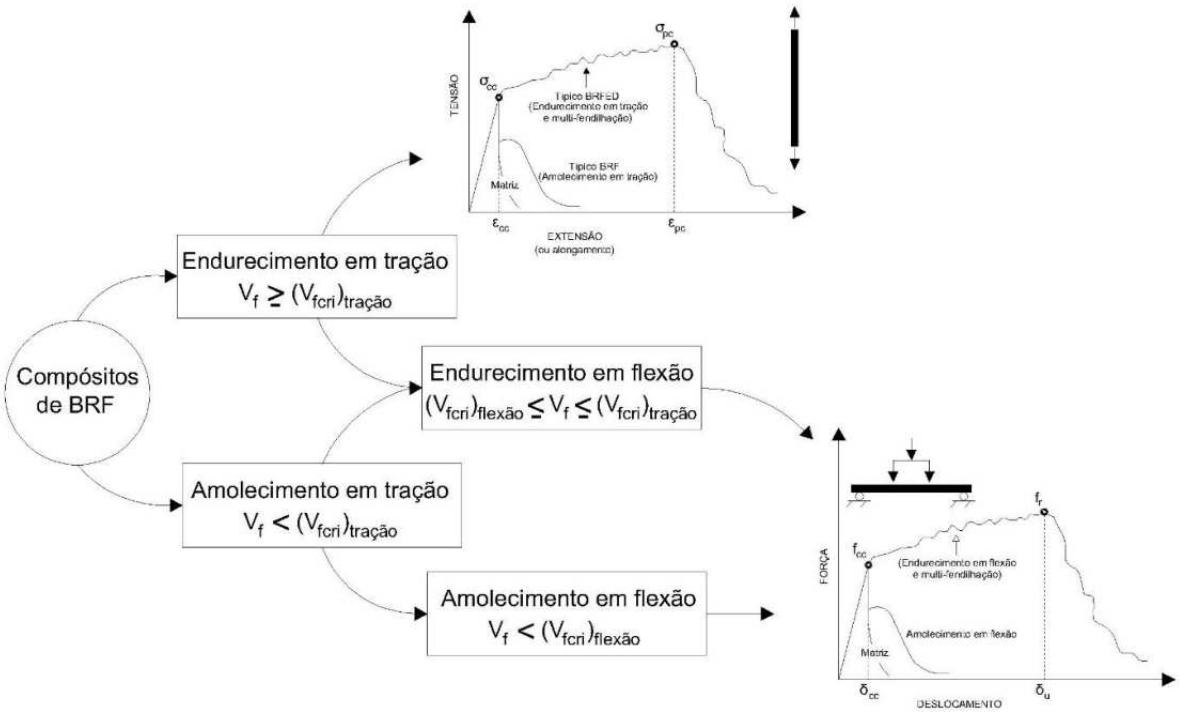


Figura 1: Classificação de concretos reforçado com fibras (CRF ou BRF) (adaptado de Naaman e Reinhardt, 2005)

Assim, para uma determinada matriz, cuja resistência varia entre os 2.5 e os 5 MPa, existe uma dada percentagem volumétrica de fibras, $(V_{fcri})_{tração}$, (que depende do tipo de fibras utilizado), acima do qual o comportamento em tração uniaxial é de endurecimento. Este material tem sempre endurecimento quando submetido a carregamento de flexão. Os materiais de matriz cimentícia reforçados com $V_f<(V_{fcri})_{tração}$ apresentam amolecimento em tração, mas apresentarão endurecimento em flexão caso a percentagem volumétrica de fibras seja superior à que garante formação de padrão difuso de fendas em flexão, i.e.,

$(V_{fcri})_{flexão} \leq V_f \leq (V_{fcri})_{tração}$, caso contrário o comportamento em flexão será de amolecimento, o que é acompanhado por formação de um reduzido número de fissuras.

A opção por SHCC pode ter impacto muito favorável na durabilidade de novos sistemas construtivos, bem como na reabilitação de estruturas, pois para níveis de extensão de tração que ocorrem em condições de serviço em estruturas de engenharia civil, a abertura máxima de fissura em SHCC é muito inferior ao limite máximo recomendado nos códigos de dimensionamento. No caso da reabilitação e reforço estrutural, a possibilidade de se combinar estes materiais de elevada ductilidade com materiais de matriz polimérica reforçada com fibras (*fibre reinforced polymers* - FRP) pode aportar vários tipos de benefícios. De fato, os FRP são materiais imunes a fenômenos de corrosão, apresentam relativa elevada resistência à tração e módulo de elasticidade, mas são suscetíveis a temperaturas elevadas (acima da temperatura de transição vítrea do polímero) e a atos de vandalismo. Assim, pretende-se desenvolver SHCC na forma de painel pré-fabricado ou betonado in situ, podendo se reforçado com FRPs. Neste último caso atribuiu-se a designação HCP, podendo este painel ser utilizado no reforço à flexão, e/ou corte, e no aumento da capacidade de dissipação de energia da estrutura, tal como esquematicamente representado na Figura 2.

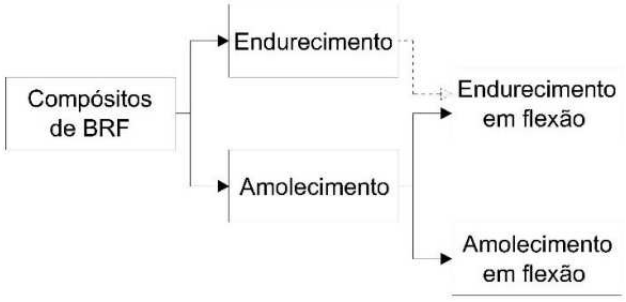
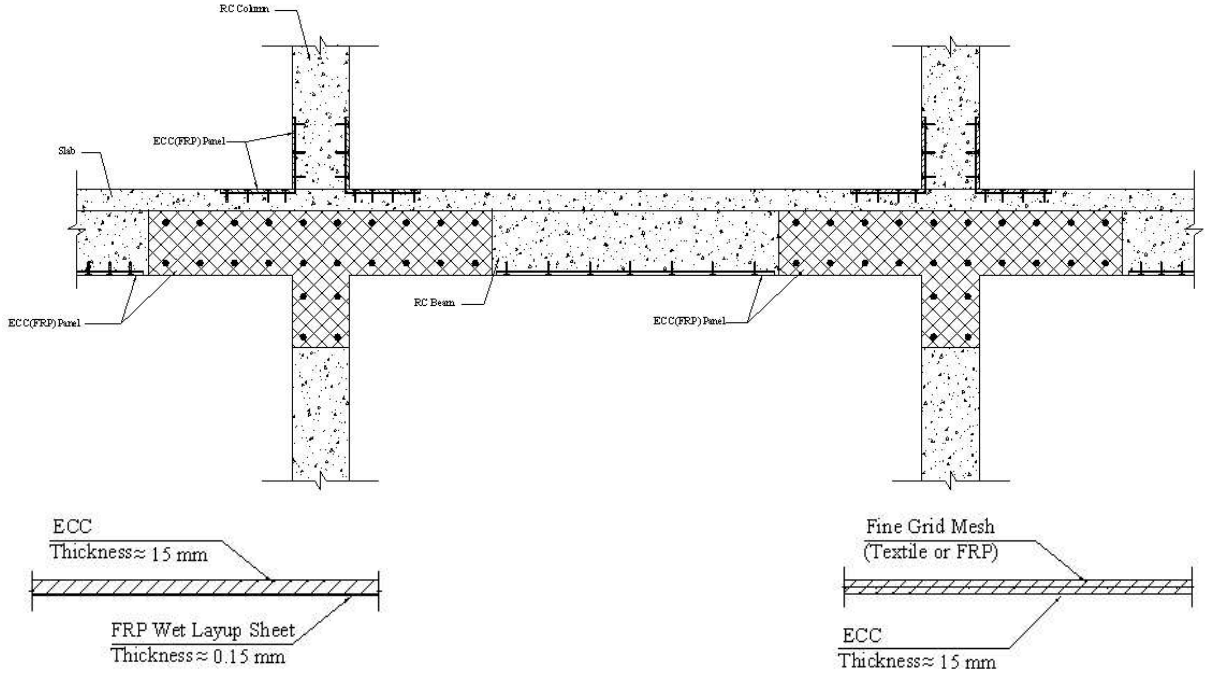


