



VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DE COMPÓSITOS DO TIPO SHCC PARA MELHORIA DA DURABILIDADE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

TINOCO, Matheus Pimentel (1); SILVA, Flávio Andrade (2)

(1) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, tinocomatheus19@gmail.com

(2) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, fsilva@pucrio.br

RESUMO

Compósitos cimentícios do tipo SHCC são materiais especiais de matriz cimentícia, geralmente reforçados por microfibras poliméricas e caracterizados por elevada ductilidade e tenacidade, com ganho de resistência pós-fissuração. A produção de tais compósitos demanda a utilização de elevados volumes de cimento e fibras, o que torna o seu custo elevado, sendo necessários estudos para avaliar a sua aplicabilidade em obras correntes de engenharia. Neste sentido, o trabalho apresenta as vantagens e desvantagens deste material e avalia a sua viabilidade como substituto do concreto em estruturas, avaliando aspectos técnicos, como produção e aplicação e aspectos econômicos, considerando os custos dos materiais. Verificou-se que o material possui possibilidades de aplicações pontuais, como a realização de reparos e reforços estruturais.

Palavras-chave: SHCC, Fibras Poliméricas, Reparos estruturais.

ABSTRACT

Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC) are special materials of cementitious matrix, usually reinforced by polymeric microfibers, characterized by high ductility and toughness, with post-cracking increase of strength. The production of such composites, however, demands high volumes of cement and fibers, which makes their cost high, which demands studies to evaluate their applicability in concrete structures. In this sense, this work presents the advantages and disadvantages of the application of this material and evaluates its viability as a substitute of concrete in structures, evaluating technical aspects such as production and application and economic aspects, considering the costs of materials. It was found that the material has the possibility of specific applications, such as repairs and structural strengthening.

Keywords: SHCC, Polymeric Fibers, Structural Repair.

1 INTRODUÇÃO

O Concreto pode ser definido como um material compósito cimentício produzido a partir da mistura de água, cimento Portland, agregados (areia, brita, entre outros) e eventualmente, aditivos e adições minerais, sendo um dos materiais de construção mais amplamente utilizados pela humanidade nos dias atuais, com consumo anual de cerca de 25 bilhões de toneladas, perdendo apenas para a água, em termos de volume total consumido a cada ano (Gursel et al., 2014). O material, entretanto, possui a desvantagem de apresentar comportamento frágil e baixa resistência à tração, o que o deixa suscetível à ocorrência de fissuração gerada por retração e por solicitações mecânicas, demandando a utilização de

reforços para viabilizar a sua aplicação como material estrutural (BENTUR e MINDESS, 2007).

Uma alternativa à aplicação de reforços convencionais é a utilização de fibras dispersas aleatoriamente no concreto, que podem substituir parcialmente as armaduras de aço e atuar no sentido de reduzir a fissuração e aumentar a ductilidade, contribuindo para aumentar a durabilidade do elemento estrutural. Por utilizarem reforços discretos, os concretos fibrosos possuem uma versatilidade de aplicação muito maior e já vêm sendo utilizados em muitas situações práticas, como em pisos industriais, concreto projetado, barragens e estruturas pré-moldadas.

Dentro do contexto de materiais cimentícios fibrosos, os compósitos cimentícios com comportamento de "endurecimento" ou *Hardening*, conhecidos em inglês como *Strain Hardening Cementitious Composites* (SHCC) são uma classe especial de compósitos de alto desempenho caracterizados por elevada ductilidade e tenacidade, geralmente formados por uma matriz a base de cimento e reforçados por microfibras poliméricas de alto desempenho, como fibras de PVA, polietileno de alta peso molecular, aramida e PBO (Curosu et al., 2017), as quais permitem que o material mantenha ou aumente sua resistência mesmo após o surgimento da primeira fissura.

