



Anais do
62º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2020
Setembro / 2020



@ 2020 - IBRACON - ISSN 2175-8182

Estudo sobre o Reforço de Vigas de Concreto Armado Com Compósitos Cimentícios de Alta Ductilidade Utilizando Uma Abordagem Momento-Curvatura

Study on the Strengthening of Reinforced Concrete Beams with High-Ductility Cementitious Composites Using a Moment-Curvature Approach

Matheus Pimentel Tinoco (1); Flávio de Andrade Silva (2).

(1) *Mestre em Engenharia Civil/Estruturas, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, PUC-Rio.*

(2) *Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, PUC-Rio.*

Endereço para correspondência - tinocomatheus19@gmail.com.

Resumo

O presente trabalho avalia o efeito da aplicação de compósitos cimentícios de alta ductilidade do tipo SHCC (*Strain Hardening Cementitious Composites*) como reforços estruturais em vigas de concreto armado, utilizando uma abordagem analítica de diagramas momento-curvatura. O efeito da utilização de diferentes compósitos, produzidos com matrizes de resistência comum e alta resistência, e o efeito da utilização de diferentes espessuras de reforço foram avaliados. Os resultados mostraram que a técnica de reforço retarda as deformações na armadura de aço e promove considerável ganho de resistência às vigas, o qual é mantido mesmo para elevadas deflexões, atestando a viabilidade de se utilizar estes materiais para a realização de reforços. Os resultados também mostraram que o aumento na espessura da camada de reforço aumenta o momento resistido pelas vigas e que esse ganho de resistência é maior quando compósitos cimentícios de alta resistência são utilizados.

Palavra-Chave: SHCC; Fibras Poliméricas; Reforço Estrutural; Momento-Curvatura.

Abstract

This work evaluates the effect of using high ductility cementitious composites for structural strengthening of reinforced concrete beams using an analytical approach based on bending moment-curvature diagrams. The effect of using different SHCC mixtures and different thicknesses of the strengthening material were evaluated. The results showed that the technique reduces the strains in the steel reinforcement and promotes a considerable gain of strength to the beams, which is maintained even for high deflections values, attesting the viability of using this type of composite for structural strengthening. The results also showed that the moment resisted by the beams increases when the thickness of the strengthening layer is increased and that this gain of strength is higher when high- strength composites are used.

Keywords: SHCC; synthetic fibers; structural strengthening; moment-curvature diagrams.

1 Introdução

O concreto é um material de construção amplamente utilizado, devido a diversas vantagens que possui frente a outros materiais estruturais, como facilidade de transporte, capacidade de ser moldado nos mais variados formatos, durabilidade e custo relativamente baixo (GURSEL et al., 2014). O material, entretanto, possui a desvantagem de apresentar baixa resistência e comportamento frágil quando submetido a esforços de tração, sendo suscetível ao desenvolvimento de fissuras geradas por retração e por solicitações mecânicas, mesmo para baixas deformações impostas.

Atualmente, a utilização de fibras dispersas aleatoriamente na matriz vem ganhando cada vez mais espaço como uma forma de reforço alternativa às armaduras de aço. Essas fibras podem atuar no sentido de controlar a abertura de fissuras e podem ser utilizadas para substituir parcialmente as armaduras de aço, além de contribuir para melhoria da durabilidade dos elementos estruturais. Por utilizarem reforços discretos, os materiais reforçados por fibras possuem 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. (BENTUR e MINDESS, 2007)

Atualmente, os concretos fibrosos tradicionais se caracterizam pela utilização de baixos volumes de fibras, geralmente entre 0,1% e 0,5%, sendo as mais utilizadas as fibras de aço e polipropileno. O baixo volume de fibras faz com que estes materiais apresentem um comportamento mecânico conhecido como “amolecimento” ou *strain-softening*, caracterizado por queda de resistência pós-fissuração, como mostrado na Figura 1, o que implica em baixa ductilidade e tenacidade.

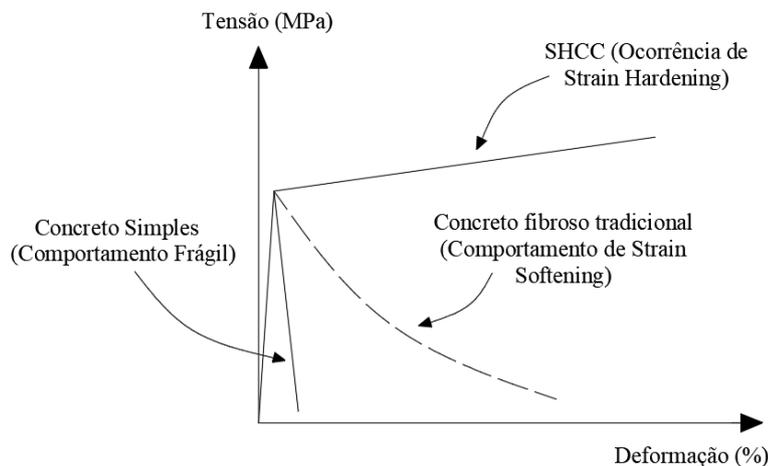


Figura 1 – Comportamento Mecânico de Concretos Reforçados por Fibras.

