

Hinoel Zamis Ehrenbring
Bernardo Tutikian

CONCRETO FLEXÍVEL COM FIBRAS

Princípios, dosagem e aplicações do
Engineered Cementitious Composites (ECC)



São Paulo – SP
2024

SOBRE OS AUTORES



HINOEL ZAMIS EHRENBRING

É professor dos cursos de graduação e especialização da Unisinos nas áreas de Engenharia Civil e Arquitetura e Urbanismo. É o responsável técnico do Instituto tecnológico em desempenho e construção civil (itt Performance/Unisinos). Possui doutorado em Engenharia Civil, com ênfase em materiais e sustentabilidade, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). Pela mesma instituição, possui mestrado e graduação também em engenharia civil. É um dos autores do Capítulo “Concreto Autoadensável” do livro CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA (IBRACON). É diretor regional do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON) no estado do Rio Grande do Sul. Também é delegado regional da Associação Brasileira da Patologia das Construções (ALCONPAT – Brasil). Atua na área de materiais desenvolvendo pesquisas que envolvem o ECC, concreto com fibras e concreto autoadensável. É revisor da Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, Buildings e Journal of Cleaner Production. E-mail para contato – hzamis@unisinos.br



BERNARDO TUTIKIAN

Bernardo Tutikian é professor e pesquisador da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – RS (UNISINOS), sendo docente permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e é pesquisador do Instituto Tecnológico de Desempenho para Construção Civil – itt Performance (<http://www.unisinos.br/itt/ittperformance/>). Engenheiro civil, mestre e doutor em engenharia. Tem pós-doutorado pela CUJAE em 2013, foi professor visitante da Universidade de Missouri of Science and Technology (EUA), é professor visitante na Université de Cergy-Pontoise (França) e pesquisador da Universidad de la Costa – CUC (Colômbia). É autor do livro ‘Concreto autoadensável’, publicado pela PINI em 2021; do livro ‘Patologia das Estruturas de Concreto, Aço e Madeira’, publicado pela Oficina de Textos, em 2019; e do livro ‘Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC)’, publicado pela Oficina de Textos, em 2022. Orienta trabalhos de conclusão de curso, mestrados e doutorados e é avaliador de periódicos internacionais de renome, como Construction and Building Materials, Cement and Concrete Research e ACI. É membro permanente do Steering Board do CONSEC e é Editor Associado do periódico RIEM. Conselheiro eleito do IBRACON (Instituto Brasileiro do Concreto), ex vice-presidente e atual diretor de pesquisa e desenvolvimento. Ex-presidente da Alconpat Brasil por dois mandatos, ex-vice-presidente e Diretor de Jovens da Alconpat Internacional. Presta consultoria para empresas de construção civil na área de dosagem de concretos, desempenho e patologia. Publicou mais de 500 trabalhos em periódicos e eventos. E-mail para contato – bftutikian@unisinos.br

SINOPSE

Imagine se fosse possível conceber ductilidade para o concreto. Ou seja, ter o mesmo comportamento do aço quando submetido à tração, apresentando visivelmente o patamar de escoamento. Por incrível que pareça, este compósito cimentício já completa 30 anos da sua criação, o qual é denominado como **Concreto Flexível** ou **Engineered Cementitious Composites (ECC)**. Com este material, tem-se estruturas mais seguras, mais resilientes e, por sua vez, com maior durabilidade. No mundo, o ECC já é uma realidade. Já no Brasil, pesquisadores têm direcionado seus trabalhos para entender melhor o comportamento do ECC quando produzido com os materiais nacionais. Desta maneira, este livro aborda os conceitos necessários para que a especificação, dosagem, produção e aplicação do ECC estejam cada vez mais próximas da realidade do setor da construção civil brasileira, superando os desafios e tendo um próspero futuro.