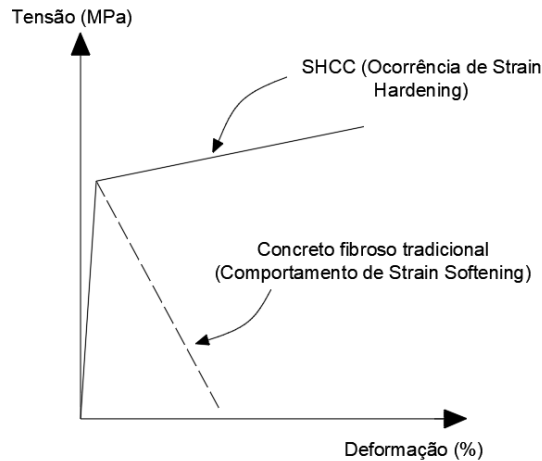
Outra característica importante deste material é a ocorrência de múltiplas fissuras com abertura controlada, menores que 100µm (Li, 2003), o que pode impedir ou reduzir a penetração de agentes agressivos, contribuindo para melhoria da durabilidade, tornando promissor o seu uso para realização de *retrofits* e reparos em elementos estruturais. Neste sentido, este trabalho apresenta as principais vantagens e desvantagens deste tipo de material e avalia a sua viabilidade como substituto do concreto em estruturas, avaliando aspectos técnicos, como produção, transporte e aplicação e aspectos econômicos, considerando os custos dos materiais utilizados em sua produção.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Compósitos Cimentícios do Tipo SHCC

Compósitos cimentícios com comportamento de *strain hardening* são materiais especiais de matriz cimentícia reforçados por fibras, caracterizados pela ocorrência de múltiplas fissuras de abertura controlada e aumento ou manutenção da resistência após a ocorrência da primeira fissura, o que lhe confere elevada ductilidade e tenacidade e o difere dos concretos reforçados por fibras tradicionais, que apresentam queda de resistência (*strain softening*) após a fissuração da matriz cimentícia, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Comportamento de *Strain Hardening*



Fonte: própria do autor

As primeiras ocorrências desse tipo de material datam da década de 70. Em 1975, ALI et al. relataram a obtenção do comportamento de múltipla fissuração com ganho de resistência em compósitos cimentícios utilizando fibras de vidro de 10 a 40mm e frações em volume entre 2 e 8%. Apesar dos ganhos de resistência e de capacidade de deformação observados, a deformação máxima não ultrapassou 1%.

Em 1978, Kasparikiewicz utilizou pela primeira vez o termo "*strain hardening*" para descrever ganho de resistência e ductibilidade observado em compósitos cimentícios ensaiados a tração, produzidos com 2% de fibras de aço com ganhos nas extremidades, 0,4 mm de diâmetro e 25 mm de comprimento. Nos anos de 1980, foi desenvolvido um material com esse comportamento denominado SIFCON (LANKARD, 1984) , obtido a partir da utilização de elevados volumes de fibras de aço, entre 5 e 12%. Apesar de atingir uma elevada resistência à compressão e elevadas capacidades de deformação, o volume excessivo de fibras utilizadas e a necessidade de técnicas especiais de produção, como o processo de infiltração de pasta de cimento (*slurry-infiltrated technique*) tornavam a aplicação desse tipo de compósito limitada.

O grande salto no desenvolvimento do SHCC se deu a partir da década de 90, em grande parte devido ao desenvolvimento do método de dosagem micromecânico (LI et al., 1984), que utiliza conceitos de mecânica da fratura e propriedades da interface fibra-matriz para otimizar o volume de fibras a ser utilizado no concreto (LI et al., 1995). Atualmente, as fibras mais utilizadas para a produção desse tipo de compósito são as microfibras PVA, as quais são mostradas na Figura 2.

Figura 2 – Microfibras de PVA (própria do autor)



Fonte: própria do autor

Outras fibras comumente utilizadas na produção de SHCC são as fibras de polietileno de alta densidade (HDPE, do inglês *High Density Polyethylene*), fibras de Aramida e PBO, além de microfibras de aço. A Tabela 1, a seguir, mostra as características das principais fibras utilizadas.