Dentro desse contexto, uma nova classe de materiais cimentícios fibrosos com ganho de resistência pós-fissuração, conhecida como SHCC (*Strain Hardening Cementitious Composites*), vem sendo desenvolvida para a aplicação em situações que exijam maior ductilidade, como no caso de terremotos, impacto e explosões (CUROSU et al., 2017). Os SHCC são materiais de matriz cimentícia geralmente reforçados por fibras poliméricas, como PVA e Polietileno, caracterizados por elevada ductilidade e tenacidade com manutenção ou ganho de resistência após a formação da primeira fissura, o que está

associado à formação de múltiplas fissuras de abertura controlada quando os materiais são submetidos a esforços de tração. Devido a este comportamento diferenciado, os compósitos SHCC podem ser aplicados para a realização de reparos e reforços estruturais em elementos de concreto armado, promovendo ganho de resistência na zona tracionada e podendo manter a resistência adicional mesmo para elevadas deformações. Esta aplicação já foi estudada por diversos pesquisadores, entre eles LIM (1997), que estudou a viabilidade de aplicação de compósitos do tipo SHCC reforçados com fibras de PVA para como material de reforço estrutural mostrando que a presença de 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. Resultados semelhantes foram obtidos por HUSSEIN et al. (2012), que estudaram de maneira experimental a aplicação de SHCC de alta resistência reforçados por fibras de Polietileno e KHALIL et al. (2017), que estudaram a eficiência desses reforços para estruturas sujeitas a carregamentos cíclicos. 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. Apesar dos diversos estudos experimentais acerca do tema, faltam estudos teóricos que consigam modelar o comportamento mecânico de elementos estruturais reforçados pelo SHCC, o que pode ser utilizado posteriormente para o dimensionamento desse tipo de reforço. Nesse sentido, o presente trabalho visa estudar o efeito da aplicação de camadas de SHCC na zona tracionada de vigas de concreto armado, utilizando uma abordagem de diagramas momento-curvatura, avaliando o efeito da utilização de diferentes SHCC produzidos com matrizes de resistência comum e de alta resistência, utilizando fibras de PVA e Polietileno e o efeito da utilização de diferentes espessuras de reforço no comportamento estrutural das vigas.

2 Metodologia

2.1 Diagramas de Momento-Curvatura

A fim de avaliar a eficiência da aplicação de camadas de SHCC como reforço estrutural em vigas de concreto armado, foi adotada uma viga de referência de seção 120x150mm (base x altura) reforçada por duas barras longitudinais de diâmetro $\Phi 12,5\text{mm}$ de aço CA-50 e devidamente reforçada a cortante, adaptada de MONTEIRO et al. (2018). Para a viga de referência, foi utilizado um concreto com resistência característica igual a 30MPa. Foram adotadas quatro diferentes espessuras de reforço, aplicadas na região tracionada das vigas: 10mm, 20mm, 30mm e 40mm, como mostrado na Figura 2.

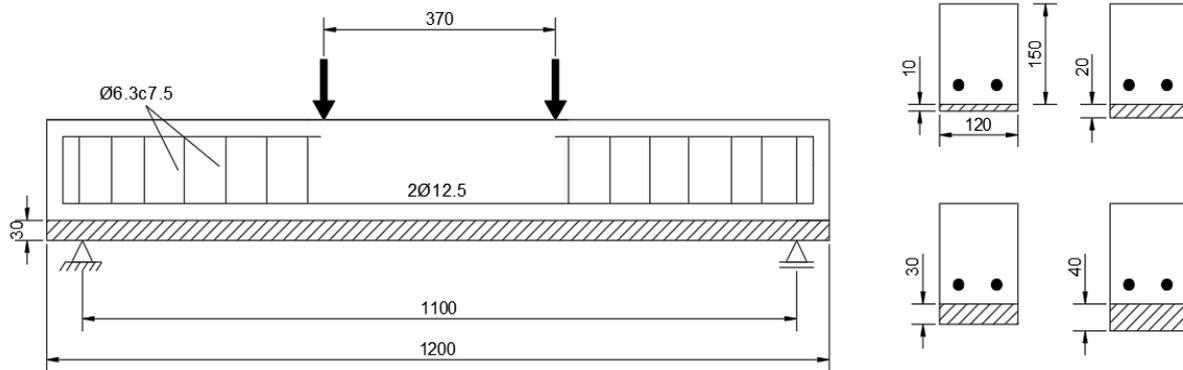


Figura 2 – Geometria Adotada para a Viga e Diferentes Reforços Utilizados.

