

## Uso de materiais cimentícios suplementares (SCMs) em sistemas de concreto armado - Benefícios e limitações

R. G. Pillai<sup>1</sup> , R. Gettu<sup>1\*</sup> , M. Santhanam<sup>1</sup>

\* Autor de Contato: [gettu@iitm.ac.in](mailto:gettu@iitm.ac.in)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i2.477>

Recepção: 07/01/2020 | Aceitação: 08/04/2020 | Publicação: 30/04/2020

### RESUMO

Cerca de uma década de pesquisa realizada no IIT Madras em sistemas cimentícios mostrou que a substituição parcial do cimento Portland por materiais cimentícios suplementares (SCMs) traz benefícios e limitações. Os SCMs não afetam adversamente a resistência à compressão a longo prazo e a retração por secagem dos concretos, embora possa haver algum comprometimento na trabalhabilidade e na resistência contra fissuras por retração plástica. Através da avaliação da taxa de penetração de cloretos no concreto e considerando o patamar limite de cloreto no concreto, é evidente que o uso de SCMs poderia melhorar significativamente a vida útil sob ataque de cloretos, embora haja uma redução da resistência à carbonatação. Mais importante, os SCMs podem levar a uma redução significativa da pegada de carbono do concreto e, portanto, são essenciais para alcançar a sustentabilidade.

**Palavras-chave:** materiais cimentícios suplementares, argila calcificada calcária, propriedades mecânicas, microestrutura, durabilidade.

**Citar como:** Pillai, R. G., Gettu, R., Santhanam, M. (2020), “Uso de materiais cimentícios suplementares (SCMs) em sistemas de concreto armado - Benefícios e limitações”, Revista ALCONPAT, 10 (2), pp. 147 – 164, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i2.477>.

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India.

### Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2021, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2020.

## Use of supplementary cementitious materials (SCMs) in reinforced concrete systems – Benefits and limitations

### ABSTRACT

About a decade of research carried out at IIT Madras on cementitious systems has shown that the partial replacement of portland cement with supplementary cementitious materials (SCMs) has benefits as well as limitations. The SCMs do not adversely affect the long-term compressive strength and drying shrinkage of concretes, though there may be some compromise in workability and the resistance against plastic shrinkage cracking. Through the assessment of the chloride ingress rate in concrete and chloride threshold of steel, it is evident that the use of SCMs could significantly enhance the service life under chloride attack, though there is a reduction of the carbonation resistance. More importantly, SCMs can lead to significant reduction of the carbon footprint of concrete, and hence, are essential to achieve sustainability.

**Keywords:** supplementary cementitious materials, limestone calcined clay, mechanical properties, microstructure, durability.

## Uso de materiales cementicios suplementarios (SCM) en sistemas de concreto armado - Beneficios y limitaciones

### RESUMEN

Alrededor de una década de investigación realizada en IIT Madras sobre sistemas cementicios ha demostrado que el reemplazo parcial de cemento portland con materiales cementicios suplementarios (SCM) tiene beneficios y limitaciones. Los SCM no afectan negativamente la resistencia a la compresión a largo plazo y la contracción por secado de los hormigones, aunque puede haber algún compromiso en la trabajabilidad y la resistencia contra el agrietamiento por contracción plástica. A través de la evaluación de la tasa de ingreso de cloruro en el hormigón y el umbral de cloruro de acero, es evidente que el uso de SCM podría mejorar significativamente la vida útil bajo ataque de cloruro, aunque hay una reducción de la resistencia a la carbonatación. Más importante aún, los SCM pueden conducir a una reducción significativa de la huella de carbono del hormigón y, por lo tanto, son esenciales para lograr la sostenibilidad.

**Palabras clave:** materiales cementicios suplementarios, arcilla calcinada, caliza, propiedades mecánicas, microestructura, durabilidad.

## 1. INTRODUÇÃO

Desde a década de 1990, muitos pesquisadores importantes começaram a advogar o uso de materiais cimentícios suplementares (SCMs), como cinzas volantes (PFA) e escória de alto-forno granulada moída (GGBS) devido à sua capacidade de substituir parcialmente o cimento e até torná-lo um ligante mais eficaz no concreto (Dhir e Jones, 1994; Malhotra e Ramezani-pour, 1994; Mehta, 1994, 2001). Os benefícios que foram demonstrados inicialmente em estruturas de concreto armado incluíram (i) redução da pegada de carbono usando os SCMs que são resíduos, (ii) aprimoramento da resistência das interfaces de pasta agregado e concreto; (iii) diminuição da permeabilidade; (iv) aumento da resistividade elétrica; (v) redução do risco de reação álcali-sílica; (vi) redução da evolução do calor de hidratação; (vii) aumento da resistência a cloretos e sulfatos; e (viii) redução no custo do concreto. Muitas descobertas de pesquisas nas últimas décadas também mostraram que a incorporação de SCMs, com uma diminuição simultânea na quantidade comum de clínquer Portland no concreto, é talvez o caminho mais viável para a sustentabilidade, especialmente quando uma vida útil longa e livre de corrosão é esperada. Isso é proporcionado

principalmente pela durabilidade aprimorada, pegada de carbono reduzida e menor demanda de matéria-prima - tudo sem sacrificar a resistência (Chatterjee, 2018; Scrivener et al., 2018). Além disso, o uso de SCMs pode aumentar a relação entre a resistência à tração ou à flexão e a resistência à compressão do concreto.

Em relação à resistência à corrosão, o uso de SCMs pode aumentar tremendamente a resistência à entrada de cloretos e o aumento da resistividade elétrica do concreto pode reduzir a taxa de corrosão da armadura. No entanto, a simples substituição, em massa, de cimento por um SCM sem nenhuma modificação apropriada no traço e/ou nos processos de mistura e lançamento do concreto pode levar a algumas limitações. Isso inclui (i) o maior potencial de fissuras por retração plástica (devido ao maior teor de pasta, menor exsudação e menor ganho inicial de resistência), (ii) evolução mais lenta da resistência (devido à hidratação mais lenta), (iii) lixiviação de metais pesados, (iv) tixotropia indesejada, (v) menor dureza superficial, (vi) menor limiar de cloreto e (vii) carbonatação mais rápida (devido à menor quantidade de reserva alcalina). Essas questões suscitaram preocupações sobre os problemas que poderiam ocorrer se os materiais e projetos estruturais não forem realizados adequadamente. Atualmente, mais de 75% do cimento disponível na Índia é produzido misturando clínquer moído ou intercalando o clínquer Portland comum com PFA, GGBS, calcário, argila calcinada ou outros SCMs. Além disso, espera-se que a quantidade de clínquer diminua ainda mais nos próximos anos - principalmente devido às vantagens associadas à longa lista de propriedades de engenharia e àquelas associadas à economia e às mudanças climáticas. Portanto, é importante que os benefícios do uso dos SCMs sejam enfatizados adequadamente, juntamente com as limitações e medidas para sua mitigação.

Pesquisadores do IIT Madras trabalharam em vários projetos relacionados ao comportamento e propriedades de sistemas cimentícios com SCMs e estudaram sua trabalhabilidade, propriedades mecânicas, estabilidade dimensional, durabilidade e resistência à corrosão, entre outros aspectos. Esses estudos aprimoraram o conhecimento sobre o desempenho a curto e longo prazo de concretos com ligantes misturados, bem como a confiança para orientar suas aplicações nos contextos indiano e outros. As principais aplicações de SCMs em escala real que resultaram dessa experiência incluem a construção, nos últimos 15 anos, de vários edifícios de concreto armado, no campus IIT Madras, com uma área acumulada de cerca de 126.000 m<sup>2</sup> com concreto contendo cinzas volantes e trechos de estradas de concreto armado com fibra de mais de 1 km de comprimento, com altos volumes de cinzas volantes (ver Fig. 1a). Além disso, o complexo recentemente concluído de quatro edifícios comerciais de 10 andares (na Fase II do IIT Madras Research Park), com cerca de 80.000 m<sup>2</sup> de área construída, utilizou o GGBS nas fachadas de concreto aparente normal e autocompactável (ver Fig. 1b). As seções restantes deste artigo fornecem uma prévia dos resultados dos projetos de pesquisa relevantes conduzidos pelos autores e seu grupo de pesquisa em vários SCMs, como cinzas volantes, escórias e argila calcária.



(a)



(b)

Figura 1. Pavimento de FRC no campus do IIT Madras e (b) o prédio da SCC no IIT Madras Research.