Tabela 1 – Fibras Utilizadas para produção do SHCC

Material	PVA	HPDE	Aramida	PBO-HM
Marca	Kuralon	Dyneema	Technora	Zylon
Fabricante	Kuraray	DSM	Teijin	Toyobo
Diâmetro (µm)	40	20	12	13
Comprimento (mm)	12	6	6	6
Densidade (g/cm³)	1,26	0,97	1,39	1,56
Resistência (MPa)	1600	2500	3400	5800
Módulo de elast. (GPa)	40	80	74	270

Fonte: Curosu et al., 2017

2.2 Utilização de SHCC para Melhoria da Durabilidade

Como mostrado anteriormente, materiais cimentícios do tipo SHCC possuem comportamento mecânico e características especiais que potencializam seu uso para melhoria da durabilidade de estruturas de concreto. Entre elas, a abertura controlada de fissuras, que reduz ou impede a penetração de agentes agressivos no concreto, reduzindo também a corrosão da armadura (VAN ZIJL, 2010).

PAUL et al. (2017) realizaram ensaios de corrosão induzida por cloreto, verificando a corrosão da armadura a partir do decaimento da corrente que passa pela armadura à medida que esta sofre corrosão. Os ensaios

foram realizados para a matriz sem fibras e para compósitos do tipo SHCC, carregados e descarregados. De acordo com o autor, o elevado número de fissuras, com pequena abertura, fizeram com que a área disponível para a formação de anodos e catodos se reduza, o que reduz significativamente a corrosão da armadura.

SAHMARAN et al. (2011) investigaram as propriedades de transporte íons de cloretos em compósitos cimentícios do tipo SHCC sob carregamentos mecânicos e ambientais combinados. Para tanto, foram realizados testes de imersão em solução salina de corpos de prova previamente carregados. As amostras pré-carregadas de SHCC desenvolveram microfissuras inferiores a 50 μm e um coeficiente de difusão significativamente menor que de argamassa similarmente pré-carregada devido ao controle rígido da largura de fissuras. Além disso, a formação de microfissuras permitiu a ocorrência de autocicatrização na região das fissuras sujeitas à exposição à solução de NaCl.

LI (2008) estudou a durabilidade de amostras carregadas de SHCC em ambiente alcalino. Para tanto, as amostras foram inicialmente carregadas em tração direta e mantidas em ambiente alcalino por 3 meses a 38°C e depois recarregadas até a ruptura. Os resultados mostraram que as amostras recuperaram quase completamente sua rigidez quando ensaiadas novamente, o que pode estar associado ao fenômeno de autocicatrização. Os resultados apresentados confirmaram o bom desempenho do material em ambiente altamente alcalino.

2.3 Utilização de SHCC para Reparo e Reforço Estrutural

A elevada capacidade de deformação aliada à elevada resistência residual faz com que compósitos com comportamento de *strain hardening* sejam alvo de diversos estudos para atestar sua viabilidade como material de reparo. LIM (1997) estudou a viabilidade de aplicação de compósitos do tipo SHCC reforçados com fibras de PVA para como material de reparo estrutural. Para tanto, os autores avaliaram o efeito da aplicação de camadas de SHCC sobre amostras já fissuradas e submetidas a carregamento de flexão. Os autores demonstraram que a presença do SHCC na região da fissura retarda consideravelmente a abertura das fissuras, fazendo com que as amostras tenham uma capacidade de deflexão muito superior às amostras não-reforçadas.

KAMAL et al. (2008) avaliaram a aplicação de SHCC como material de reparo, aplicando camadas do material na fase inferior de vigas pré-fissuradas. Os autores também demonstraram que presença do SHCC na região fissurada do substrato retarda consideravelmente a abertura das fissuras existentes, contribuindo para a durabilidade do elemento estrutural.