Para estimar a capacidade resistente das vigas reforçadas com uma camada de SHCC, foi adotada uma abordagem analítica de diagramas momento-curvatura, que são gráficos que relacionam o momento fletor em uma dada seção da viga com a curvatura nesta seção. Considerando a hipótese de seções planas, o momento fletor pode ser calculado a partir da sequência de cálculo apresentada a seguir, de acordo com WIGHT e MACGREGOR (2009). Inicialmente, deve-se fixar uma curvatura Φ e arbitrar uma posição de linha neutra (x_{LN}), obtendo-se a distribuição de deformações na seção. Com as relações constitutivas do material (σ - ϵ), é possível obter a distribuição de tensões na seção. Em seguida, integram-se as tensões na seção transversal, através da Eq. 1. Para que a seção esteja em equilíbrio é necessário que a força resultante $F(x_{LN}, \Phi)$ seja igual a zero.

$$F(x_{LN}, \Phi) = \int_{h_1}^{h_2} \sigma_c(x) \cdot b \, dx + \sigma_s \cdot A_s + \int_0^{h_1} \sigma_{shcc}(x) \cdot b \, dx \quad (1)$$

Onde x_{LN} é a posição da linha neutra, b é a largura da viga, Φ é a curvatura, σ_c é a tensão no concreto, σ_s e A_s são a tensão e a área de aço, σ_{shcc} é a tensão no reforço de SHCC e h_1 é a espessura do reforço. Caso o equilíbrio de forças na seção seja atingido, momento fletor M na seção pode ser calculado a partir da Eq. 2, que permite obter o momento fletor correspondente a uma dada curvatura.

$$M(x_{LN}, \Phi) = \int_{h_1}^{h_2} \sigma_c(x) \cdot (x_{LN} - x) \cdot b \, dx + \sigma_s(x) \cdot A_s \cdot (x_{LN} - x_s) + \int_0^{h_1} \sigma_{shcc}(x) \cdot (x_{LN} - x) \cdot b \, dx \quad (2)$$

Caso o equilíbrio de forças não seja atingido, é necessário arbitrar uma nova posição de linha neutra. A sequência é repetida até que se atinja a deformação limite de algum dos materiais constituintes da seção. A sequência de cálculo utilizada para obtenção dos diagramas momento-curvatura é apresentada de forma resumida na Figura 3.

No presente trabalho, os cálculos foram realizados com auxílio de um programa desenvolvido em MAPLE (MAPLESOFT, 2017). Para as simulações, considerou-se adesão perfeita entre reforço e substrato.

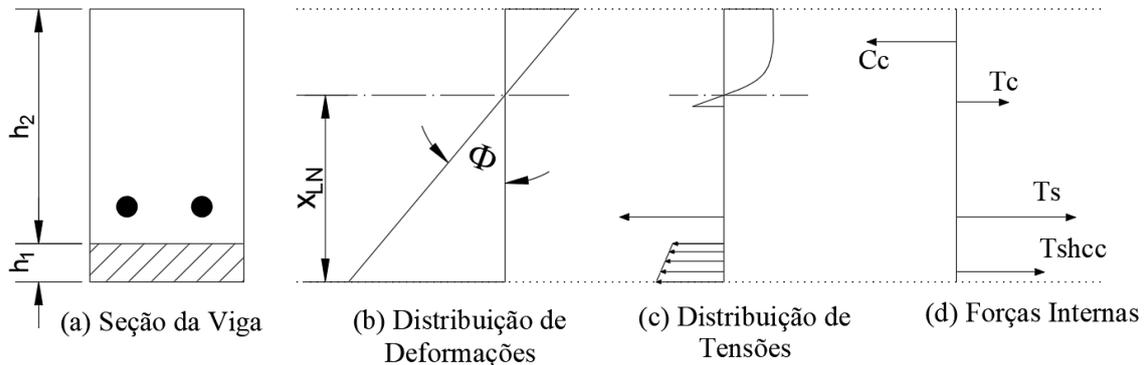


Figura 3 – Sequência de Cálculo para obtenção do Momento Fletor Correspondente a uma dada Curvatura.

2.2 Materiais Utilizados como Reforço

Para a obtenção dos diagramas de momento curvatura, é necessário conhecer as relações entre tensão e deformação dos materiais que compõem a viga (relações constitutivas). Para o concreto da viga foram adotados os diagramas tensão-deformação do item 8.2.10 da NBR6118/2014 (ABNT, 2014). Para o aço da armadura longitudinal foram adotados os diagramas do item 8.3 da mesma norma. No caso dos materiais de reforço, por se tratarem uma nova classe de material, não contemplada pela norma, a relação constitutiva à tração foi obtida a partir de ensaios experimentais de tração direta, realizados no laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio. Foram adotados dois tipos de SHCC, o primeiro de resistência comum e reforçado por fibras de PVA de 12mm de comprimento, chamado de M1PVA2.0 e o segundo um SHCC de alta resistência reforçado por fibras de Polietileno de 13mm, chamado de M2PE2.0. Os traços dos materiais utilizados são mostrados na Tabela 1, baseados nos traços utilizados por CUROSU et al. (2017). Foi utilizado cimento CPV-ARI da LafargeHolcim e areia com tamanho de partículas entre 0.075mm e 0.200mm.