## 2. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

A presença de SCMs pode aumentar a demanda de superplastificante para alcançar o espalhamento ou trabalhabilidade exigidos. Eles também poderiam afetar a evolução das várias características reológicas em função do tempo. Conseqüentemente, as respostas de espalhamento do sistema de aglutinante misturado difeririam significativamente de um sistema de cimento Portland comum (OPC) com a mesma proporção de aglutinante e água (w/b), dependendo principalmente da distribuição de tamanho de partícula e forma de partícula dos SCMs. Um método simples, como o ensaio de Cone de Marsh, tem sido amplamente utilizado para avaliar as variações no comportamento de pastas de cimento com vários superplastificantes e SCMs (Jayasree e Gettu, 2008, 2012; Jayasree et al., 2011; John e Gettu, 2014). A Fig. 2 mostra o tempo de espalhamento (em escala logarítmica) versus a dosagem de superplastificante / aglutinante para pastas com (i) OPC, (ii) OPC com substituição de 30% da cinza volante (ie, FA30) e (iii) argila calcinada com calcário pastas de cimento (LC3); todos com w/b = 0,40 e um superplastificante baseado em PCE (Nair, 2018). Os tempos de espalhamento correspondentes à dosagem de saturação dos superplastificantes (indicados por linhas verticais na Fig. 2b) para as pastas com pastas FA30 e LC3 são superiores aos da pasta OPC. Esses resultados mostram que as argamassas e concretos feitos com sistemas de cinzas volantes e argila calcária exibem diferenças na resposta do espalhamento e na trabalhabilidade (Jayasree e Gettu, 2010; Nair 2018). No entanto, esses desafios podem ser atenuados com as correções apropriadas na proporção da mistura - isto é, ajustando o teor de pasta, superplastificante e água.

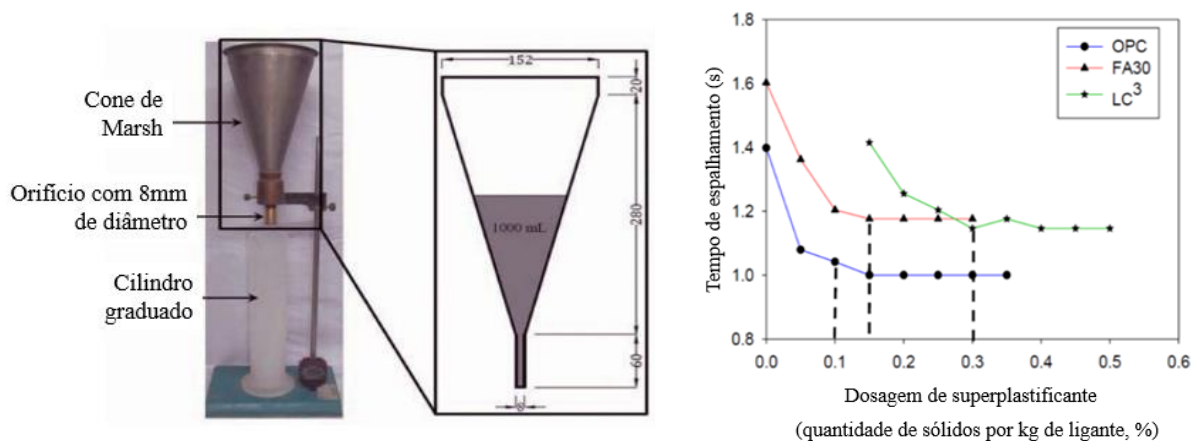


Figura 2. Configuração do ensaio do cone de Marsh e curva do tempo de espalhamento (Nair, 2018; Mohan, 2019)

O aumento da coesão da pasta devido à maior finura dos SCMs reduz o aumento da água de exsudação. Isso geralmente é benéfico porque a exsudação produz defeitos no concreto, normalmente nas interfaces entre os agregados graúdos ou as barras de aço da armadura e a pasta. No entanto, a ausência de água de exsudação leva à evaporação da água da superfície do concreto quando é submetida à secagem, resultando em retração plástica. Prevenir fissuras por retração plástica é um grande desafio em muitos canteiros de obras - embora a cobertura / cura do concreto seja geralmente praticada. Sirajuddin e Gettu (2018) estudaram a suscetibilidade à fissuração durante as primeiras horas após o lançamento do concreto usando o ensaio de retração plástica restrito (ASTM C1579, 2013) e descobriram que a substituição parcial do OPC por SCMs pode aumentar a tendência para a fissuração por retração plástica no concreto, especialmente quando os níveis de substituição são altos. Isso é atribuído à significativa redução da reposição de umidade na superfície submetida à secagem, levando a tensões capilares mais altas.

Se o ganho de resistência for lento durante as primeiras horas, as tensões de tração induzidas devido

à perda de umidade podem ser maiores que a resistência à tração do concreto - levando à fissuração do concreto durante as primeiras horas. Observou-se que 15% de substituição por cinzas volantes e escórias aumentaram a área de fissuras em cerca de 20 e 100%, respectivamente. Na substituição de 30% por cinzas volantes e escórias, a área de fissuras aumentou cerca de 40% e quatro vezes, respectivamente. Outros resultados podem ser vistos na Tabela 1, onde OPC é o concreto de controle; FA15 e FA30 são concretos com 15 e 30% de substituição com cinzas volantes, respectivamente; e SG15 e SG30 são concretos com 15 e 30% de substituição com escória (Sirajuddin e Gettu, 2018). Este estudo sugere fortemente que a cura deve ser iniciada mais cedo em argamassas e concretos com SCMs e/ou medidas de mitigação apropriadas devem ser adotadas, como a incorporação de cerca de 1 kg/m<sup>3</sup> de fibras curtas de polipropileno ou aditivos redutores de retração no concreto.

Tabela 1. Dados de ensaios para o potencial de fissuração por retração plástica

ID do traço	Tempo de iniciação da fissuração (min)	Parâmetros da fissuração				% de aumento na área de fissuração	% de aumento na abertura média
		Área de fissuração (mm <sup>2</sup> )	Comprimento da fissura (mm)	Abertura máxima da fissura (mm)	Abertura média da fissura (mm)		
OPC	207	97	263	0.68	0.37	-	-
FA15	180	121	303	0.93	0.40	24	7
FA30	167	138	333	1.03	0.42	42	12
SG15	197	225	427	1.25	0.53	132	42
SG30	183	402	444	1.73	0.91	313	144

### 3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE

A resistência à compressão é provavelmente o parâmetro mais importante que influencia o desempenho estrutural dos sistemas de concreto. Assim, muitos pesquisadores investigaram o efeito dos SCMs na resistência à compressão do concreto. No entanto, ainda existem percepções e restrições negativas sobre o uso de SCMs para grandes projetos de infraestrutura, principalmente devido à falta de conhecimento das vantagens de tais materiais e às possíveis variações na qualidade e tipo de SCMs disponíveis de várias fontes. Para resolver essas questões, dados experimentais foram obtidos para concretos que são normalmente usados no setor de construção indiano para quantificar a evolução de suas resistências (Dhandapani et al., 2018; Sakthivel, 2019; Sakthivel et al., 2019).

Embora a resistência à compressão precoce dos concretos com cimentos mistos possa ser menor que a do concreto OPC, a Fig. 3 mostra que os valores eventuais podem ser muito mais altos, especialmente para níveis de substituição de 15% de cinzas e escórias (ver Fig. 3a e b). A Fig. 3c mostra que misturas ternárias com 60% de OPC, 20% de escória e 20% de cinza volante podem exibir maiores resistências à compressão em idades posteriores do que os concretos sem SCMs. Isso indica a necessidade de planejar adequadamente o cronograma de cura e remoção de fôrmas ao usar concretos com SCMs. A Fig. 4 mostra que os concretos com vários SCMs exibem um módulo de elasticidade adequado, conforme previsto por várias normas e códigos. No total, pode-se concluir que o desempenho de concretos à base de SCM é bom em termos de propriedades mecânicas.

## 4. EVOLUÇÃO DA RETRAÇÃO

Ensaio em andamento no IIT Madras sobre a retração de concretos com ligantes misturados indicam que a incorporação de SCMs não altera significativamente a evolução da deformação por retração por secagem (consulte os dados de 4 anos na Fig. 5). Pode-se concluir que a substituição do OPC por  $\leq 30\%$  de escória e cinzas volantes, no mesmo p/b, não alterará as deformações finais devido à retração por secagem. Isso é de considerável relevância para as práticas de projeto, porque a maioria dos modelos de retração não fornece diretamente provisões para estimar a retração em concretos com SCMs. As descobertas também indicam que os modelos de retração calibrados para concretos OPC (ou seja, sem SCMs) podem ser usados para concretos com SCMs, com alguma recalibração, se necessário.