HUSSEIN et al. (2012) avaliaram a aplicação de SHCC de alta resistência, reforçados por polietileno de alta densidade, como reforço estrutural em

vigas de concreto armado. Os autores demonstraram que a formação de fissuras no substrato acaba por levar à localização da fissura na região do reforço e, conseqüentemente, à sua ruptura. Entretanto, quando são utilizadas armaduras de aço na camada de reforço, a localização da fissura retardada, o que pode ser atribuído à boa resistência da camada de reforço. Resultados semelhantes foram obtidos no estudo de (KHALIL , 2017), que avaliou a viabilidade desse tipo de reforço para carregamentos cíclicos.

2.4 Análise de Custos e Ciclo de Vida

A partir da revisão da literatura relacionada a custos e ao ciclo de vida de compósitos do tipo SHCC fica evidente que o material possui um custo inicial muito superior ao concreto convencional, chegando a ser até quatro vezes mais caro (LI, 2002). Entretanto, é possível observar que o comportamento mecânico superior e a ocorrência de múltiplas fissuras com abertura controlada, fazem com que este possua durabilidade muito superior e seja mais vantajoso no que diz respeito aos custos de longo prazo, demandando menos manutenção, entre outros.

ZHANG et al. (2008) avaliaram a aplicação de compósitos do tipo SHCC como material de pavimentação. Para tanto, o material foi comparado com o concreto convencional e com um pavimento asfáltico (HMA) no que diz respeito a custos, consumo de energia na produção e a emissão de poluentes durante 40 anos de ciclo de vida. Os resultados indicam que o sistema com SHCC reduz a energia total do ciclo de vida em 15% e 72%, as emissões de gases de efeito estufa (GEE) em 32% e 37% e os custos em 40% e 58% em comparação com o sistema de pavimentação de concreto e de HMA, respectivamente, durante todo o ciclo de vida de 40 anos.

KEOLEIAN et al. (2005) estudaram a aplicação desse tipo de material em juntas de dilatação de pontes, quando comparadas a juntas de dilatação convencionais de aço. As juntas de dilatação de pontes são necessárias para evitar o desenvolvimento de esforços devido a retração e dilatação térmica na superestrutura de pontes. Entretanto, essas regiões acabam por se tornar pontos de entrada agentes agressivos, que podem vir a deteriorar esse tipo de estrutura. Os autores mostraram que aplicação de SHCC nessa região pode reduzir em até 50% a geração de resíduos sólidos e em 38% o consumo de matéria-prima, além de reduzir em até 40% o consumo energético em toda a vida útil.

KENDALL et al. (2008) também avaliaram a aplicação de SHCC como material de preenchimento em juntas de pontes. Os autores mostraram que a utilização do SHCC nessa aplicação reduz em até 17% os custos de manutenção da ponte, além de reduzir o consumo total de energia e a emissão de gases em até 40% durante um ciclo de vida de 60 anos. Os estudos citados mostram que o material SHCC é promissor no sentido de reduzir os custos, o gasto energético e a emissão de gases das estruturas ao longo de toda sua vida útil.

3 METODOLOGIA: DESENVOLVIMENTO DE SHCC COM MATERIAIS LOCAIS

Baseado na revisão bibliográfica apresentada, buscou-se produzir compósitos que tenham comportamento de SHCC, a fim de avaliar a viabilidade técnica de sua produção utilizando materiais locais. Para tanto, foi produzido um material reforçado por fibras de PVA baseado no traço utilizado por Jun (2010), o qual é mostrado na Tabela 3, a seguir. Em seguida, foram realizados ensaios de tração direta para avaliar o comportamento mecânico de um compósito