Tabela 1 – Traços Utilizados [kg/m³].

| Matriz | Cimento | Cinza Volante | Sílica Ativa | Areia | Água | VMA | SP | Fibras (%) | |
|----------|---------|---------------|--------------|-------|------|-----|------|------------|-----|
| | | | | | | | | PVA | PE |
| M1PVA2.0 | 505 | 621 | - | 536 | 336 | 1,2 | 11,7 | 2 | - |
| M2PE2.0 | 1460 | - | 292 | 145 | 315 | - | 24,2 | - | 2,0 |

Para os ensaios, foram adotados corpos de prova no formato de haltere, cujas dimensões são mostradas na Figura 4-a. Uma visão geral dos ensaios realizados é mostrada na Figura 4-b. Foi ensaiado um corpo de prova para cada tipo de SHCC. Os ensaios foram realizados por controle de deslocamentos a uma taxa de 0.3mm/min.

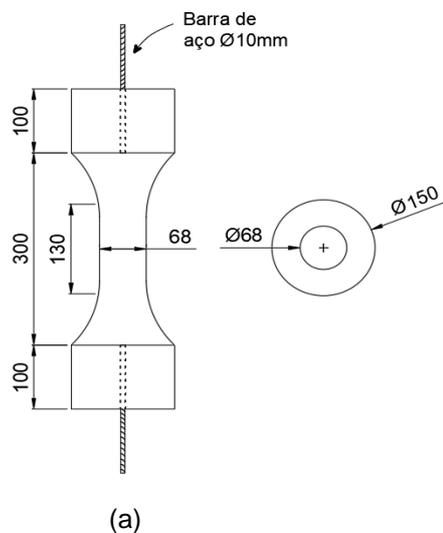


Figura 4 – Configuração Adotada para os Ensaios de Tração Direta.

As Figuras 5-a e 5-b, mostram os resultados obtidos nos ensaios de tração direta para os materiais M1PVA2.0 e M2PE2.0, respectivamente. A partir dos gráficos, é possível observar o mecanismo de múltipla fissuração com aumento de resistência após a fissuração da matriz, o que é proporcionado pelo elevado volume de fibras utilizadas.

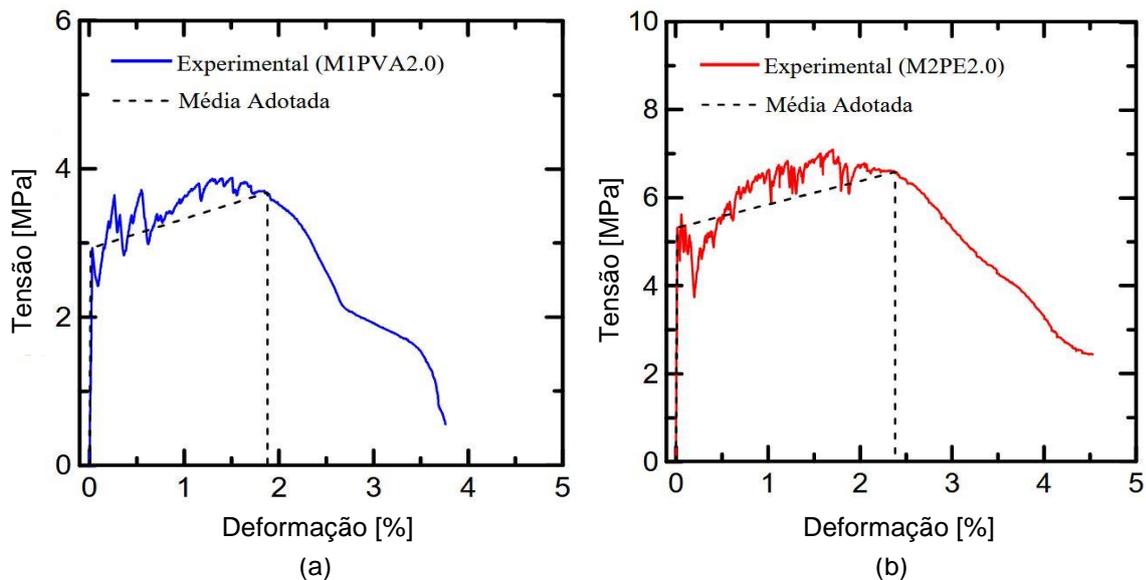


Figura 5 – Respostas Constitutivas dos Materiais à Tração Direta: (a) Compósito M1PVA2.0 e (b) M2PE2.0.