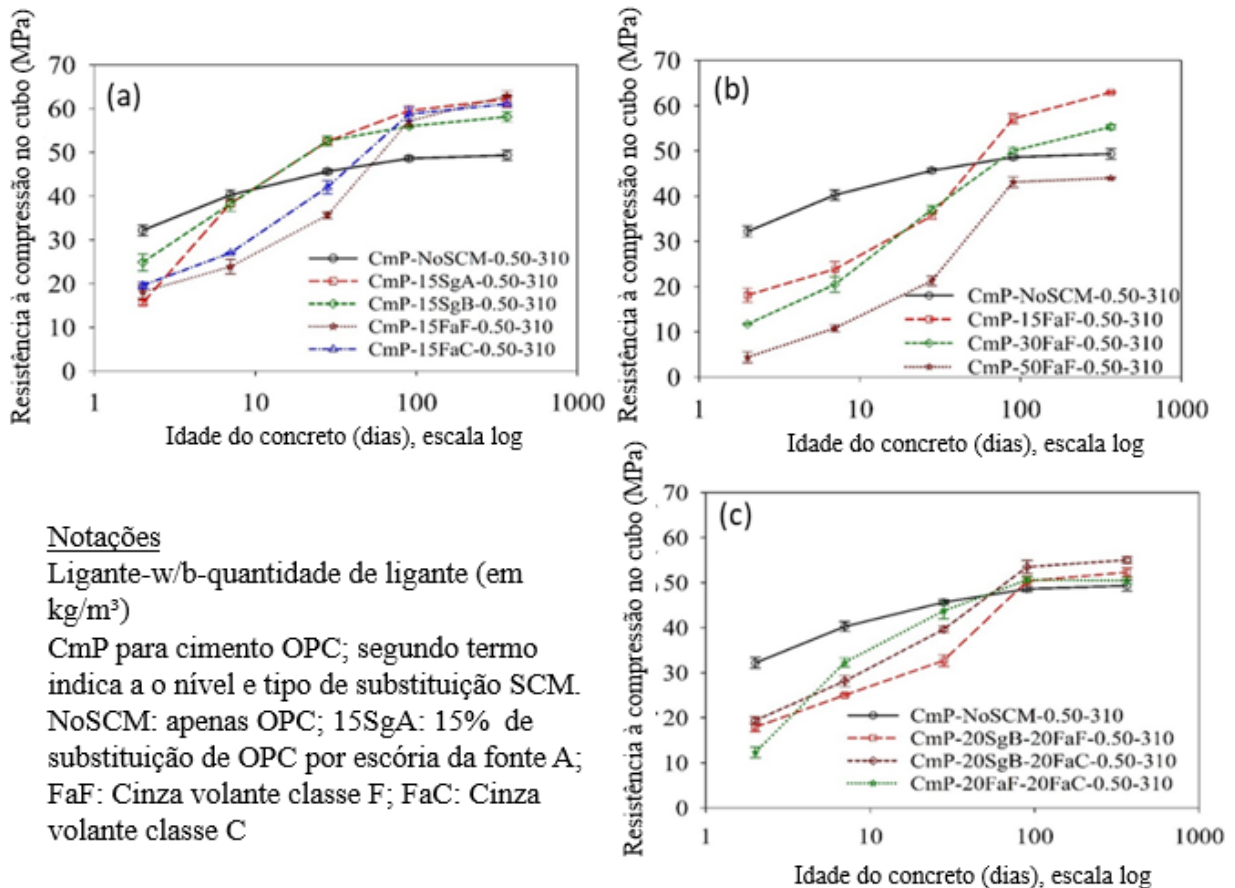


Figura 3. Evolução da resistência à compressão em concretos com cimentos mistos (Sakthivel et al., 2019)

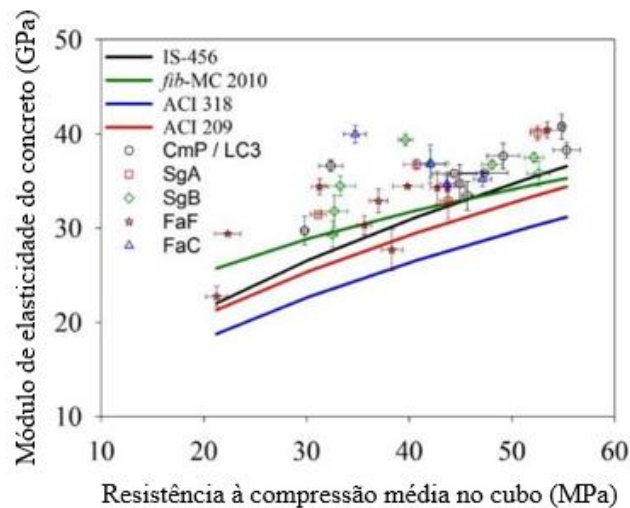


Figura 4. Módulo elástico de vários concretos com SCMs

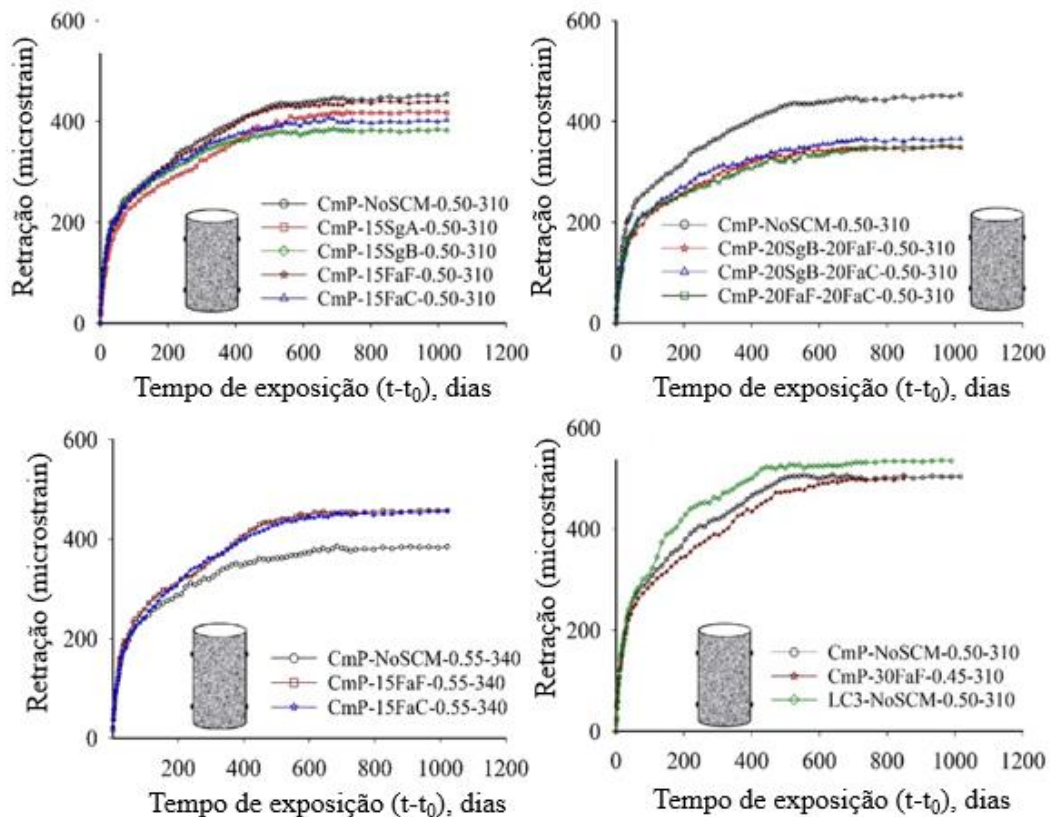


Figura 5. Retração por secagem em amostras de concreto com SCMs [Nomenclatura: Tipo de cimento - nível de substituição de SCM e tipo - w/b - quantidade total do ligante] (Sakthivel, 2019)

## 5. RIGIDEZ E RESISTÊNCIA À FISSURAÇÃO

Pavimentos de concreto estão sendo usados mais extensivamente em muitas partes do mundo, e esse tipo de aplicação é promissor para o uso de grandes volumes de cinzas volantes em concreto. No entanto, pode haver problemas (consulte a Fig. 6) de fissuras significativas devido à retração e à carga por fadiga. Tais problemas não podem ser resolvidos apenas aumentando a resistência à compressão do concreto e exigem um aprimoramento direcionado da tenacidade, que é o principal

parâmetro de influência no fornecimento de resistência à fissuras adequada. A incorporação de fibras (aço, polímero, metal amorfo e vidro) para melhorar a tenacidade foi estudada extensivamente no IIT Madras (veja a imagem à direita na Fig. 6), levando a diretrizes para ensaios e projeto (Nayar e Gettu, 2015, 2016, 2020). Trabalhos adicionais também mostraram que as fibras de aço podem impedir drasticamente a propagação de fissuras no concreto fissurado sob várias condições de carga (Jose et al., 2018; Stephen e Gettu, 2019a, 2019b).

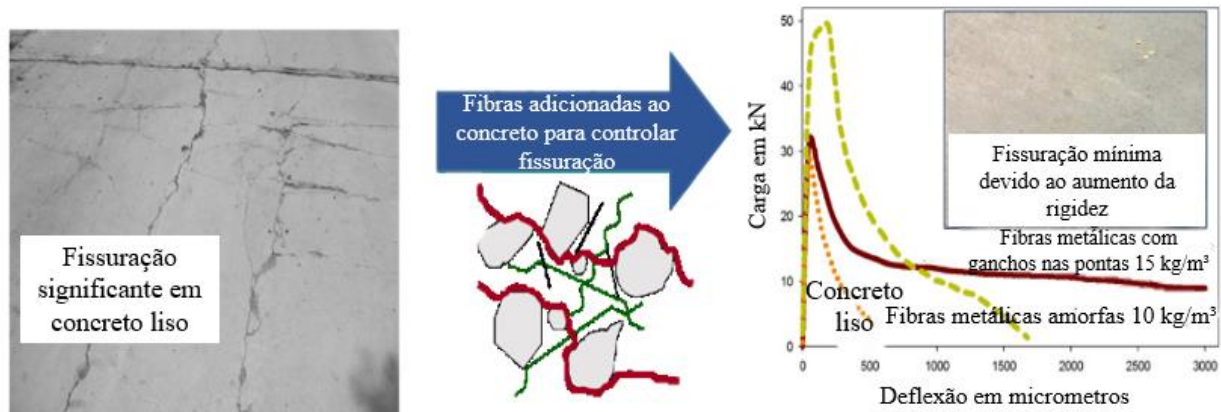


Figura 6. Papel do aço com ponta de gancho e fibras metálicas amorfas no concreto com cinzas volantes de alto volume para melhorar a resistência e reduzir a fissuração.