Figura 2: Aumento da capacidade de dissipação de energia da estrutura

O FRP pode ser constituído por manta ou tecido colado na face interior do painel, laminados de CFRP aplicados segundo a técnica *Near Surface Mounted* (NSM) (Barros e Fortes 2005, Salvador e Barros 2013), ou rede na face interior ou na camada central do painel. Estes painéis podem ser aplicados sobre a estrutura a reforçar aplicando adesivo de base epóxi. No entanto, podem também ser fixos por meio de ancoragens mecânicas sem ocorrência de rotura localizada no SHCC junto às ancoragens, dado que a elevada capacidade de redistribuição de tensões internas do SHCC após o início da sua fendilhação evita a falência do painel por ocorrência prematura deste modo de rotura.

No presente trabalho as potencialidades do SHCC são avaliadas no reforço à flexão de elementos com comportamento frágil, como é o caso de vigas de alvenaria formada por blocos de argila ligados por argamassa de baixa resistência.
No que respeita ao painel prefabricado de SHCC, reforçado, ou não, com CFRP, o seu potencial será explorado no reforço ao corte de vigas de concreto armado (CA), como mostra a figura 3.
Os programas experimentais realizados são descritos, e os principais resultados obtidos são apresentados e discutidos.



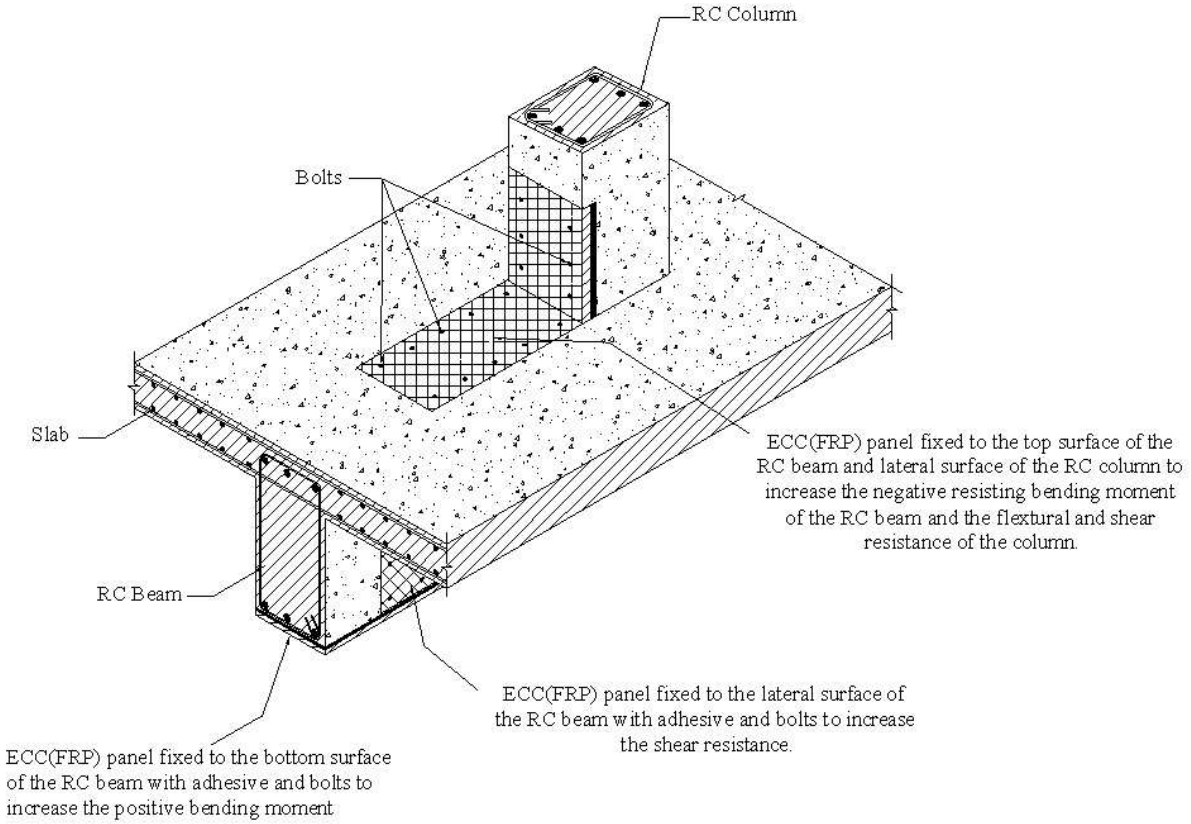


Figura 3: Possibilidade de painéis de SHCC reforçados com FRP para o reforço à flexão, corte e de aumento da capacidade de dissipação de energia de estruturas porticadas de CA.

Jéferson e Fabrício, traduzirem a figura antes de publicar

2. DESENVOLVIMENTO DE SHCC E CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL

2.1 Composições de SHCC

A metodologia detalhada de desenvolvimento do SHCC encontra-se descrita por Manning (2011). Essa metodologia foi condicionada pelo fato de se pretender obter um SHCC com propriedades reológicas e mecânicas apropriadas para aplicação de uma fina camada na face de tração de vigas formadas por tijolos maciços de argila ligados por junta de argamassa de baixa resistência, bem como possibilitar a formação de finos painéis de SHCC pré-fabricados. O SHCC deve ter excelente aderência a materiais de matriz cimentícia (para o reforço de estruturas de concreto) e de argila (tijolos e demais materiais do mesmo tipo), e ter elevada fluidez para preencher moldes e infiltrar-se nas juntas entre tijolos sem recurso a compactação. Em termos de propriedades mecânicas, o SHCC deveria ser capaz de proporcionar um aumento significativo da capacidade de carga dos elementos estruturais a reforçar, com reduzido incremento do peso destes.

Para tal foram realizadas misturas com três diferentes razões água/ligante (ligante=cimento + cinzas volantes), 0.27, 0.30 e 0.35, mantendo-se constante a percentagem de superplastificante, no seu limite máximo recomendado pelo fabricante. Na Tabela 1 apresentam-se os constituintes utilizados no desenvolvimento do SHCC, enquanto na Tabela 2 indicam-se os procedimentos de amassadura. Em todas as composições foi utilizado 2% em volume de fibras PVA de 8 mm de comprimento, 40 μm de diâmetro, 40 GPa de módulo de elasticidade e 1600 MPa de resistência à tração.

Tabela 1: Constituintes do SHCC.

Material	Abreviatura	Tipo	Densidade (kg/m^3)
Cimento	C	I 42.5R	3150
Cinzas volantes	FA	Class F	2362
Água	W	-	1000
Areia	S	Areia de sílica (D_{max}= 500 μm)	2630
Superplastificante	SP	-	1060
Controlador de viscosidade	VMA	-	1008
Fibras "polyvinyl Alcohol"	F	PVA	1300

Tabela 1 – Procedimento de amassadura das matrizes e do compósito.