Nas Figuras 5-a e 5-b também são mostradas em linha pontilhada as simplificações adotadas para as relações constitutivas desses materiais, baseadas em relações constitutivas bilineares, as quais foram utilizadas nos cálculos analíticos dos diagramas de momento-curvatura. As relações constitutivas destes materiais podem ser expressas

através da Eq. 3, a seguir. A resistência à compressão foi desconsiderada por se tratar de um material aplicado na zona traciona das vigas.

$$\sigma_{shcc}(\varepsilon_{shcc}) = \begin{cases} 0, & se \varepsilon_{shcc} \leq 0 \\ E_1 \cdot \varepsilon_{shcc}, & se 0 < \varepsilon_{shcc} \leq \frac{\sigma_{pf}}{E_1} \\ E_2 \cdot (\varepsilon_{shcc} - \varepsilon_{pf}) + \sigma_{pf}, & se 0 < \varepsilon_{shcc} \leq \varepsilon_u \\ 0, & se \varepsilon_{shcc} > \varepsilon_u \end{cases} \quad (3)$$

Em que E_1 é o módulo de elasticidade do trecho pré-fissuração, E_2 é o módulo de elasticidade do trecho correspondente ao patamar de múltipla fissuração, σ_{pf} e ε_{pf} são a tensão e deformação de primeira fissura e σ_u e ε_u são a tensão e deformação últimas. Os valores destes parâmetros são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros Adotados.

| Mistura | E_1 (GPa) | E_2 (GPa) | σ_{pf} (MPa) | ε_{pf} (%) | σ_u (MPa) | ε_u (%) |
|----------|-------------|-------------|---------------------|------------------------|------------------|---------------------|
| M1PVA2.0 | 23,2 | 0,04 | 2,93 | 0,013 | 3,67 | 1,88 |
| M2PE2.0 | 39,5 | 0,05 | 5,31 | 0,013 | 6,45 | 2,43 |

3 Resultados e Discussões

As Figuras 6-a e 6-b mostram os diagramas momento-curvatura obtidos para as vigas reforçadas com os compósitos M1PVA2.0 e M2PE2.0, respectivamente, utilizando o software MAPLE. Os dados provenientes da simulação mostraram que para a configuração de viga adotada, todas as vigas romperam por flexão com escoamento da armadura de aço e esmagamento do concreto (Domínio de Ruptura 3). A partir dos gráficos, fica evidente que a utilização do reforço aumenta de forma considerável o momento fletor último das vigas, mesmo para elevados valores de curvatura. Esse comportamento é possível graças à capacidade do SHCC de manter sua resistência mesmo para elevados valores de deformação, o que permite que este continue contribuindo para a resistência à medida que a curvatura cresce sem se romper.

Também é possível observar que utilização do SHCC de alta resistência M2PE2.0 faz com que as vigas atinjam maiores valores de momento fletor se comparados ao SHCC de resistência comum M1PVA2.0. A utilização do compósito M2PE2.0 também possui um efeito maior sobre a rigidez pré-fissuração e sobre o momento de fissuração das vigas, como mostrado nas Figuras 7-a e 7-b, o que ocorre graças ao maior módulo de elasticidade e maior resistência desse compósito.

Observa-se, entretanto, que o reforço possui pouca influência do trecho pós-fissuração, uma vez que o próprio reforço já se encontra fissurado e em seu estágio de menor rigidez, caracterizado pelo módulo de elasticidade E_2 . Nesse trecho, a rigidez da viga é controlada principalmente pela armadura de aço, ainda em seu estágio elástico.