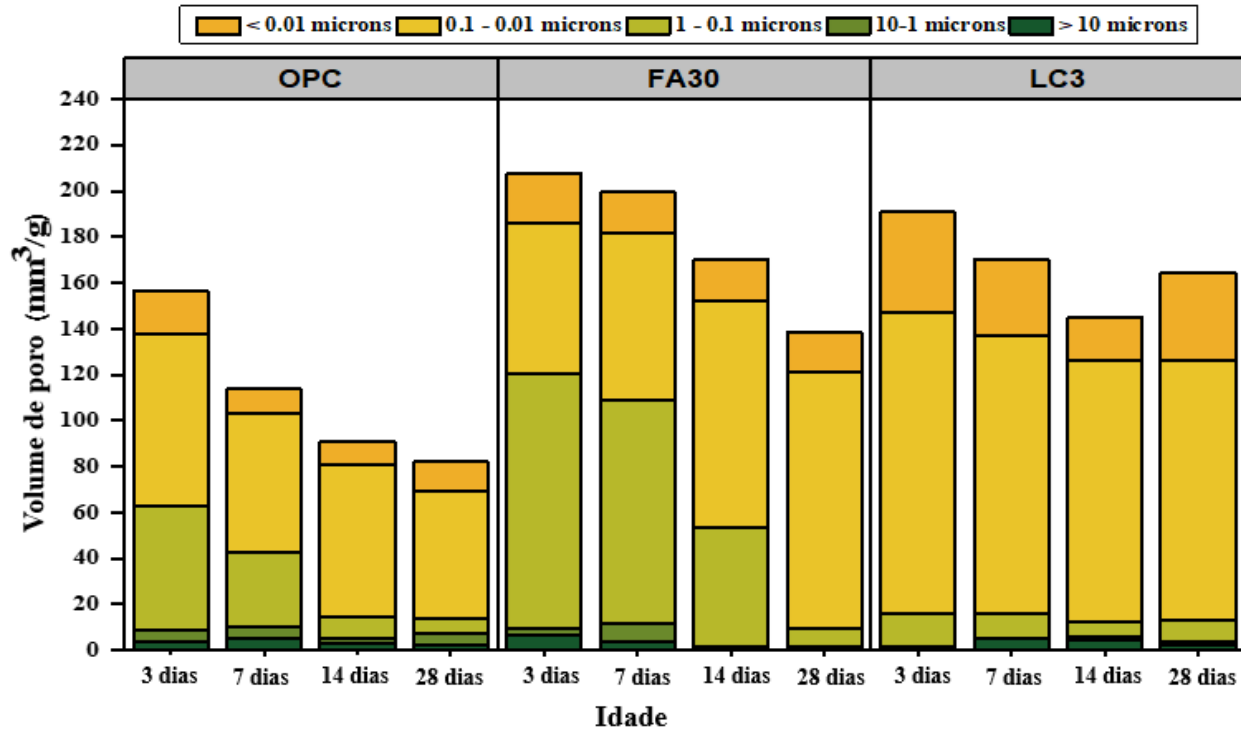
## 6. EVOLUÇÃO DA MICROSTRUTURA E PERMEABILIDADE

Os concretos com sistemas de ligantes misturados exibem uma estrutura de poros mais refinada do que os sistemas OPC, devido às reações hidráulicas e pozolânicas adicionais / prolongadas. Dhandapani e Santhanam (2020) realizaram extensos estudos sobre a evolução da microestrutura em ligantes com vários SCMs, especialmente sistemas LC3. A Fig. 7 mostra a evolução dos tamanhos dos poros em pastas de cimento endurecidas com uma relação p/b de 0,35 e preparadas com (i) OPC, (ii) OPC com cinza volante (na dosagem de substituição de 30%) e (iii) LC3. Os resultados indicam claramente que os SCMs de reação mais lenta, como a cinza volante, resultam em um retardo de cerca de 14 dias para exibir um refinamento significativo dos poros, enquanto os SCMs de reação mais rápida, como a argila calcificada com calcário, exibem poros muito mais finos, mesmo em 3 dias. A Fig. 7 (b) mostra as distribuições de tamanho de poro nos sistemas OPC, FA30 e LC3 aos 28 dias de cura. Uma lição importante é que os concretos com cinzas volantes exigirão uma cura prolongada para explorar todo o potencial. Um maior refinamento dos poros melhorará a resistividade do sistema, como visto na Fig. 8 para concretos com SCMs, em particular sistemas LC3. Consequentemente, a maior resistividade levará a uma melhor resistência ao cloreto e menores taxas de corrosão.

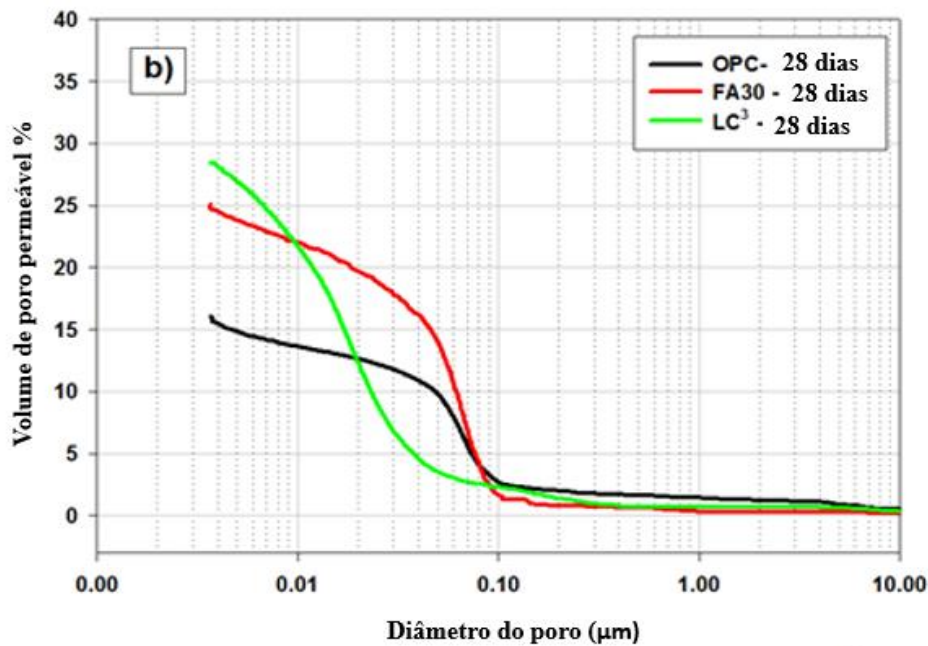
Devido à estrutura de poros refinada, os concretos com SCMs também apresentam menor permeabilidade (Dhanya e Santhanam, 2017). A carga aprovada no ensaio rápido de penetração de cloreto é um bom indicador da permeabilidade do concreto; A Fig. 9 indica a resistência significativa à transferência de carga, especialmente quando os níveis de substituição de escória e cinzas volantes Classe F são superiores a 30%. Por outro lado, o desempenho das cinzas volantes calcárias (Classe C) é avaliado menos do que o das cinzas volantes e escórias Classe F. Observe que, no nível de substituição de 15%, as escórias e as cinzas volantes Classe C exibem desempenho semelhante. A Fig. 10 mostra os dados dos ensaios de absorção de água, indicando que os concretos à base de SCM mostram apenas uma sortividade marginalmente menor do que os concretos OPC. A literatura também não fornece consenso sobre a capacidade de absorção de água e a penetração



de cloretos nos concretos com SCMs. Os autores acreditam que, com práticas apropriadas de estudo de dosagem, lançamento e cura, os aspectos positivos dos SCMs podem ser explorados para aumentar a durabilidade dos sistemas de concreto armado.