Procedimento	Constituintes	Duração (sec)
1	S + C + FA	30
2	0.5W + SP	150
3	0.5W + VMA	150
4	Fibras	300

Para cada composição foi medido o diâmetro de espalhamento (D_{MS}) com o mini-cone e o tempo de escoamento (T_{VF}) com o ensaio do funil para obtenção de indicador da fluidez e deformabilidade da mistura, respetivamente. A afinação das composições foi efetuada de forma a serem obtidos D_{MS} entre 300 e 350 mm e T_{VF} entre 10 e 20 segundos nas matrizes, pois investigação preliminar na tecnologia do SHCC (Esmaeeli et al. 2009) tinha evidenciado que a introdução de 2% em volume de fibras PVA afetava negativamente estes parâmetros reológicos dos SHCC. Na Tabela 3 apresentam-se as três composições das matrizes selecionadas para produção de SHCC, onde se indicam os valores de D_{MS} e T_{VF} obtidos.

Tabela 3: Composições da matriz para fabrico de SHCC.

Matriz	Tipo SP	SP/B[a]	Tipo VMA	VMA/B[a]	FA / C	W / B[a]	S / B[a]	D_{MS}	T_{VF}
		%		%	%	%	%	mm	sec
T08	SP1	2	VMA1	0.100	120	30	50	315	25
T13	SP1	2	VMA1	0.100	120	35	50	337	10
T40	SP1	2	VMA1	0.060	120	27	50	319	18

[a] B=Ligante= Cimento + Cinzas volantes

Às três matrizes indicadas na tabela 3 foram adicionados 2% em fibras PVA, tendo resultado os SHCC indicados na Tabela 4, onde consta o valor registado para D_{MS}, que confirma a diminuição da fluidez da matriz com a inclusão das fibras, tal como era expectável. Estas composições não apresentaram sinais de segregação dos constituintes, e a sua deformabilidade assumiu-se adequada para as aplicações pretendidas.

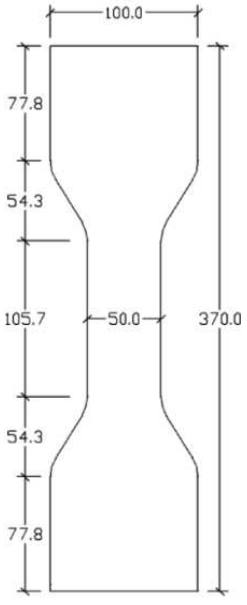
Tabela 4 – Composições de SHCC e resultados de mini-slump

Designação do SHCC	Matriz	D_{MS} (mm)
T42-SHCC	T08	185
T43-SHCC	T13	210
T44-SHCC	T40	140

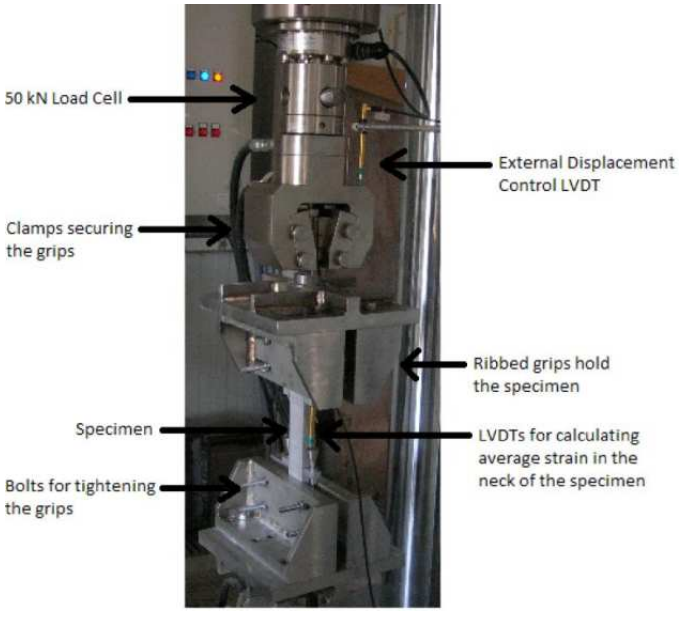
2.2 Caracterização do comportamento à tração

Por cada composição de SHCC foram preparados três provetes com formato de "osso de cão" para determinação das propriedades em tração destes compósitos. A geometria deste tipo de provete, bem como a configuração de ensaio, encontram-se na Figura 3. Os provetes foram desmoldados após 24 horas da sua betonagem, e foram curados até à data de ensaio em câmara de cura à temperatura de 20^0 C e 60% de humidade. Um provete por cada composição foi ensaiado em tração aos 14 dias, enquanto os dois restantes foram ensaiados aos 28 dias. Os ensaios foram executados sob controlo de deslocamento à velocidade de 5 μm/sec. Detalhes sobre a preparação dos provetes e sistema de ensaio e monitorização encontram-se descritos em Esmaeeli et al. (2013).

Dois transdutores de deslocamentos (LVDTs) foram colocados em cada uma das maiores faces do provete, com um campo de medida de 130 mm, para determinar a extensão média de tração nessa zona (Figura 4).



a)



b)

Figura 3: a) Provete para caracterização do comportamento em tração de SHCC (dimensões em mm), e b) configuração de ensaio.

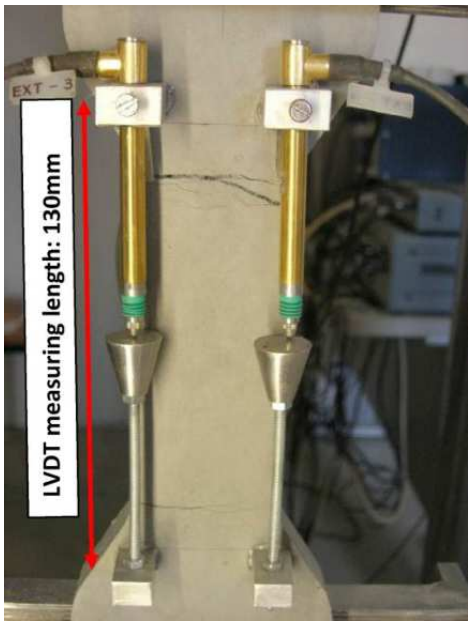


Figura 4: Posicionamento dos LVDTS no provete para determinação da extensão.

A curva média da relação tensão-extensão dos provetes de cada composição encontra-se representada na Figura 5. Destes ensaios foram determinados os valores dos seguintes parâmetros (Tabela 5): tensão de inicio da fendilhação, f_{cr}, e sua correspondente extensão, ε_{cr}, tensão máxima de tração, f_{ctu}, e sua correspondente extensão, ε_{ctu}, e deformabilidade pós início da fendilhação, $\varepsilon_{ctu}-\varepsilon_{cr}$. Os resultados obtidos revelam uma direta relação entre o parâmero da composição W/B e $\varepsilon_{ctu}-\varepsilon_{cr}$, verificando-se um aumento deste parâmetro com o W/B. Por outro lado verifica-se a existência de uma relação inversa entre f_{cr} e W/B, não tendo sido possível determinar qualquer relação entre f_{ctu} e W/B.