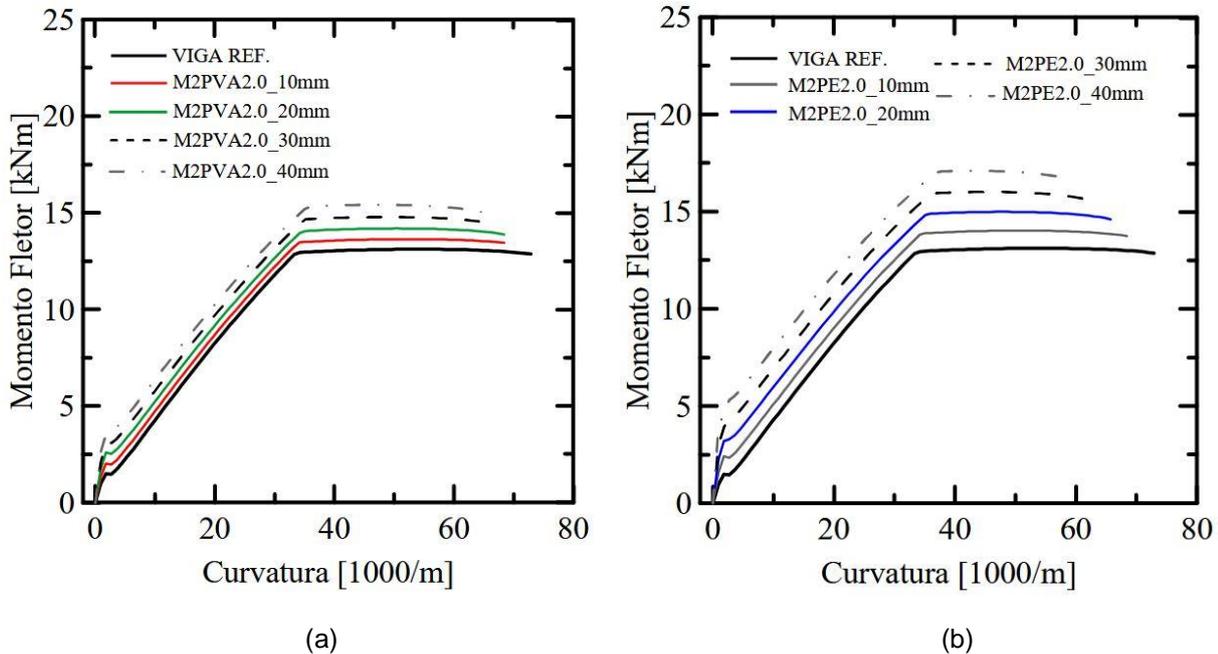


Figura 6 – Diagramas Momento-Curvatura para as Vigas Reforçadas com SHCC.

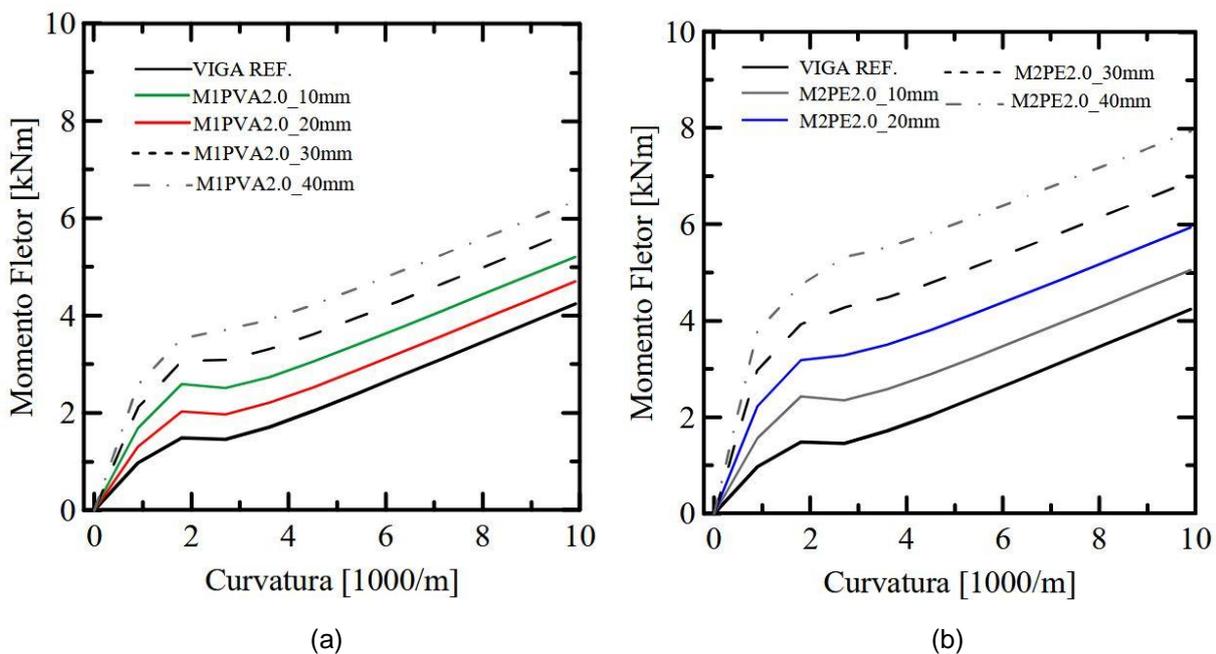


Figura 7 – Trecho Inicial dos Diagramas Momento-Curvatura.

A partir dos gráficos das Figuras 6 e 7 também é possível ver que o aumento na espessura do reforço aumenta os momentos de primeira fissura e os momentos máximos. O efeito da espessura do reforço é mostrado de forma resumida nas Figuras 8-a e 8-b.