(a) a) Distribuição dos volumes dos poros em diferentes idades



(b) b) Distribuição do tamanho dos poros aos 28 dias

Figura 7. Distribuição do tamanho dos poros de diferentes sistemas de ligantes (Dhandapani e Santhanam, 2017)

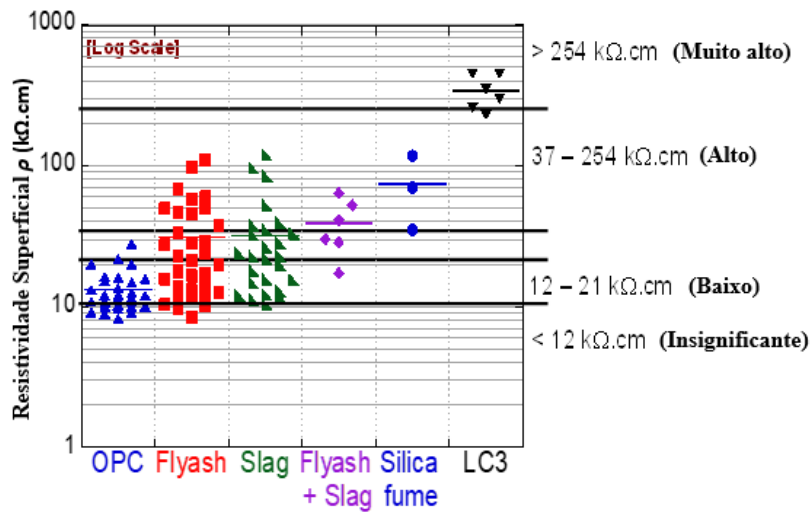


Figura 8. Resistividade superficial de concretos, método com 4 sondas Wenner para vários SCMs

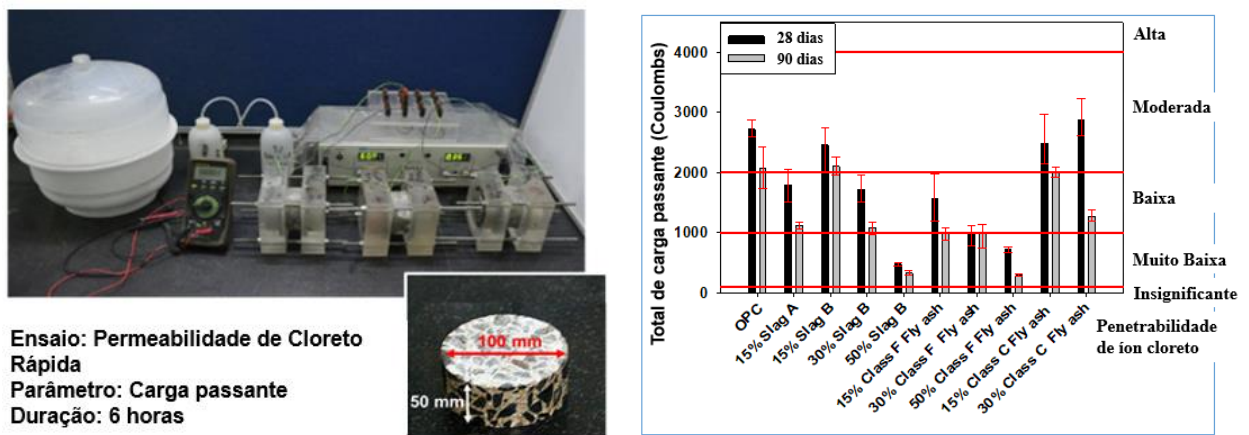


Figura 9. Resultados de ensaios rápidos de penetração de cloretos em concreto com diferentes SCMs (consumo de ligante de 310 kg/m<sup>3</sup>, w/b de 0.5) (Dhanya, 2015)

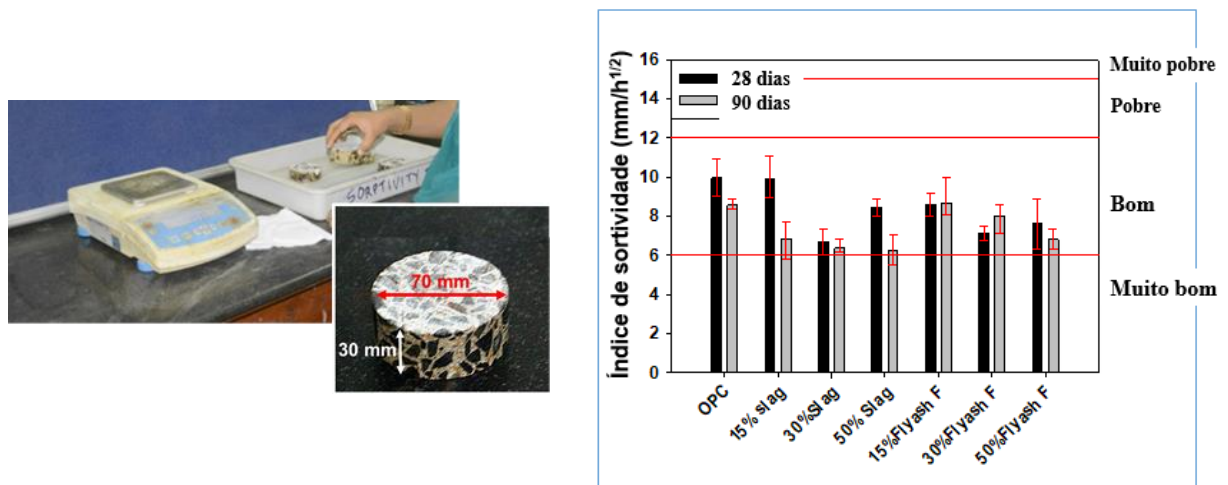


Figura 10. Resultados dos ensaios de absorção capilar de água em concretos com diferentes SCMs (consumo de ligante de 380 kg/m<sup>3</sup> e w/b de 0.4) (Dhanya, 2015)

## 7. RESISTÊNCIA AO CLORETO, LIMITE DE CLORETO E VIDA ÚTIL

Muitos relatórios sugerem que a resistência dos concretos contra a entrada de cloretos pode ser bastante aprimorada usando SCMs. A estrutura de poros refinada e a capacidade aprimorada de ligação ao cloreto são as principais razões para isso. A Fig. 11a mostra perfis de cloretos (ensaios ASTM C1556) de concretos curados úmidos por 1 ano; as curvas para os sistemas FA30 e LC3 exibem declives mais íngremes do que os do sistema OPC - indicando menores coeficientes de difusão de cloreto e melhor capacidade de ligação ao cloreto, o que pode ser atribuído à maior concentração de alumina reativa nos SCMs. Além disso, os sistemas de cinzas volantes e LC3 exibem cerca de 75% nos coeficientes de difusão de cloreto (ver Fig. 11b), com os sistemas LC3 possuindo melhor capacidade de ligação ao cloreto do que aqueles com cinzas volantes. Pillai et al. (2018) e Dhandapani e Santhanam (2020) mostraram que o tipo SCM influencia bastante o fator de envelhecimento ou constante de decaimento para o coeficiente de difusão de cloreto. A escolha apropriada do fator de envelhecimento é importante para obter estimativas de vida útil mais realistas. Consulte a Tabela 2 para obter as faixas recomendadas de fatores de envelhecimento para vários sistemas de ligantes; para ser conservador, pode-se escolher um valor mais baixo no intervalo indicado. Por exemplo, para sistemas com OPC, cinzas volantes Classe F, cinzas volantes Classe C, escória e LC3, recomenda-se o uso de fatores de envelhecimento de 0,1, 0,6, 0,4, 0,4 e 0,4, respectivamente, para a estimativa inicial da vida útil. As estimativas de vida útil podem ser refinadas coletando amostras de campo para obter perfis de cloreto e, em seguida, determinando os coeficientes de difusão de cloreto e os fatores de envelhecimento em idades posteriores.

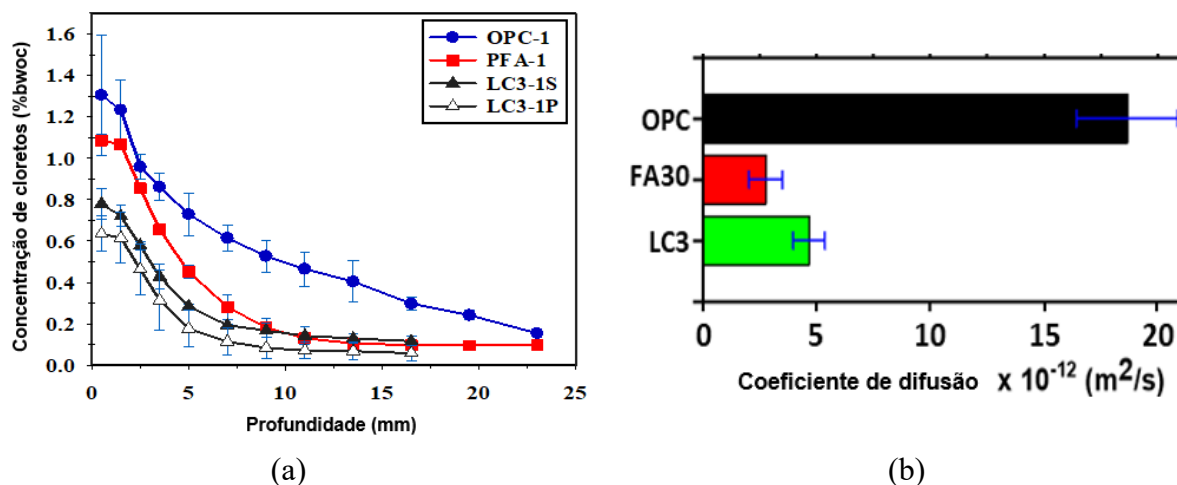


Figura 11. Perfis de cloretos e coeficientes de difusão de cloretos de concretos com OPC, cinzas volantes e LC3 (Dhandapani et al., 2018)