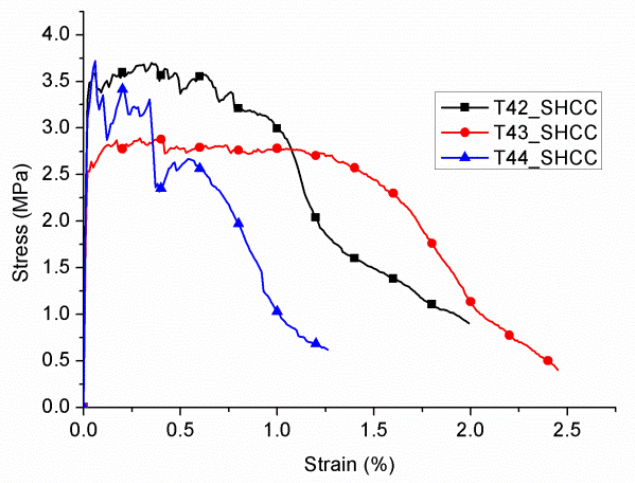


Figura 5: Relação tensão-extensão em provetes das três composições de SHCC.

Tabela 2 – Resultados relevantes dos ensaios de tração uniaxial em provetes de SHCC

Designação do SHCC	D_{MS}	f_{cr}	f_{ctu}	Deformabilidade [a]
	mm	N/mm²	N/mm²	%
T44-SHCC	140	3.73	3.73	0.00
T42-SHCC	185	3.57	3.87	0.47
T43-SHCC	210	2.66	2.71	1.26

[a] Deformabilidade: $\varepsilon_{ctu} - \varepsilon_{cr}$

3. REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS DE ALVENARIA

3.1 Provetes, técnica de reforço e configuração de ensaio

Tendo em conta os valores determinados para os três SHCCs (Tabela 5), considerou-se que o T42-SHCC reúne o melhor compromisso de resistência e ductilidade, pelo que foi o selecionado para ser utilizado no reforço das vigas de alvenaria.

Na Figura 6 representa-se a geometria do tipo de vigas ensaiadas, dispondo de um comprimento total de 805 mm ao longo do qual foram colocados 11 tijolos maciços de argila ligados por argamassa de baixa resistência (LSM) de 20 mm de espessura média. O valor médio de espessura, altura e largura dos tijolos é 55, 105 e 205 mm, respetivamente. A largura das vigas de alvenaria é igual à largura do tijolo (205 mm). Os tijolos e a argamassa utilizados neste programa experimental são iguais aos empregues por Häβler e Barros (2013) num projeto anterior onde foi utilizado betão auto-compactável reforçado com fibras de aço para aumento da resistência à flexão do tipo de vigas em causa.

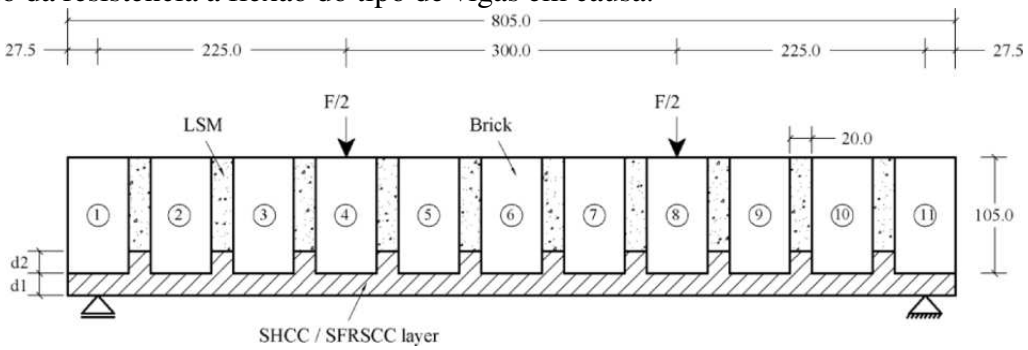


Figura 6: Configuração de reforço das vigas de alvenaria com camada de SHCC. Para B15: d1=15mm e d2=20mm; para B20: d1=20mm and d2=20mm (dimensões em mm).

No presente programa, uma camada de SHCC foi aplicada na superfície das vigas que foi submetida a tração. Duas vigas foram reforçadas com camada de 15 mm de espessura de SHCC, e outras duas com camada e SHCC de 20 mm de espessura. As primeiras formaram a série designada por B15 (B15-1 e B15-2), e as segundas a série B20 (B20-1 e B20-2). Uma

viga de referência foi também fabricada sem aplicação da camada de SHCC. No fabrico deste tipo de vigas, os tijolos eram colocados no molde e a LSM era aplicada entre os tijolos. Nas vigas a serem reforçadas com SHCC, uma camada de 20 mm de espessura da junta de LSM era removida para que a camada de SHCC ficasse com nervuras transversais, na perspetiva deste embricamento mobilizar mais eficazmente o potencial de reforço da camada de SHCC. Após 24 horas da aplicação do LSM, a viga manteve-se durante 7 dias envolvida por toalhas humedecidas. Catorze dias após a aplicação da LSM, a camada de SHCC foi aplicada na face superior da viga (aquando do ensaio a viga foi rodada de forma a ficar com a camada de SHCC em tração). A camada de SHCC foi regularizada de acordo com o nível dado ao molde, no entanto, devido à irregularidade geométrica dos tijolos, não foi possível garantir camada de SHCC com espessura constante ao longo do desenvolvimento da viga. O SHCC foi vibrado externamente para libertar ar aprisionado. Após 24 horas da aplicação do SHCC, as vigas foram submetidas a um período de 7 dias de cura recorrendo a toalhas humedecidas. O desmolde das vigas ocorreu 12 dias após a aplicação do SHCC e os ensaios sob quatro pontos de carga ocorreram no dia seguinte, pelo que na data dos ensaios a LSM tinha 27 dias e o SHCC 13 dias, pois pretendia-se avaliar a capacidade de reforço do SHCC ao final de um período relativamente curto de cura.

Na Figura 7 representa-se o sistema de suporte dos LVDTs e o posicionamento destes, bem como o carregamento e as condições de apoio. O LVDT a meio vão foi utilizado para controlar o ensaio a 3 μm/sec. O ensaio era interrompido quando a superfície de fratura atravessava toda a secção da viga ou quando a flecha a meio vão alcançava 10 mm.

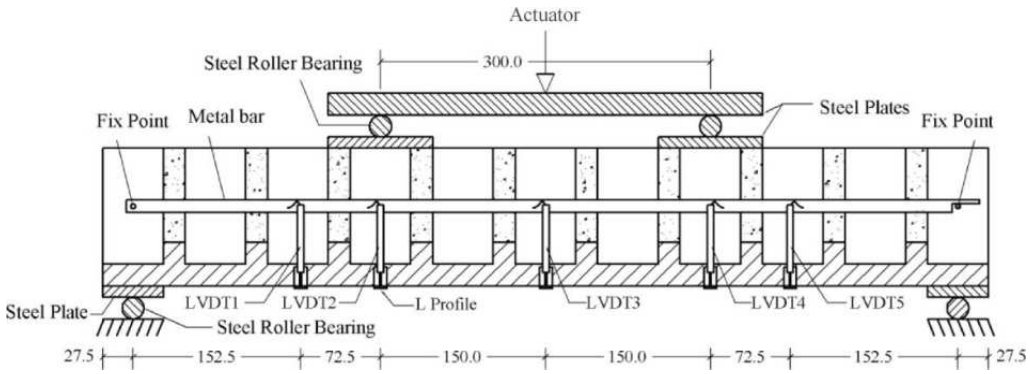


Figura 7: Condições de carregamento, apoio e monitorização.

