



Viabilidade da Aplicação de Compósitos do Tipo SHCC para Melhoria da Durabilidade de Estruturas de Concreto

TINOCO, Matheus¹, SILVA, Flávio²

¹ Mestrando em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, PUC-Rio.

² Doutor em Engenharia Civil, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, PUC-Rio.

Informações do Artigo

Histórico:

Recebimento: 26 Nov 2019

Revisão: 09 Dez 2019

Aprovação: 17 Dez 2019

Palavras-chave:

SHCC

Fibras Poliméricas

Reparos Estruturais.

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.

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 [1]. 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 [2].

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 [3], as quais permitem que o material mantenha ou aumente sua resistência mesmo após o surgimento da primeira fissura.

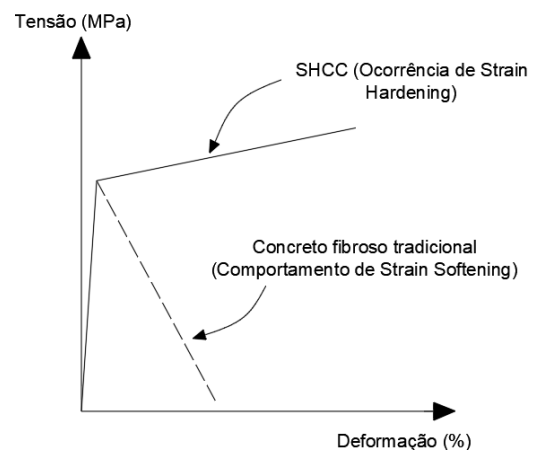
Outra característica importante deste material é a ocorrência de múltiplas fissuras com abertura controlada, menores que $100\mu\text{m}$ [4], o que pode impedir ou reduzir a penetração de agentes agressivos, contribuindo para melhoria da durabilidade, tornando promissor o seu uso para realização de 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. [5] 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, Kasparkiewicz [6] 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 [7], 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 micromecânica (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 [9]. 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



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

(ANEXO A), mostra as características das principais fibras utilizadas.

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 [10].

Paul et al. [11] 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, fez 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. [12] 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 [13] 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 [14] 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. [15] 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. [16] 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 [17], 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 [18]. 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. [19] 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. [20] 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. [21] 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.

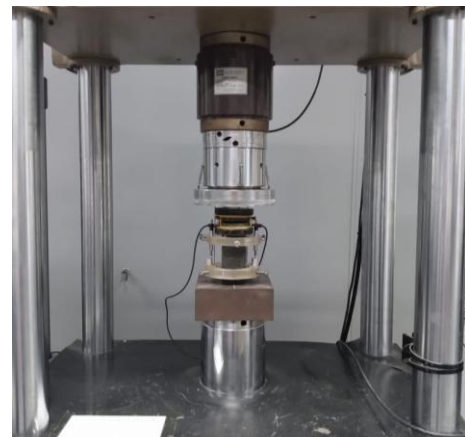
3. Metodologia: Desenvolvimento de SHCC com Materiais Locais

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 [22], o qual é mostrado na tabela 2 (ANEXO A). Em seguida, foram realizados ensaios de tração direta para avaliar o comportamento mecânico de um compósito

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 3.

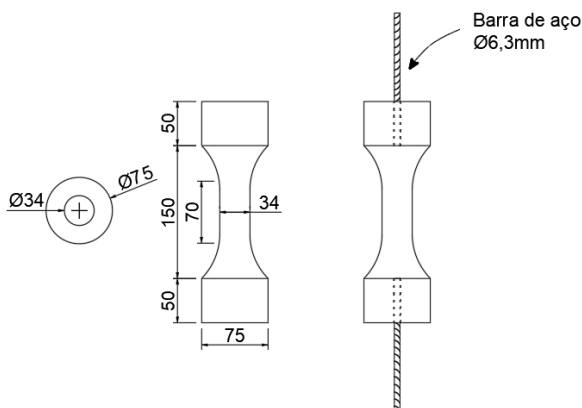
Figura 3 – Arranjo do ensaio de compressão



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 4. As amostras retornaram para a sala com temperatura controlada até o 14º dia, quando foram ensaiadas.

Figura 4 – 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 5.