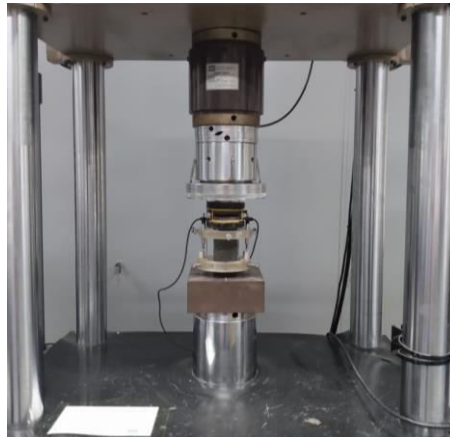
Tabela 3 – Traço Utilizado na Mistura

Material	kg/m³
Cimento CP - V ARI	505
Cinza Volante (CV)	621
Areia Diâmetro máximo 200microns	534
Superplastificante Glenium 51 (BASF)	11,7
Aditivo Modificador de Viscosidade (MasterMatrix UW 410)	1,20
Fibras de PVA (2% em volume)	26
Água	336

Os materiais utilizados foram cimento do tipo CPV-ARI, fornecido pela empresa Lafarge-Holcim, cinza volante fornecida pela empresa Pozofly, de Santa Catarina e areia quartzosa de rio com diâmetro entre 0,06 e 0,2mm. Além disso, foi utilizado superplastificante Glenium 51 com teor de sólidos de 30% com objetivo de oferecer a trabalhabilidade necessária para a moldagem dos compósitos e aditivo modificador de viscosidade MasterMatrix UW 410, a fim de evitar a segregação das fibras na mistura. Foi utilizada fibra de PVA de 12mm de comprimento e 40µm de diâmetro, da empresa Kuraray, em uma proporção de 2% em volume.

Para verificação da reologia do material no estado fresco foram realizados ensaios de *Flow Table*, conforme a NBR 13276 (2005). Também foram realizados ensaios de compressão com três amostras da matriz aos 14 dias, de 100mm de altura e 50mm de diâmetro, conforme mostrado na Figura 4.

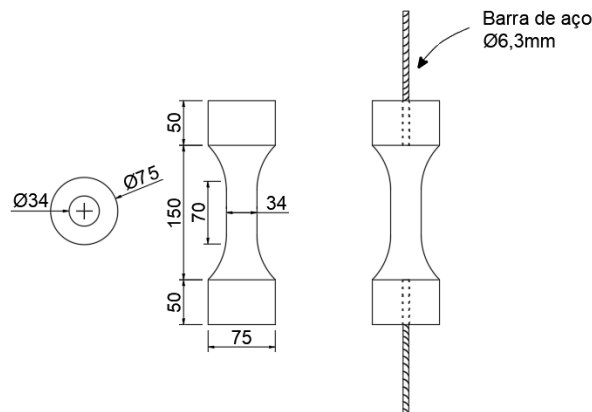
Figura 4 – Arranjo do ensaio de compressão



Fonte: própria do autor

As amostras para o ensaio de tração foram mantidas seladas em cura controlada a temperatura de 21°C por 12 dias. No 12º foram retiradas para realização de furos na parte inferior e superior para colocação de barras de aço, as quais são utilizadas para auxiliar na transferência de carga das garras do atuador para a amostra, como mostrado na Figura 3. As amostras retornaram para a sala com temperatura controlada até o 14º dia, quando foram ensaiadas.

Figura 3 – Dimensões do corpo de prova, valores em mm



Fonte: própria do autor

Em seguida as amostras foram ensaiadas em tração direta em um atuador servo-hidráulico modelo MTS 311, a uma velocidade constante de 0,3mm/min. No ensaio foi utilizado controle por deslocamento e os deslocamentos foram medidos em uma região central do corpo de prova de 65mm, utilizando dois LVDT's de 5mm de curso. Foram ensaiadas 3 amostras no total. O arranjo do ensaio é mostrado na Figura 4, a seguir.