3.2 Resultados

A viga de referência rompeu sob o seu peso próprio durante o processo do seu desmolde, tendo a rotura ocorrido pela interface LSM-tijolo da junta central da viga, o que já era previsto, tendo em conta o relativo baixo valor de aderência obtido por Häβler e Barros (2013) em ensaios de arranque. Dada a resistência à flexão ser praticamente nula, qualquer

incremento na capacidade de carga da viga reforçada será devido ao contributo da camada de SHCC.

Na Figura 8 representa-se a relação entre a carga aplicada e a flecha a meio vão (*F-d*). Constata-se que as duas vigas da série B15 apresentaram resultados praticamente coincidentes, com comportamento quase linear e elástico até cerca de 3.3 kN e flecha de 0.4 mm, seguido de um pronunciado comportamento não linear devido à formação de um padrão difuso de fendas na camada de SHCC, principalmente no ramo de flexão pura (Figura 9). Estes provetes romperam pela formação de uma macro-fenda que, após ter atravessado a camada de SHCC, progrediu pela interface entre o tijolo e os materiais cimentícios da junta. O valor médio da carga máxima ($\bar{F}_{max}$) e correspondente flecha ($\bar{d}_{max}$) foi 9.6 kN e 5.7 mm, respetivamente.

Na série B20 as duas vigas tiverem comportamento mais distinto que o registado na série B15 (Figura 8). Tal deveu-se à maior irregularidade da espessura da camada de SHCC ao longo do desenvolvimento das vigas. Enquanto a capacidade de carga das vigas foi muito similar, com valor médio de 12.9 kN, a flecha na carga máxima foi d_{max}=9.7 mm e 6.6 mm na B20-1 e B20-2, respetivamente, resultando o valor médio de 8.2 mm.

Os resultados relevantes obtidos nestes ensaios encontram-se na Tabela 6. Com a exceção da viga B20-2, as restantes romperam de forma similar, numa primeira fase com o desenvolvimento de padrão difuso de fendas na camada de SHCC, seguido de localização da fenda de rotura e sua propagação na interface tijolo-SHCC e tijolo/LSM. Na viga B20-2 a fenda de rotura por flexão formou-se junto a uma das secções solicitadas, tendo-se propagado através do tijolo com certa inclinação, típica de fenda de corte, e finalmente redirecionou-se para a interface LSM-tijolo por onde progrediu até à ocorrência da rotura da viga. A menor capacidade de deformação da viga B20-2 deve-se ao caráter mais frágil da propagação da fenda de corte através do tijolo.

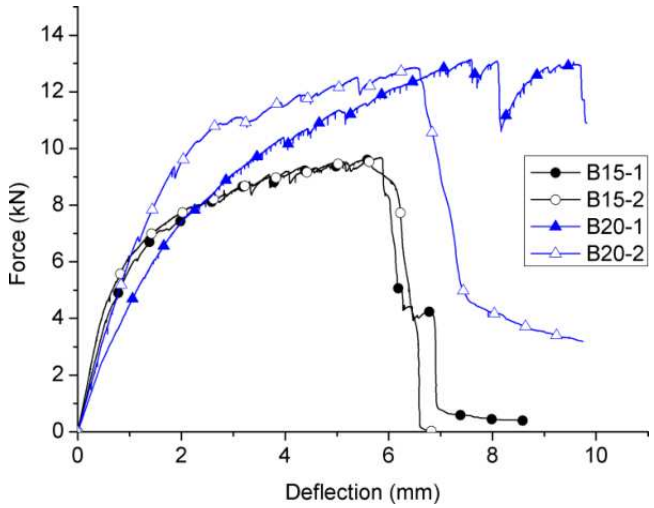


Figura 8**:** Relação força-flecha a meio vão nas vigas reforçadas com camada de SHCC.

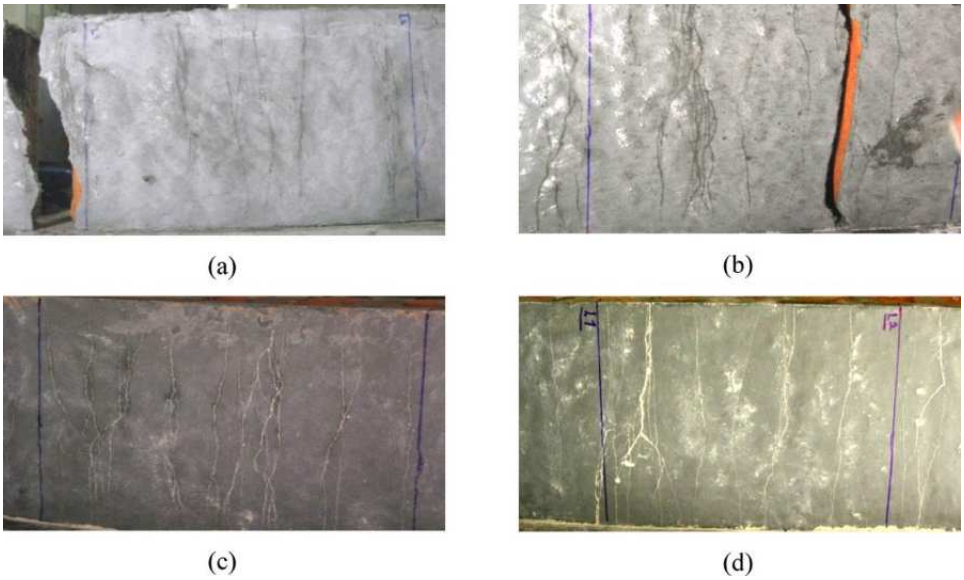


Figura 9: Padrão de fendilhação na camada de SHCC das vigas de alvenaria reforçadas: a) B15-1; b) B15-2; c) B20-1; d) B20-2.

Tabela 3: Principais resultados dos ensaios de flexão com vigas de alvenaria reforçadas com camada de SHCC

Propriedade	Unidade	Designação da viga			
		B15-1	B15-2	B20-1	B20-2
Carga máxima	kN	9.68	9.60	12.95	12.82
Flecha sob carga máxima	Mm	5.86	5.55	9.70	6.60

4. REFORÇO AO CORTE

4.1 Introdução

Neste capítulo descreve-se um programa experimental de avaliação do potencial de painéis de SHCC, reforçados com FRP, de forma a constituírem soluções de reforço do tipo dos indicados na Figura 1, para o reforço ao corte de vigas de betão armado.

4.2 Séries de vigas, geometria e armaduras da viga tipo e sistemas de reforço ao corte

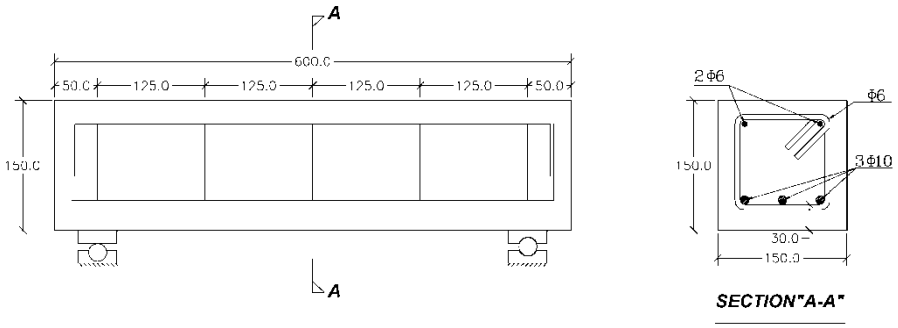
Para além dos painéis em SHCC para o reforço ao corte, foi também investigado o potencial da aplicação de uma camada de manta de fibras de carbono unidirecionais (CFRP) na face interior do painel de SHCC. As fibras de carbono da manta ficaram orientadas ao longo do maior desenvolvimento do painel, o que coincide com o eixo das vigas a serem reforçadas. Apesar de não ser a orientação mais favorável para reforço ao corte, a opção por esta orientação das fibras na colocação da manta no painel deve-se ao facto desta orientação assegurar um comprimento efetivo de aderência