Este aumento, entretanto, possui um efeito negativo sobre a ductilidade das vigas, tornando as rupturas mais bruscas, o que ocorre pelo fato de que o aumento na espessura do reforço torna a linha neutra mais baixa, fazendo com que a deformação última no concreto seja atingida com menores valores de curvatura.

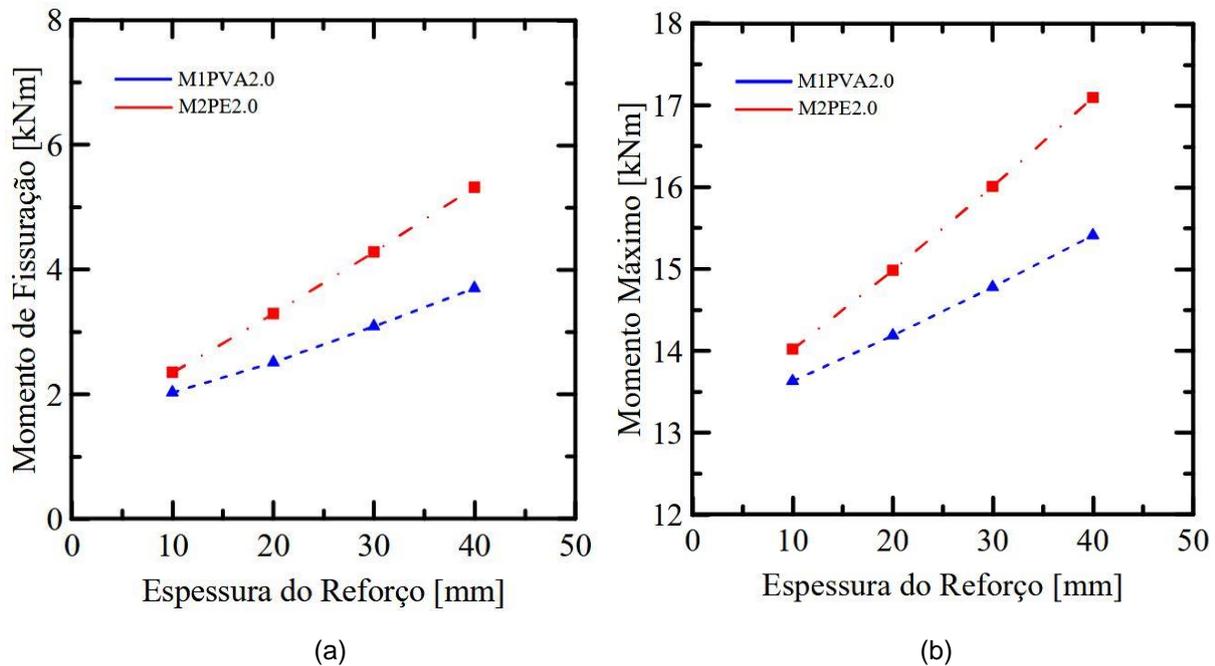


Figura 8 – Momento fletor em função da espessura da camada de reforço: (a) Momento de fissuração e (b) Momento Fletor Máximo.

As Figuras 9-a e 9-b mostram a evolução nas deformações na armadura de aço no meio do vão da viga em função da curvatura para as vigas reforçadas com os compósitos M1PVA2.0 e M2PE2.0, respectivamente. A partir desses gráficos, é possível observar que a utilização das camadas de reforço possui a capacidade de retardar a evolução das deformações na armadura de aço, o que fica evidente pela redução na inclinação das curvas à medida que a espessura do reforço aumenta. Esse comportamento é possível uma vez que os reforços conseguem resistir a parte dos esforços de tração, aliviando as tensões e conseqüentemente, as deformações no aço, o que mostra o potencial desses materiais até mesmo para substituir parte das armaduras.

A partir desses gráficos, também fica evidente que o aumento na espessura do reforço promove uma redução na deformação última no aço. Como dito anteriormente, esse comportamento ocorre principalmente pela redução da profundidade da linha neutra, que reduz as deformações no aço e promove um aumento nas deformações no concreto, tornando as rupturas mais bruscas.