Tabela 2. Intervalos recomendados de fatores de envelhecimento para diferentes ligantes

Tipo de ligante	Faixa recomendada de fator de envelhecimento
OPC	0.1-0.3
Cinza volante Classe F	0.6-0.8
Cinza volante Classe C	0.4-0.6
Escória	0.4-0.6
Argila calcinada	0.4-0.5

A vida útil pode ser definida principalmente como o tempo necessário para iniciar a corrosão (por exemplo, a vida útil livre de corrosão) para avaliar a influência dos SCMs, embora tenha sido demonstrado que a cinza volante pode ser benéfica na fase de propagação, mesmo em concretos fissurados (Sangoju et al., 2011, 2015). Para obter essas estimativas de vida útil, além do coeficiente de difusão de cloreto e sua constante de decaimento, são necessárias estimativas quantitativas do limiar de cloreto. Os procedimentos de ensaio que adotam medições de corrosão por macrocélulas não detectam adequadamente o início da corrosão em sistemas de concreto altamente resistivos (como aqueles com LC3 e com SCMs e baixas relações p/b). Nesses sistemas, a corrosão inicia com a formação de macrocélulas ou microcélulas no mesmo vergalhão de aço, o que não é detectado em métodos típicos de ensaio de macrocélulas como o ASTM G109 (Rengaraju et al., 2018). Além disso, as técnicas de resistência à polarização linear têm limitações na detecção de corrosão em sistemas de concreto altamente resistivos (Rengaraju et al., 2019).

Portanto, um método de ensaio de limiar de cloreto acelerado (método de ensaio de hr ACT) foi desenvolvido para acomodar ensaios de limiar de cloreto em sistemas de concreto altamente resistivos (hr) (Pillai et al. 2018, Rengaraju, 2019). Este ensaio utiliza uma amostra de argamassa de aço do tipo pirulito, a resistência à polarização linear e / ou a técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica e um procedimento estatístico para detectar o início da corrosão. Consequentemente, estimativas probabilísticas do limiar de cloreto de vários sistemas aço-cimentícios podem ser desenvolvidas (consulte a Tabela 3). Como visto na Tabela 3 e na Fig. 12, há uma redução perceptível no limiar de cloreto de OPC para cinzas volantes (ou seja, PFA) para sistemas LC3 (de cerca de 0,4 a 0,1% em peso de aglutinante), que pode ser atribuído ao menor pH nos sistemas PFA e LC3.

Tabela 3. Limiares de cloreto de vários sistemas aço-cimento (determinado usando o ensaio hr-ACT)

Relação água/ligante	Tipo de ligante	Tipo de aço	Limiar de cloreto (%bwob)	
			Média	Coefficiente de variação
0.4	OPC	TMT não tratado/aço QST	0.47	0.10
	OPC + cinza volante		0.30	0.10
0.5	OPC	TMT não tratado /aço QST	0.40	0.14
	OPC + cinza volante		0.31	0.16
	OPC	Aço de protensão – não tensionado	0.40	0.17
	OPC + cinza volante		0.23	0.15

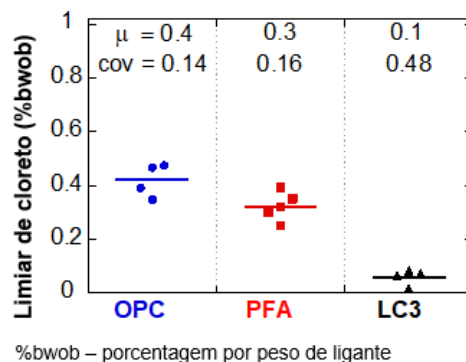
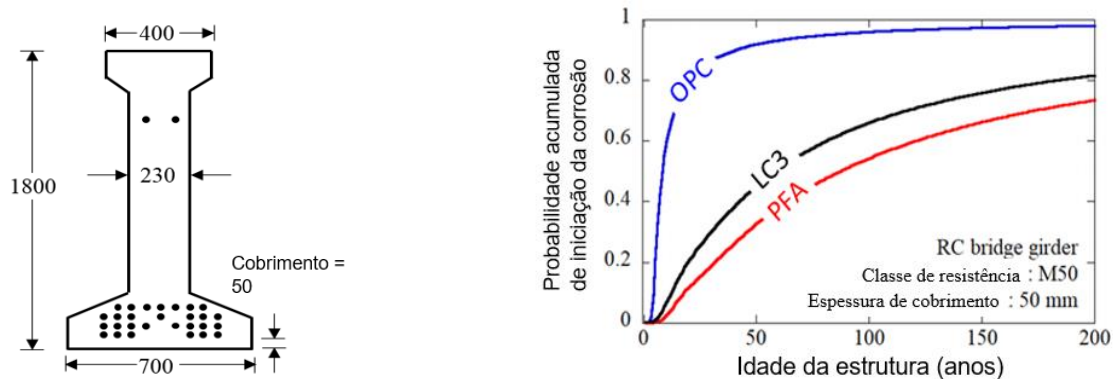


Figura 12. Limiar de cloreto de sistemas sem e com SCMs (μ: média, cov: coeficiente de variação)

No entanto, deve-se notar que alcançar uma longa vida útil é uma consequência do efeito sinérgico de muitos parâmetros (principalmente o coeficiente de difusão de cloreto, fator de envelhecimento e limiar de cloreto). Para demonstrar o potencial de melhorar a vida útil de estruturas de concreto armado sob exposição a cloretos através da incorporação de ligantes misturados, uma viga de ponte (veja Fig. 13(a)) com uma espessura de cobrimento ( $d$ ) de 50 mm e exposta para uma concentração de cloreto na superfície de 0,8% em peso de aglutinante. As probabilidades acumuladas de iniciação à corrosão foram obtidas usando a solução da 2ª Lei de Difusão de Fick, em um programa MATLAB® SL-Chlor, considerando  $d$ ,  $D_{cl}$  e  $Cl_{th}$  como variáveis aleatórias (Pillai et al. 2018; Rengaraju, 2019). A Fig. 13(b) mostra que os sistemas baseados em SCM geralmente podem proporcionar uma vida útil muito mais longa do que os sistemas OPC.



(a) Seção transversal da viga utilizada (todas as dimensões estão em mm)

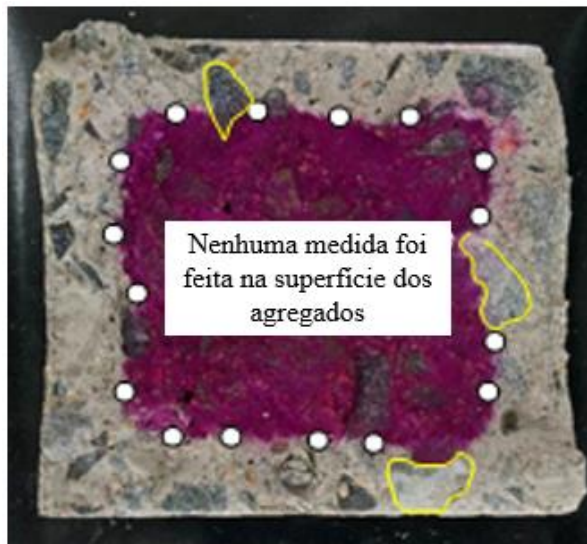
(c) Estimativa probabilística da vida útil sem corrosão

Figura 13. Estudo de caso demonstrando o efeito sinérgico do coeficiente de difusão de cloreto, coeficiente de envelhecimento e limiar de cloreto para vários sistemas de ligantes (Pillai et al. 2018)

## 8. RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO

A resistência à penetração de  $CO_2$  geralmente é boa nos sistemas OPC, devido ao alto teor de hidróxido de cálcio. No entanto, devido a reações pozolânicas prolongadas, os concretos baseados em SCM exigem teores mais baixos de hidróxido de cálcio e, conseqüentemente, menor resistência à carbonatação. Devido à menor disponibilidade de  $Ca(OH)_2$  em sistemas baseados em SCM, o  $CO_2$  é capaz de carbonatar o CSH em um momento anterior - levando à rápida progressão da frente de carbonatação. Dhanya (2015) mostrou, a partir de estudos de carbonatação acelerada com menos de 1% de  $CO_2$ , que as profundidades de carbonatação em concretos com mais de 15% do OPC substituído por cinzas volantes de Classe F poderiam ser muito maiores do que apenas o OPC como ligante (ver Fig. 14) Por outro lado, o aumento da carbonatação das misturas substituídas por escória não foi significativo. Resultados de carbonatação natural de estudos recentes também mostraram maiores profundidades de penetração para concretos misturados com SCM. Portanto, pode-se esperar que o início da corrosão devido à carbonatação ocorra mais cedo nos concretos com SCMs, se expostos sem nenhum revestimento. No entanto, a propagação da corrosão ainda dependeria da disponibilidade de umidade e oxigênio, bem como da condutividade (ou inversamente, resistividade) do meio - espera-se que esses fatores compensem e produzam uma situação favorável aos SCMs. Considerando todos esses aspectos, é possível projetar efetivamente um concreto baseado em SCM para situações em que a carbonatação possa governar a durabilidade.