relativamente elevado às fibras de carbono a serem atravessadas pela fenda de corte, pois a reduzida altura da secção transversal da viga não garantia a melhor eficácia se as fibras ficassem orientadas na direção ortogonal ao eixo da viga. Para avaliar a eficácia de painéis de SHCC no reforço ao corte de vigas de BA foi executado o programa experimental descrito na Tabela 7. Este programa foi composto por dez vigas de BA de secção transversal de 150 × 150 mm, com comprimento de 600 mm e distância entre apoios de 500 mm (Figura 10). As duas vigas tipo A, designadas de CB, dispunham da percentagem mínima de estribos recomendada pelo ACI318 (2005), enquanto as 8 vigas da série B apenas tinham um estribo na secção de apoio com a função de manter a armadura longitudinal na posição pretendida (Figura 10). As vigas tipo A são consideradas vigas de referência, enquanto nas vigas tipo B foram adotados três sistemas de reforço ao corte (Figura 11): duas vigas BF reforçadas nas faces laterais com manta de fibra de carbono, em que fibras ficaram orientadas segundo o eixo da viga; quatro vigas BS reforçadas nas faces laterais com painel SHCC; duas vigas BH reforçadas com manta de CFRP e painel de SHCC nas faces laterais. A manta de CFRP aplicada nas vigas BF e BH era do mesmo tipo e foi aplicada segundo o mesmo procedimento. As vigas dispunham de três varões de aço de 10 mm de diâmetro na face de tração e dois varões de aço de 6 mm de diâmetro na face de compressão.

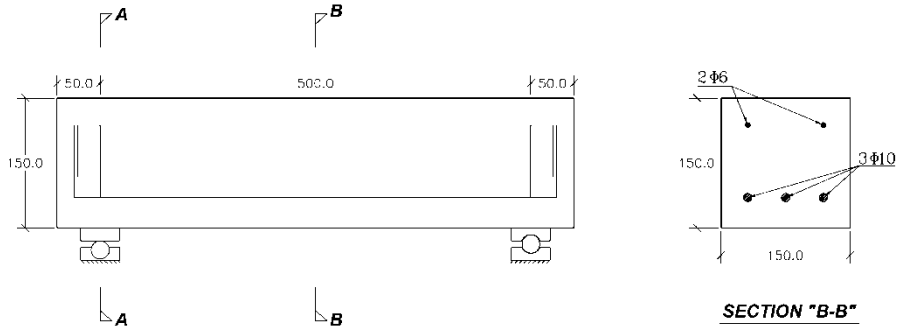
Tabela 10: Séries de vigas ensaiadas.

Série	Designação	Técnica de reforço	Número de vigas ensaiadas
A	CB	N/A	2
B	BF	CFRP	2
	BS	Painel SHCC	4
	BH	HCP* (painel SHCC + CFRP)	2

*Combinação de painel SHCC e manta de CFRP

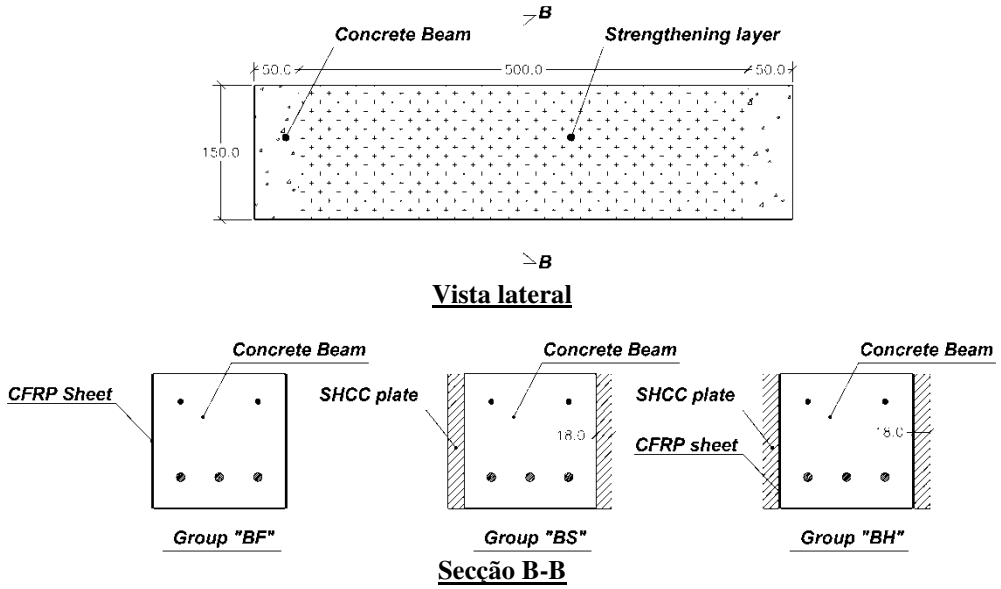


Viga tipo "*A*"



Viga tipo "*B*"

Figura 10: Geometria das vigas e detalhes das armaduras (dimensões em mm)



Vista lateral

Secção B-B

Figura 11: Detalhes dos sistemas de reforço ao corte adotados nas vigas da série "*B*"

4.3 Propriedades dos materiais

O betão das vigas apresentou valor médio de resistência à compressão de 21.2 MPa aos 28 dias de idade (medido em provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura).

A manta de CFRP utilizada era da marca S&P C-Sheet 240, que segundo o fabricante apresenta módulo de elasticidade de 240 GPa e resistência nominal à tração de 3800 MPa, com extensão de rotura de 1.55%. Foi medida a espessura da manta tendo-se obtido o valor médio de 0.3 mm.

A fixação da manta de CFRP ao betão e do painel de SHCC à viga foi efetuada por aplicação de adesivo epóxi S&P 50, que aos 14 dias de cura apresentou resistência à tração de 35.8 MPa e módulo de elasticidade de cerca de 2.6 GPa.

A metodologia de desenvolvimento do SHCC é a descrita na secção 2 deste trabalho, encontrando-se as características da composição indicadas na Tabela 11, e mais detalhes podem ser encontrados em Esmaeel et al. (2013).

Para obtenção dos painéis de SHCC a serem aplicados nas faces das vigas dos grupos BS e BH foram fabricados quatro painéis de 490×500×20 mm^3 por enchimento de moldes de acrílico. O enchimento do molde foi efetuado no centro deste, tendo o SHCC fluído do centro para as extremidades do molde pela ação do seu peso próprio, dado o caráter auto-compactável assegurado ao SHCC desenvolvido. Após a betonagem, os painéis foram cobertos com folha de plástico e mantidos no laboratório, no local da betonagem, durante 24 horas. Após o seu desmolde, os painéis foram colocados em câmara de cura à temperatura de 20° C e 85% de humidade relativa até aos 28 dias. Em trabalho anterior tinha-se constatado que estas eram as condições de cura que asseguravam a maior resistência à tração com a menor abertura de fissura (Esmaeel et al. 2012).