Figura 4 – Arranjo do ensaio de tração direta

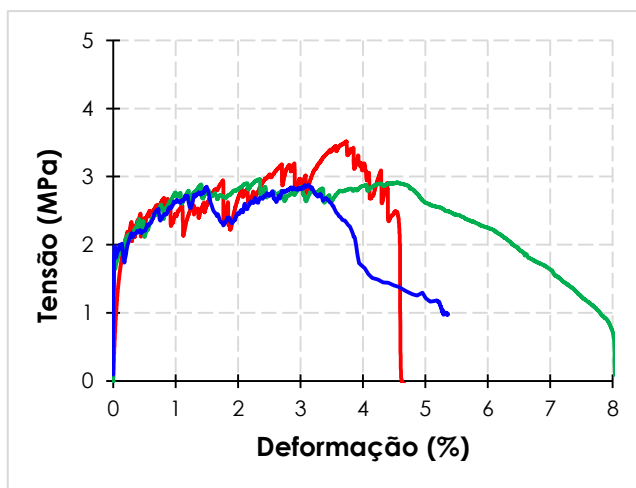


Fonte: própria do autor

4 RESULTADOS

A partir da realização do ensaio de espalhamento (*flow table*), chegou-se a um espalhamento de 235mm, que está de acordo com valores obtidos na literatura (Oliveira, 2015). Nos ensaios de compressão, foi possível obter uma resistência de 39,4MPa (desvio padrão = 1,8MPa). A Figura 5, a seguir, mostra os resultados do ensaio de tração direta.

Figura 5 – Resultados do ensaio de tração direta



Fonte: própria do autor

A tabela 4, a seguir, mostra de forma resumida os resultados obtidos para o material em questão. Para a tração direta, foi possível obter uma resistência de primeira fissura de 2,01MPa e um ganho de resistência pós-fissuração, chegando-se a uma resistência última de 3,12MPa, um comportamento que se diferencia de concretos fibrosos convencionais, que apresentam queda de resistência após a fissuração.

Tabela 4 – Resultados Obtidos

Propriedade	Valor Obtido	Desvio Padrão	Unidade
Resistência a compressão	39,4 (1,8)	1,8	MPa
Resistência de primeira fissura	2,01	0,29	MPa
Resistência última	3,12	0,35	MPa
Deformação Última	3,96	0,63	%
Flow Table	235	-	mm

Conforme apresentado por Li (2008), a elevada capacidade de deformação do material, com ganho de resistência pós-fissuração está associada ao fenômeno conhecido como “ponte entre fissuras”, onde as fibras passam a realizar a transferência de tensões na região das fissuras, permitindo ganho de resistência, com elevada capacidade de deformação.

5 CONCLUSÕES

A partir dos ensaios mecânicos realizados, fica evidente que os compósitos cimentícios do tipo SHCC reforçados por fibras de PVA possuem um comportamento mecânico muito superior a matrizes a base de cimento convencionais, uma vez que este apresenta ganho de resistência após o surgimento da primeira fissura, com manutenção da resistência até elevados valores de deformação.

A partir da revisão bibliográfica realizada, foi possível concluir que a aplicação do material é viável para a realização de reparos e reforços estruturais, uma vez que o material atinge deformações e resistências últimas muito superiores ao concreto convencional. Além disso, ficou evidente que o mesmo possui um custo inicial altamente elevado, em grande parte devido ao custo das fibras poliméricas, mas que no longo prazo pode apresentar benefícios no que diz respeito a aumento à redução do número de manutenções necessárias, reduzindo o custo final da estrutura e o consumo total de energia, sendo um material promissor para melhoria da durabilidade das edificações.

REFERÊNCIAS

- BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre Reinforced Cementitious Composites. , n. Taylor & Francis, 2007.
- CUROSU, I.; LIEBSCHER, M.; MECHTCHERINE, V.; BELLMANN, C.; MICHEL, S. Tensile behavior of high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC) made with high-performance polyethylene, aramid and PBO fibers.