Portanto, recomenda-se não abster-se de usar concretos com SCMs - os engenheiros poderiam adotar medidas de mitigação, como revestimentos anti-carbonatação, para compensar os efeitos adversos devido à carbonatação potencialmente mais rápida.



Superfície fraturada de amostras de 100 × 100 × 500 mm

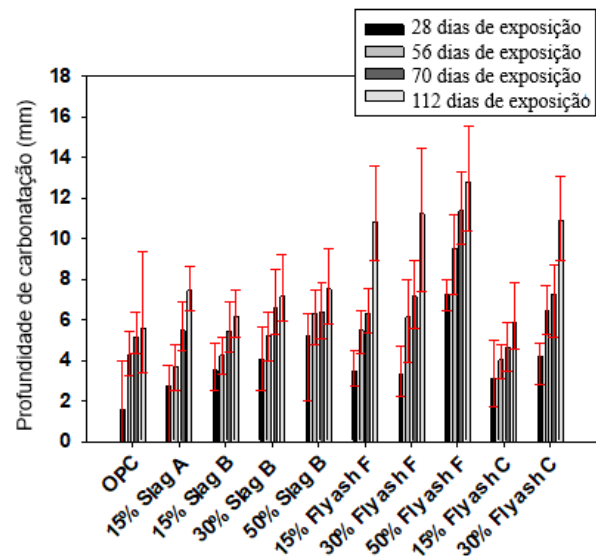


Figura 143. Profundidades de carbonatação aceleradas em concretos com diferentes SCMs (teor de ligante de 310 kg/m<sup>3</sup>; w/b de 0,5)

## 9. PEGADA DE CARBONO

A substituição parcial do OPC por SCMs pode levar a uma redução significativa nas emissões de CO<sub>2</sub> associadas à produção de cimento; e, portanto, a produção de concreto. Para quantificar os aspectos positivos relacionados à pegada de carbono e ao impacto ambiental dos concretos com ligantes misturados, investigações extensivas foram realizadas no IIT Madras usando a avaliação do ciclo de vida (ACV) realizada com dados de várias fábricas de cimento na Índia (Gettu et al., 2016, 2018, 2019). A Fig. 15 mostra as emissões de CO<sub>2</sub> obtidas para um dos estudos de caso considerando os concretos M50. Esses valores estão nas faixas relatadas na literatura; por exemplo, Flower e Sanjayan (2007) forneceram valores de cerca de 0,13 kg/kg para concreto OPC, e os valores de carbono incorporados dados por Hammond e Jones (2008) produzem emissões de CO<sub>2</sub> de 0,13-0,16 kg/kg. Mais importante, as parcelas indicam que em concretos com apenas OPC, mais de 75% das emissões de CO<sub>2</sub> estão associadas ao cimento, enquanto a maioria dos 25% restantes das emissões de CO<sub>2</sub> está associada ao transporte e eletricidade. Isso também está de acordo com as observações de Flower e Sanjayan (2007) e Marceau et al. (2007). Após a substituição do OPC por SCMs ou ligantes misturados, é observada uma redução significativa nas emissões. Observa-se que o uso de cinzas volantes e GGBS diminui as emissões de CO<sub>2</sub> em cerca de 26% e 21% - semelhante às faixas relatadas por Flower e Sanjayan (2007). Os concretos LC3 são muito promissores em termos de emissões de CO<sub>2</sub>, com uma redução de 30 a 35% em comparação com os concretos OPC com resistências à compressão semelhantes. Em geral, o uso de SCMs disponíveis localmente em doses mais altas leva a uma redução significativa na pegada de carbono da indústria de concreto.

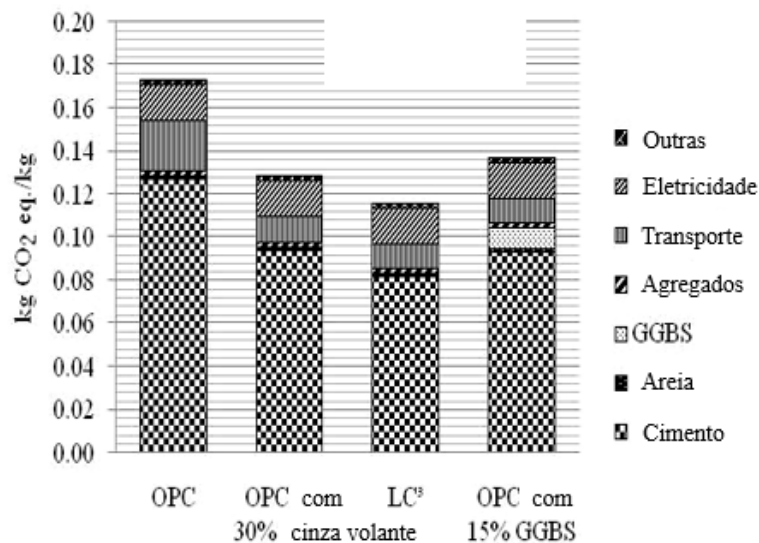


Figura 154. Emissões de dióxido de carbono para concretos M50 com diferentes ligantes (Gettu et al., 2016)

## 10. CONCLUSÕES

Por mais de uma década, os pesquisadores do IIT Madras vêm trabalhando em vários aspectos dos SCMs e em seu desempenho em sistemas de concreto armado. Vários aspectos relacionados a propriedades no estado fresco, propriedades no estado endurecido e propriedades de durabilidade (corrosão e transporte) foram estudadas. Com base em tais estudos relevantes para o contexto indiano, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- A trabalhabilidade dos concretos pode ser influenciada pela incorporação de SCMs e pode ser ajustada com o uso de superplastificantes.
- Existe um potencial maior de fissuras por retração plástica devido ao uso de SCMs, que podem ser mitigados pela adição de fibras de polipropileno ou por cura úmida prolongada. No entanto, a retração por secagem dos concretos com ligantes misturados praticamente não diferiu da do concreto OPC.
- Concretos com SCMs foram capazes de atender aos requisitos de resistência à compressão, módulo de elasticidade e retração, como normalmente exigido para os concretos OPC.
- Refinamento significativo de poros ocorre em concretos com SCMs, o que aumenta sua resistividade elétrica e resistência a cloretos e reduz as taxas de corrosão
- A cura é essencial para explorar todo o potencial de concretos com SCMs em termos de resistência e durabilidade
- O limiar de cloreto depende não apenas do tipo de aço, mas também do ligante cimentício usado. Observa-se que o uso de SCMs pode reduzir o limiar de cloreto. No entanto, o aprimoramento significativo contra a taxa de entrada de cloreto compensa essa redução no limiar de cloreto e o efeito sinérgico resulta em vida útil mais longa dos sistemas de cinzas volantes, escória e LC3 do que os sistemas OPC.
- Alguns dos SCMs têm menos resistência à carbonatação, o que pode ser resolvido com proporções adequadas de mistura e medidas de mitigação, como revestimentos anti-carbonatação.
- Considerando a possibilidade de redução significativa na pegada de carbono, é evidente que o uso de SCMs é essencial para melhorar a durabilidade e a sustentabilidade das estruturas de concreto.

## 11. AGRADECIMENTOS

Muitos pesquisadores vêm alertando contra o uso irrestrito de SCMs na construção de concreto e chamando a atenção para possíveis repercussões negativas de seu uso. Por outro lado, é evidente que os SCMs oferecem, sem dúvida, a opção mais viável para a tecnologia sustentável de concreto. Este trabalho é um reconhecimento dos argumentos apresentados por esses pesquisadores ao longo dos anos e uma tentativa de fornecer uma visão equilibrada, com base em extensos estudos experimentais realizados ao longo de mais de uma década.

Os autores expressam profunda gratidão a seus pesquisadores, estudantes e funcionários do projeto por sua dedicação e trabalho duro que levaram a muitos resultados interessantes e importantes obtidos, como os resumidos neste artigo. Eles possibilitaram muitos projetos, que foram levados à conclusão bem-sucedida. Esses trabalhos foram realizados principalmente nos Laboratórios de Pesquisa em Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil, incluindo o Laboratório IIT Madras-Lafarge de Durabilidade e Desempenho a Longo Prazo do Concreto; a ajuda do pessoal dessas instalações é agradecida. Também devemos agradecer aos patrocinadores e agências de financiamento por seu apoio generoso nas várias fases de nosso trabalho de pesquisa ao longo dos anos.