Figura 5 – Arranjo do ensaio de tração direta

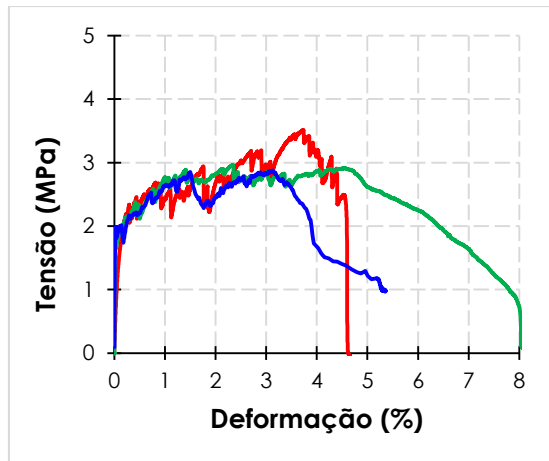


Fonte: própria do autor

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 6, a seguir, mostra os resultados do ensaio de tração direta. A tabela 3 (ANEXO A) 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.

Figura 6 – Resultados do ensaio de tração direta



Fonte: própria do autor

Conforme apresentado por Li [23], 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.

6. Referências

- [1] PETEK GURSEL A., MASANET E., HORVATH A., STADEL A. Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, 2014.
- [2] BENTUR A., MINDESS S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. Taylor & Francis, 2007.
- [3] 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*, 2017.
- [4] LI V.C. On Engineered Cementitious Composites (ECC) A Review of the Material and Its Applications. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Volume 1, 2003.
- [5] ALI M.A., MAJUMDAR A.J., SINGH B. Properties of glass fibre cement - the effect of fibre length and content, *Journal of Materials Science*. Volume 10, 1975.
- [6] OLIVEIRA, A.M. Fluência a Altas Temperaturas, Aderência Fibra-Matriz e Comportamento Mecânico Sob Ações Higrotérmicas de Compósitos Cimentícios Reforçados Com Fibras de PVA. COPPE/UFRJ, 2015.
- [7] LANKARD D.R. Slurry infiltrated fiber

- ccrete (SIFCON): properties and applications. Materials Laboratory, Ohio, 1985.
- [8] LI V., WU H.C., MAALEJ M., MISHRA D.K., HASHIDA T., Tensile Behavior of Engineered Cementitious Composites with Discontinuous Random Steel Fibers, 1984.
- [9] LI V.C., MISHRA D.K., WU H.C. Matrix design for pseudo-strain-hardening fibre reinforced cementitious composites. Materials and Structures, 1995.
- [10] VAN ZIJL G.P.A.G., WITTMANN F.H. On Durability of SHCC, Journal of Advanced Concrete Technology, 2010.
- [11] PAUL S.C., PIETER G., GREEFF A., Corrosion Deterioration of Steel in Cracked SHCC, International Journal of Concrete Structures and Materials, 2017.
- [12] SAHMARAN M., LI M., LI V.C. Transport Properties of Engineered Cementitious Composites Under Chloride Transport Properties of Engineered Cementitious Composites under Chloride Exposure, 2011.
- [13] LI V.C., Durability of mechanically loaded engineered cementitious composites under highly alkaline environments, 2008.
- [14] LIM Y.M., LIB V.C., Durable Repair of Aged Infrastructures Using Trapping Mechanism of Engineered Cementitious Composites, 1997.
- [15] 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, 2008.
- [16] HUSSEIN M., KUNIEDA M., NAKAMURA H., Strength and ductility of RC beams strengthened with steel-reinforced strain hardening cementitious composites, Cement and Concrete Composites, 2012.
- [17] KHALIL 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 loads, Engineering Structures, 2017.
- [18] LI V.C., Reflection on the research and development of ECC, Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC) - Application and Evaluation, 2002.
- [19] 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, 2008.
- [20] KEOLEIAN G.A., KENDALL A., DETTLING J.E., SMITH V.M., CHANDLER R.F., LEPECH M.D., LI V.C. Life cycle modeling of concrete bridge design: Comparison of engineered cementitious composite link slabs and conventional steel expansion joints, Journal of Infrastructure Systems, 2005.
- [21] KENDALL A., KEOLEIAN G.A., LEPECH M.D. Materials design for sustainability through life cycle modeling of engineered cementitious composites, Materials and Structures, 2008.
- [22] 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, 2010.

- [23] LI V.C., Engineered cementitious composites (ECC) material, structural, and durability performance, 2008.

7. Anexos e Apêndices

ANEXO A

Tabela 1 – Fibras Utilizadas para produção do SHCC (Curosu et al., 2017)

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/cm^3)	1,26	0,97	1,39	1,56
Resistência (MPa)	1600	2500	3400	5800
Módulo de elast. (GPa)	40	80	74	270

Tabela 2 – Traço Utilizado na Mistura

Material	kg/m^3
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

Tabela 3 – 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	%
<i>Flow Table</i>	235	-	mm