- Cement and Concrete Research**, v. 98, n. December 2016, p. 71–81, 2017. Elsevier.
- DE OLIVEIRA, A. M.; Fluência a Altas Temperaturas, Aderência Fibra-Matriz e Comportamento Mecânico Sob Ações Higrotérmicas de Compósitos Cimentícios Reforçados Com Fibras de PVA. , , n. COPPE/UFRJ, 2015.
- HUSSEIN, M.; KUNIEDA, M.; NAKAMURA, H. Strength and ductility of RC beams strengthened with steel-reinforced strain hardening cementitious composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 9, p. 1061–1066, 2012. Elsevier Ltd.
- JUN, P.; MECHTCHERINE, V. Behaviour of strain-hardening cement-based composites (SHCC) under monotonic and cyclic tensile loading: Part 1 - Experimental investigations. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 10, p. 801–809, 2010. Elsevier Ltd.
- KAMAL, A.; KUNIEDA, M.; UEDA, N.; NAKAMURA, H. Evaluation of crack opening performance of a repair material with strain hardening behavior. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 10, p. 863–871, 2008. Elsevier Ltd.
- KENDALL, A.; KEOLEIAN, G. A.; LEPECH, M. D. Materials design for sustainability through life cycle modeling of engineered cementitious composites. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 41, n. 6, p. 1117–1131, 2008.
- KEOLEIAN, G. A.; KENDALL, A.; DETTLING, J. E.; et al. Life cycle modeling of concrete bridge design: Comparison of engineered cementitious composite link slabs and conventional steel expansion joints. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 11, n. 1, p. 51–60, 2005.
- KHALIL, A. E. H.; ETMAN, E.; ATTA, A.; ESSAM, M. Behavior of RC beams strengthened with strain hardening cementitious composites (SHCKHALIL, A. E. H.; ETMAN, E.; ATTA, A.; ESSAM, M. Behavior of RC beams strengthened with strain hardening cementitious composites (SHCC) subjected to monotonic and repeated. **Engineering Structures**, v. 140, p. 151–163, 2017. Elsevier Ltd.
- LI, V. C. Reflection on the research and developmnet of ECC. **Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC) - Application and Evaluation**, 2002.
- LI, V. C. On Engineered Cementitious Composites (ECC) A Review of the Material and Its Applications. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 3, p. 215–230, 2003.
- LI, V. C. Durability of mechanically loaded engineered cementitious composites under highly alkaline environments. , v. 30, p. 72–81, 2008a.
- LI, V. C. Engineered cementitious composites (ECC) material, structural, and durability performance. , , n. June 2011, 2008b.
- LI, V. C.; MISHRA, D. K.; WU, H. C. Matrix design for pseudo-strain-hardening fibre reinforced cementitious composites. **Materials and Structures**, v. 28, n. 10, p. 586–595, 1995.
- LI, V.; WU, H. C.; MAALEJ, M.; MISHRA, D. K.; HASHIDA, T. Tensile Behavior of Engineered Cementitious Composites with Discontinuous Random Steel Fibers. , v. 79, n. January, p. 74–78, 1984.
- LIM, Y. M.; LIB, V. C. Durable Repair of Aged Infrastructures Using Trapping

- Mechanism of Engineered Cementitious Composites. , v. 19, p. 373–385, 1997.
- PAUL, S. C.; PIETER, G.; GREEFF, A. Corrosion Deterioration of Steel in Cracked SHCC. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 11, n. 3, p. 557–572, 2017. Springer Netherlands.
- PETEK GURSEL, A.; MASANET, E.; HORVATH, A.; STADEL, A. Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. **Cement and Concrete Composites**, v. 51, p. 38–48, 2014.
- SAHMARAN, M.; LI, M.; LI, V. C. Transport Properties of Engineered Cementitious Composites Under Chloride Transport Properties of Engineered Cementitious Composites under Chloride Exposure. , , n. June, 2011.
- ZHANG, H.; KEOLEIAN, G. A.; LEPECH, M. D. An integrated life cycle assessment and life cycle analysis model for pavement overlay systems. **Life-Cycle Civil Engineering - Proceedings of the 1st International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, IALCCE '08**, , n. June 2008, p. 907–912, 2008.
- ZIJL, G. P. A. G. VAN; WITTMANN, F. H. On Durability of SHCC. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 8, n. 3, p. 261–271, 2010.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) –Código de Financiamento 001, pelo financiamento do trabalho realizado.