Por cada um destes painéis foram extraídos, por corte, os painéis de 18 mm × 150 mm × 500 mm para aplicação nas vigas, bem como dois provetes para caracterização do comportamento em tração do SHCC. Nestes provetes foi executado um entalhe em ambas as faces laterais na secção a meia altura do provete para forçar o início e propagação de fissura na secção entalhada, e assim determinar a relação tensão *vs.* abertura de fissura, cuja curva média (oito provetes) se encontra na Figura 12. De acordo com esta figura, a tensão de início de fendilhação e a tensão máxima de tração do SHCC desenvolvido é 2.43 MPa e 3.35 MPa, respetivamente.

Tabela 11: Percentagem, em peso, dos constituintes do SHCC

Cinzas volantes / Cimento	***Água / B****	***Areia / B****	***Adições **/B****	***Fibras PVA ******
120	30	50	2.2	2

* B: Ligante (cimento + cinzas volantes); ** superplastificante + controlador de viscosidade; *** percentagem em volume.

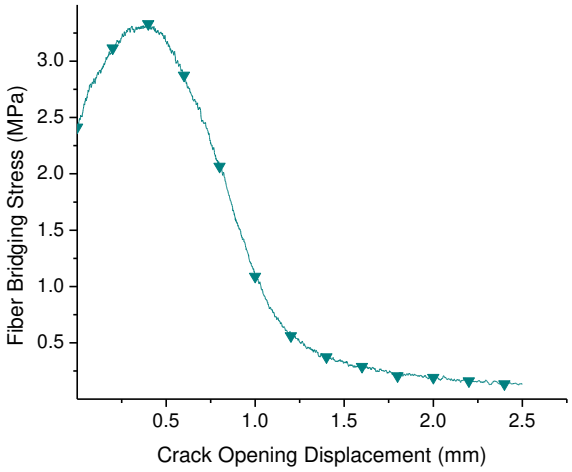


Figura 12: Curva média tensão-abertura de fissura nos oito provetes de SHCC ensaiados.

4.4 Preparação das vigas para aplicação dos sistemas de reforço ao corte

A face dos painéis de SHCC a ficar em contato com a face lateral das vigas a reforçar foi retificada, removendo cerca de 2 mm, de forma a ser assegurada uma superfície perfeitamente plana.

Nas vigas BF e BH a manta de CFRP foi aplicada da mesma forma. Assim, após o tratamento, por esmerilagem, das faces de betão a ficarem em contato com a manta, esta foi fixa ao betão por aplicação do adesivo epóxi S&P 50. No caso das vigas BH, na face do painel de SHCC a ficar em contato com a manta de CFRP, foi aplicada uma camada deste adesivo de forma a fixar o painel às faces laterais das vigas, as quais já dispunham da manta de CFRP. O painel era então aplicado sobre a face lateral da viga e mantido sob pressão com ajuda de grampos. Este processo de aplicação da manta de CFRP e do painel de SHCC em cada uma das faces laterais das vigas BH foi executado de forma sequencial e no menor período de tempo possível. Após 24 horas do reforço de umas das faces, a metodologia repetiu-se para a outra face da viga.

Nas vigas do grupo BS os painéis de SHCC foram fixos às faces laterais das vigas por aplicação de camada de epóxi S&P 50 nas faces de betão e do painel em contato.

4.5 Configuração de ensaio e sistema de monitorização

Na Figura 13 apresentam-se as condições de carregamento e apoio, bem como o sistema de monitorização adotado. A relação entre o vão de corte (distância da secção de um dos apoios à secção de aplicação da carga, 250 mm) e a altura útil da secção da viga (cerca de 120mm) é de aproximadamente 2, o que favorece a condução da carga aplicada para os apoios. Assim, as condições

materializadas por esta configuração de ensaio são próximas das que existem em vigas altas (de relativa elevada secção transversal), onde os painéis de SHCC, reforçados, ou não, com CFRP podem contribuir não somente para suster as tensões de tração, bem com as bielas de compressão que se formam neste tipo de elemento estrutural.

A força aplicada em cada uma das vigas ensaiadas foi medida por intermédio de célula de carga de 150 kN, tendo a deformabilidade da viga sido determinada por meio de LVDTs dispostos de acordo com o esquema representado na Figura 13. Os ensaios foram efetuados sob controlo de deslocamento à velocidade de 5 μm/sec imposto no pistão do atuador.

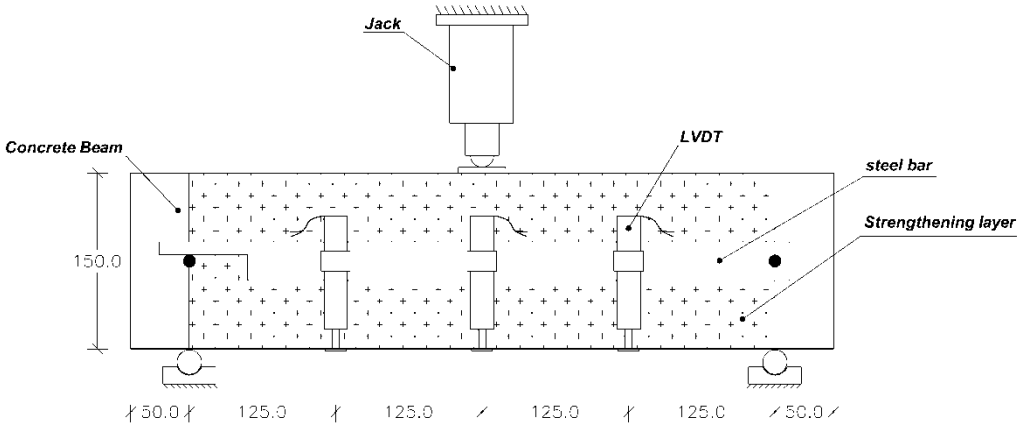


Figura 13: Condições de carregamento, apoio e sistema de monitorização (dimensões em mm)

4.6 Resultados

Em cada grupo de vigas os padrões de fendilhação foram muito similares, tendo, no entanto, sido registada maior variabilidade nas vigas BS, provavelmente em resultado da dificuldade em assegurar condições de ligação uniformes dos painéis de SHCC às faces da viga. Na Figura 14 apresentam-se os padrões de fendilhação típicos registados no final dos ensaios dos quatro grupos de vigas do programa experimental. Em Esmaeel et al (2013) é descrito em detalhe o processo de iniciação e propagação das fissuras. Importa salientar o padrão mais difuso de fendas de flexão registado nas vigas do grupo BH devido ao contributo do painel reforçado de SHCC, bem como a formação de fendas de rotura por corte nas restantes vigas. As vigas do grupo BF romperam de forma bastante frágil devido ao abrupto destacamento do CFRP.

Na Figura 15 apresenta-se a curva média carga-flecha registada nos quatro grupos de vigas ensaiadas, sendo visível o maior aumento de capacidade de carga e de rigidez proporcionado pelos painéis reforçados de SHCC (vigas do grupo BH). Comparando com a resposta média do grupo de vigas de referência, CB, constata-se que os painéis de SHCC reforçados proporcionaram um aumento de 19% em termos de carga máxima. Devido à significativa maior rigidez das vigas do grupo BH, a flecha na carga máxima foi cerca de 27% inferior à registada no grupo das vigas de referência. Nas vigas do grupo BS, reforçadas com painel SHCC, a capacidade de carga foi 91% da registada nas vigas de

referência, sendo a rigidez bem superior. Para além destes aspetos, é de realçar a capacidade de retenção da máxima carga durante uma variação assinalável de flecha. Tal como esperado, a aplicação exclusiva de CFRP não teve impacto em termos da rigidez das vigas, e garantiu uma capacidade de carga significativamente inferior à de referência (74%).