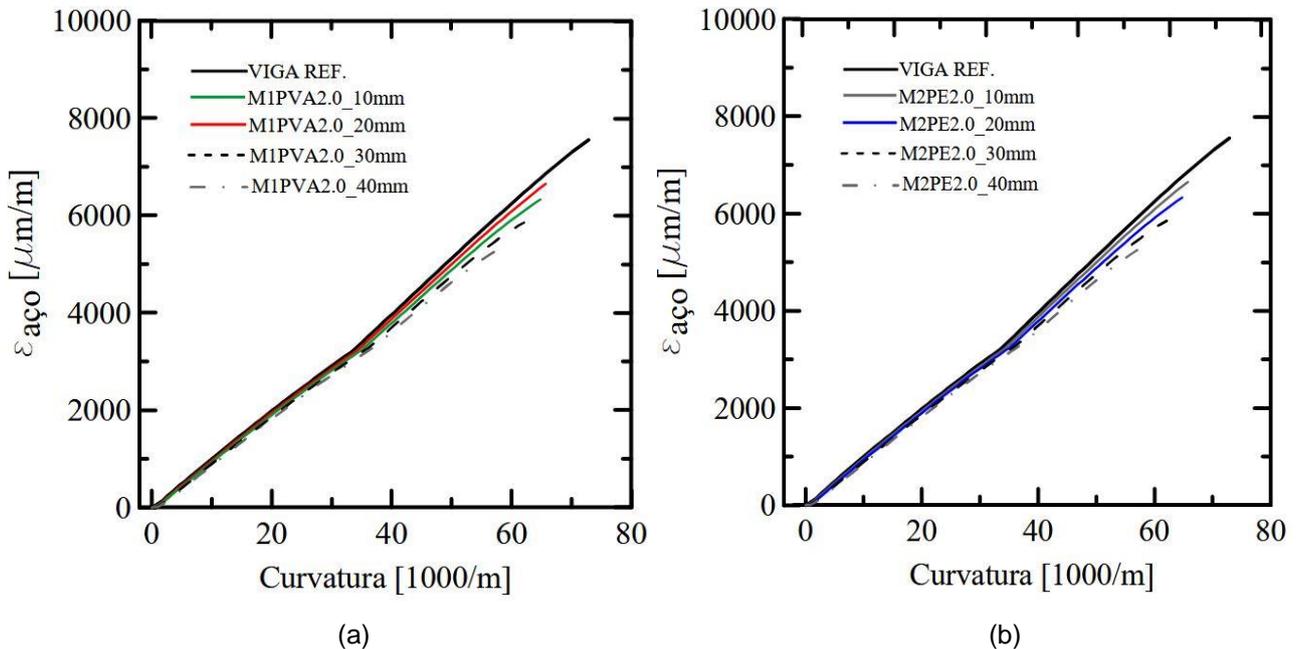


Figura 9 – Deformação na Armadura de Aço em Função da Curvatura.

4 Conclusões

A partir dos resultados obtidos, é possível concluir que a utilização de compósitos do tipo SHCC como material de reforço estrutural é viável, ainda que estes materiais sejam compostos apenas por matriz cimentícia e fibras discretas, sem nenhum tipo de reforço contínuo, o que é possível graças ao seu comportamento de alta performance que garante uma elevada resistência residual à tração mesmo para elevados valores de deformação. Também pode-se concluir que a abordagem analítica baseada na obtenção dos diagramas de momento-curvatura é uma forma eficaz para se avaliar o comportamento mecânico das vigas. Cabe ressaltar, entretanto, que os dados obtidos consideram a adesão perfeita entre viga e reforço, o que não é garantido no caso de uma aplicação prática. Os resultados obtidos mostram que a utilização do SHCC de alta resistência M2PE2.0 possui um efeito maior sobre os momentos de fissuração e momentos máximos das vigas se comparados às vigas reforçadas com o SHCC M1PVA2.0. Também é possível concluir que o aumento na espessura do reforço aumenta os momentos máximos, mas reduz a ductilidade das vigas, tornando as rupturas mais bruscas. Por último, cabe ressaltar que o presente trabalho consiste em uma análise teórica e que os resultados precisam ser validados de forma experimental para confirmar o comportamento.



Anais do
62º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2020
Setembro / 2020



@ 2020 - IBRACON - ISSN 2175-8182

5 Referências Bibliográficas

ABNT. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, ABNT, 2014.

BENTUR, A.; MINDESS, S., **Fibre Reinforced Cementitious Composites**, 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, p. 71–81, Elsevier, 2017.

CUROSU, I.; MECHTCHERINE, V.; FORNI, D.; CADONI, E., Performance of various strain-hardening cement-based composites (SHCC) subject to uniaxial impact tensile loading. **Cement and Concrete Research**, v. 102, p. 16–28, Elsevier, 2017.

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, Elsevier, 2014.

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, p. 1061–1066, Elsevier, 2012.

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**, p. 863–871, Elsevier, 2008.

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**, p. 151–163, Elsevier, 2017.

LIM, Y. M.; LIB, V. C., Durable Repair of Aged Infrastructures Using Trapping Mechanism of Engineered Cementitious Composites., v. 19, p. 373–385, 1997.

MAPLESOFT, Software Maple 2017, Waterloo, 2017.

MONTEIRO, V. M.; LIMA, L. R.; DE ANDRADE SILVA, F., On the mechanical behavior of polypropylene, steel and hybrid fiber reinforced self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 280–291, Elsevier, 2018.

WIGHT, J., MACGREGOR, J., **Reinforced Concrete: Mechanics and Design**, Prentice Hall, 2009.