Este artigo é uma versão revisada da correspondente a uma palestra na III Conferência Internacional RN Raikar Memorial sobre Avanços em Ciência e Tecnologia de Concreto, Mumbai, 2018, e que aparece em seus trabalhos. A versão anterior também foi adaptada e traduzida para o espanhol para a Revista Hormigón, (ISSN-0325-8947) em 2019.

## 12. REFERÊNCIAS

- Chatterjee, A. K. (2018). *Cement production technology: Principles and practice*. CRC Press, Boca Raton, USA, 419 p.
- Dhandapani, Y., Santhanam, M. (2017). *Assessment of pore structure evolution in the limestone calcined clay cementitious system and its implications for performance*. Cement and Concrete Composites, 84:36-47. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.08.012>
- Dhandapani, Y., Sakthivel, T., Santhanam, M., Gettu, R., Pillai, R. G. (2018). *Mechanical properties and durability performance of concretes with limestone calcined clay cement (LC3)*. Cement and Concrete Research, 107:136-151. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.005>
- Dhandapani, Y., Santhanam, M. (2020), *Investigation on the microstructure-related characteristics to elucidate performance of composite cement with limestone-calcined clay combination*, Cement and Concrete Research, 129, 22 p. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105959>
- Dhanya, B. S. (2015). *Study of the influence of supplementary cementitious materials on selected durability parameters of concrete*, Doctoral Thesis, IIT Madras, Chennai, India, 361 p.
- Dhanya, B. S., Santhanam, M. (2017). *Performance evaluation of rapid chloride permeability test in concretes with supplementary cementitious materials*, Materials and Structures, 50:67, 9 p. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0940-3>
- Dhir, R. K., Jones, M. R., Eds. (1994). *Euro-cements: Impact of ENV 197 on concrete construction*, Proc. National Seminar (Dundee, UK). E&FN Spon, London, 240 p.
- Flower, D. J. M., Sanjayan, J. G. (2007). *Green house gas emissions due to concrete manufacture*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 12:282. <https://doi.org/10.1065/lca2007.05.327>
- Gettu, R., Patel, A., Rathi, V., Prakasan, S., Basavaraj, A. S., Maity, S. (2016). *Sustainability assessment of cements and concretes in the Indian context: Influence of supplementary cementitious materials*, Proc. Fourth Intl. Conf. on Sustainable Construction Materials and Technologies (Las Vegas, USA), Eds. N. Ghafouri, P. Claisse, E. Ganjian and T.R. Naik, paper S299, 142-1150.



- Gettu, R., Pillai, R. G., Santhanam, M., Basavaraj, A. S., Rathnarajan, S., Dhanya, B. S. (2018). *Sustainability-based decision support framework for choosing concrete mixture proportions*. Materials and Structures, 52 (122), 17 p. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1425-y>
- Gettu, R., Patel, A., Rathi, V., Prakasan, S., Basavaraj, A. S., Palaniappan, S., Maity, S. (2019). *Influence of supplementary cementitious materials on the sustainability parameters of cements and concretes in the Indian context*, Materials and Structures, 52:10, 11 p. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1321-5>.
- Hammond, G. P., Jones, C. I. (2008). *Embodied energy and carbon in construction materials*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Energy 161(2): 87-98. <https://doi.org/10.1680/ener.2008.161.2.87>
- Jayasree, C., Gettu, R. (2008). *Experimental study of the flow behaviour of superplasticized cement paste*. Materials and Structures, 41:1581-1593. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9350-5>
- Jayasree, C., Gettu, R., (2010). *Correlating properties of superplasticized paste, mortar and concrete*. Indian Concrete Journal, 84(7):7-18.
- Jayasree, C., Gettu, R. (2012). "Choice of compatible cement-superplasticizer combinations", ICI J. (Indian Concrete Institute), 12(4): 14-31.
- Jayasree, C., Murali Krishnan, J., Gettu, R. (2011). *Influence of superplasticizer on the non-newtonian characteristics of cement paste*, Materials and Structures, 44(5): 929-943. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9677-6>
- John, E., Gettu, R. (2014). *Effect of temperature on flow properties of superplasticized cement paste*, ACI Materials Journal, 111(1): 67-76.
- Jose, S., Gettu, R., Indhuja, S. (2018). *Flexural toughness characterization of steel, polymer and glass fibre reinforced concrete based on the notched beam test*, The Indian Concr. J., 92(2): 35-50.
- Malhotra, V. M., Ramezani pour, A. A., (1994). *Fly ash in concrete*, 2<sup>nd</sup> ed., Canada Centre for Mineral and Energy Technology, Ottawa, 307 p.
- Marceau, M., Nisbet, M. A., Van Geem, M. G. (2007). *Life cycle inventory of portland cement concrete*, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 121 p.
- Mehta, P. K., Ed., (1999). *Concrete technology for sustainable development in the twenty-first century*, Proc. Intl. Symp. (Hyderabad). Cement Manufacturers' Association, New Delhi, 538 p.
- Mehta, P. K. (2001). *Reducing the environmental impact of concrete*, Concrete International., 23(10):61-66.
- Mohan, M. K. (2019). *Flowable, bleed resistant cementitious grouts and performance specifications for applications in post-tensioned concrete systems*, MS Thesis, Department of Civil Engineering, IIT Madras, Chennai, 149 p.
- Nair, V. G. N. (2018). *Experimental study of the flow behaviour of superplasticized pastes and concretes with limestone calcined clay cement (LC3)*. MS Thesis, Department of Civil Engineering, IIT Madras, Chennai, 119 p.
- Nayar, S. K., Gettu, R. (2015). *Synergy in Toughness by Incorporating Amorphous Metal and Steel Fibers*, ACI Mater. J., 112(6): 821-827. <https://doi.org/10.14359/51687857>
- Nayar, S. K., Gettu, R. (2016). *Benefits of using amorphous metallic fibres in concrete slabs-on-grade*, RILEM Technical Letters, 122-128. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.20>
- Nayar, S. K., Gettu, R. (2020). *Mechanistic-empirical design of fibre reinforced concrete (FRC) pavements using inelastic analysis*, Sādhanā, 45:19, 7 p. <https://doi.org/10.1007/s12046-019-1255-1>
- Pillai, R. G., Gettu, R., Santhanam, M., Rengaraju, S., Dhandapani, Y., Rathnarajan, S., Basavaraj, A. S. (2018). *Service life and life cycle assessment of reinforced concrete systems with limestone calcined clay cement (LC3)*. Cement and Concrete Research, 118: 111-119. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.11.019>

- Rengaraju, S., Godara, A., Alapati, P., Pillai, R. G. (2018), *Macrocell corrosion mechanisms of prestressing strands in various concretes*, Mag. Concr. Res. (ICE, UK), 72(4): 194-206. <https://doi.org/10.1680/jmacr.18.00284>
- Rengaraju, S. (2019), *Electrochemical response and chloride threshold of steel in highly resistive concrete systems*, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, IIT Madras, Chennai, 252 p.
- Rengaraju, S., Neelakantan, L., Pillai, R. G. (2019), *Investigation on the polarization resistance of steel embedded in highly resistive cementitious systems—An attempt and challenges*, Electrochimica Acta, 308: 131-141. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.03.200>
- Sakthivel, T. (2019). *Effect of the incorporation of slag, fly ash, and limestone calcined clay on the compressive strength, elastic modulus and shrinkage of concrete*, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, IIT Madras, Chennai, 194 p.
- Sakthivel, T., Gettu, R., Pillai, R. G. (2019). *Compressive strength and elastic modulus of concretes with fly ash and slag*. J. Institution of Engineers (India): Series A, 10 p. <https://doi.org/10.1007/s40030-019-00376-w>
- Sangoju, B., Gettu, R., Bharatkumar, B. H., Neelamegam, M. (2011). *Chloride-induced corrosion of steel in cracked OPC and PPC concretes: Experimental study*, Journal of Materials in Civil Engineering, 23(7): 1057-66. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000260](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000260)
- Sangoju, B., Pillai, R. G., Gettu, R., Bharatkumar, B. H., Iyer, N. R. (2015). *Use of portland pozzolana cement to enhance the service life of reinforced concrete exposed to chloride attack*, Journal of Materials in Civil Engineering, 27(11): 04015031, 8 p. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001293](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001293)
- Scrivener, K., John, V. M., Gartner, E. M. (2017). *Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry*. United Nations Environment Programme, Paris, 50 p.
- Sirajuddin, M., Gettu, R. (2018). *Plastic shrinkage cracking of concrete incorporating mineral admixtures and its mitigation*. Materials and Structures, 51(48), 10 p. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1173-4>
- Stephen, S. J., Gettu, R. (2019a). *Rate-dependence of the tensile behaviour of fibre reinforced concrete in the quasi-static regime*, Materials and Structures, 52:107, 9 p., with Supplementary Material published online, 6 p. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1405-2>
- Stephen, S. J., Gettu, R. (2019b). *Fatigue response of cracked fibre reinforced concrete*, Proc. Intl. Conf. on Innovative Materials for Sustainable Civil Engineering, RILEM Week (Nanjing, China), p. 6.