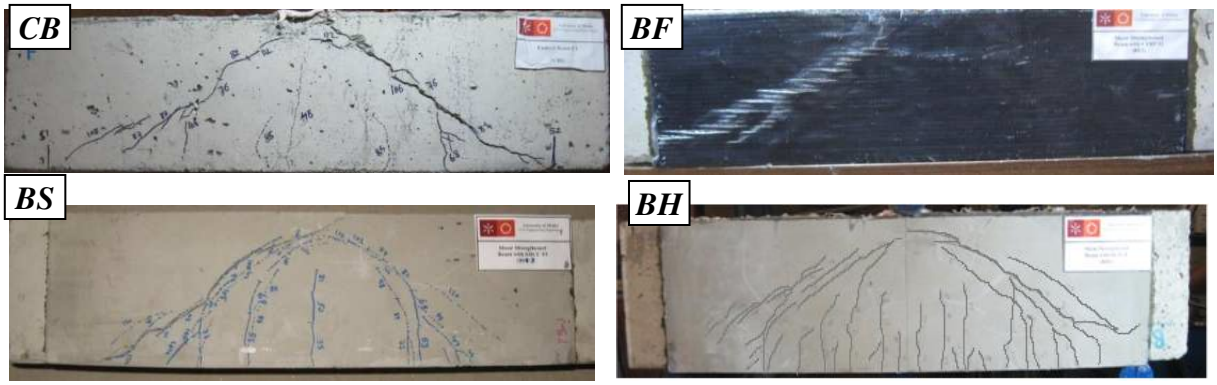


Figure 14: Padrão de fendilhação típico nas vigas ensaiadas.

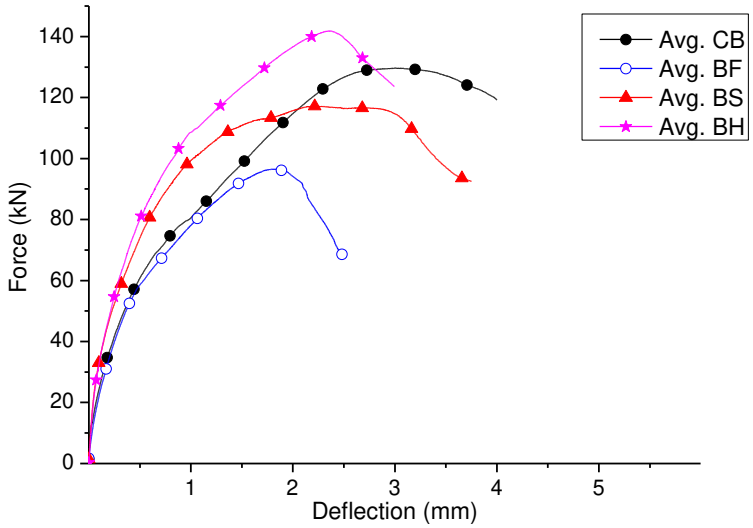


Figura 15: Curva média da relação força-flecha registada nas duas vigas de cada um dos quarto grupos de vigas ensaiadas.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram avaliadas as potencialidades de compósitos de matriz cimentícia reforçados com fibras de PVA no reforço à flexão de elementos com comportamento frágil, e ao corte de vigas de betão armado (BA). Este material apresenta endurecimento em tração, tendo sido designado neste trabalho por SHCC. Foi apresentada uma metodologia de

desenvolvimento de SHCC capaz de apresentar propriedades reológicas e mecânicas apropriadas para reforço de estruturas com comportamento extremamente frágil, como é o caso de vigas de alvenaria com tijolos ligados por junta de argamassa de baixa resistência. Foram efetuadas duas séries, ambas com duas vigas, distinguindo-se pela espessura da camada de SHCC, uma de 15 mm (B15) e a outra de 20 mm (B20). O valor médio da capacidade de carga da série B15 e B25 foi 9.6 kN e 12.9 kN, respetivamente, com valor médio de flecha máxima de 5.7 mm e 8.2 mm, tendo a viga de alvenaria de referência (não reforçada) rompido sob a ação do seu peso próprio.

A segunda parte do trabalho foi dedicada à descrição de um programa experimental de avaliação do potencial de aplicação de painéis de SHCC, combinando, ou não, manta de CFRP, no reforço ao corte de vigas de BA. Para além das vigas de referência com percentagem de estribos determinada segundo o ACI 318 (2005), foram ensaiadas vigas reforçadas nas faces laterais com painéis de SHCC de 18 mm de espessura, e vigas em que entre estes painéis e a face das vigas existia manta de CFRP com as fibras orientadas segundo o eixo da viga. Dos resultados obtidos pode-se assim concluir que a combinação de SHCC com materiais de FRP pode proporcionar soluções de reforço ao corte que podem aumentar significativamente a rigidez e capacidade de carga, sem comprometer a capacidade deformacional da estrutura em condições de rotura.

6. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho é apoiado por fundos FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade - COMPETE e fundos nacionais, através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projeto PrePam – Painéis pré-fabricados em materiais avançados para a reabilitação de estruturas - PTDC/ECM/114511/2009. O terceiro autor agradece a bolsa ao abrigo deste projeto, enquanto o segundo agradece a bolsa SFRH/BD/65663/2009 financiada pela FCT.

7. REFERÊNCIAS

ACI 318-05. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318r-05): American Concrete Institute; 2005.

BARROS, J.A.O., FORTES, A.S. **Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits**. Cement and Concrete Composites Journal, 27(4), 2005, 471-480.

DIAS, S.J.E.; BARROS, J.A.O. **Shear strengthening of RC beams with NSM CFRP laminates: experimental research and analytical formulation**. Composite Structures Journal, 99, 2013, 477-490.

ESMAEELI, E.; MANNING, E.; BARROS, J.A.O. **Strain hardening fiber reinforced cement composites for the flexural strengthening of masonry elements of ancient structures**. Construction and Building Materials Journal, 38, January, 2013, 1010-1021.

ESMAEELI, E.; BARROS, J.A.O.; MASTALI, M. **Effects of curing conditions on crack bridging response of PVA reinforced cementitious matrix**. 8th RILEM international symposium on fibre reinforced concrete: challenges and opportunities (BEFIB2012). Guimaraes, Portugal, 2012.

ESMAEELI, E.; BARROS, J.A.O.; GONÇALVES, D.M.F. **Preliminary assessment on the development of cost-competitive PVA fiber reinforcement mortar**. Civil Eng. Dep., School of Eng., University of Minho: ISISE; 2009.

HÄßLER, D.; BARROS, J.A.O. **Exploring the possibilities of steel fibre reinforced self-compacting concrete for the flexural strengthening of masonry structural elements**. International Journal of Architectural Heritage Conservation, Analysis, and Restoration, 7(1), 2013, 26-53.

LI, V.C.; SHUXIN, W.; WU, C. **Tensile Strain-hardening Behavior of Polyvinyl Alcohol Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC)**. ACI Materials Journal, 98(6), 2001, 483-492.

MANNING E. **Strain Hardening Fiber Reinforced Cement Based Material for the Strengthening of Ancient Structures**. MSC Thesis, Civil Eng. Dep., School of Eng.: University of Minho, 2011.

NAAMAN, A.E.; REINHARDT, H.W. **Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response**. Proceedings 3rd international Conference on Construction materials: Performance, Innovations and Structural Implications (ConMat'05) and Mindess Symposium, p. 458, Eds: N. Banthia, A. B., T. Uomoto & Shah, S., University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2005.