SUMÁRIO

PREFÁCIO	11
APRESENTAÇÃO	13
1. INTRODUÇÃO	15
1.1 O problema	16
1.2 Concepção	20
1.3 Histórico e Desenvolvimento	24
1.4 Classificações	32
2. APLICAÇÕES DO ECC NA CONSTRUÇÃO CIVIL	37
2.1 Estruturas de edificações	38
2.2 Infraestrutura de transporte	42
2.3 Revestimentos aderidos	48
2.4 Construção modular	50
2.5 Reparo e reforço de estruturas	51
2.6 Demais aplicações	52
3. FUNCIONAMENTO MICROMECAÂNICO	55
4. MATERIAIS CONSTITUINTES	67
4.1 Matriz cimentícia	68
4.1.1 Cimento	68
4.1.2 Adições minerais	69
4.1.2.1 Cinza volante (CV)	69
4.1.2.2 Sílica ativa (SA) e metacaulim	70
4.1.2.3 Escória de alto-forno (EAF) e Cinza de casca de arroz (CCA)	71
4.1.3 Agregados	71
4.1.3.1 Agregados miúdos	71
4.1.3.2 Fíler calcário e pó de pedra	72
4.1.4 Aditivos químicos	73
4.1.4.1 Redutores de água tipo 1 (Plastificantes)	73
4.1.4.2 Redutores de água tipo 2 (Superplastificantes)	74
4.1.4.3 Modificadores de viscosidade	74
4.1.4.4 Incorporadores de ar	75
4.2 Fibras	75

4.2.1	Fibras de PVA	77
4.2.2	Fibras de PP	79
4.2.3	Fibras de PE (PET)	82
4.2.4	Fibras de POL	83
4.2.5	Cálculo do volume de fibras	84
4.3	Outros	89
4.3.1	Agregados leves	89
4.3.2	Pigmentos	90
4.3.3	Cristalizantes	91
4.3.4	Dióxido de titânio	93
5.	DOSAGEM E MISTURA DOS MATERIAIS	95
6.	PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO	103
6.1	Estado fresco	104
6.2	Estado endurecido	107
6.2.1	Resistência à tração direta	107
6.2.2	Resistência à tração na flexão	117
6.2.3	Resistência à compressão	123
6.2.4	Resistência ao cisalhamento	126
6.2.5	Fadiga	129
6.2.6	Fluência	131
7.	PROPRIEDADES ESPECIAIS	133
7.1	Autocicatrização e autorregeneração	133
7.1.1	Autogênico pela utilização de pozolanas	137
7.1.2	Autônomo pelo emprego de soluções bacterianas	142
7.1.3	Autônomo pelo uso de catalisadores cristalinos	147
7.1.4	Considerações sobre a cicatrização no ECC	151
7.2	Autolimpeza	155
8.	DURABILIDADE DO ECC	159
8.1	Padrão de fissuração	160
8.2	Permeabilidade à água	162
8.3	Absorção de água por capilaridade	164
8.4	Retração por secagem	165
8.5	Exposição às altas temperaturas	169
8.6	Considerações sobre ECC reforçado com barras de aço	171
9.	DUCTILIDADE DO ECC AO LONGO DO TEMPO	175
10.	DESAFIOS E O FUTURO DO ECC NO BRASIL	181
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	185

PREFÁCIO

Motivados pela rápida disseminação do uso de fibras adicionadas ao concreto, os autores Hinoel e Bernardo trabalham o tema de forma inteligente e atual desde a escolha do título – CONCRETO FLEXÍVEL COM FIBRAS.

Os assuntos são tratados de forma muito técnica e profunda com abordagem clara e didática possibilitando o entendimento até mesmo para os leitores que não são especialistas em tecnologia de materiais.

Os textos se alternam com um farto uso de gráficos e tabelas, fazendo com que o leitor não se enfade durante o estudo. As diversas fotos de ótima qualidade utilizadas ao longo dos capítulos findam por ilustrar e complementar o entendimento definitivo dos temas.

Embora a tecnologia do concreto reforçado com fibras tenha um horizonte ainda muito amplo de pesquisas e perguntas a responder, o livro traz um arcabouço de informações teóricas e práticas sustentadas por extensa pesquisa laboratorial e estudos teóricos nos intramuros das universidades.

De forma objetiva, os autores desmistificam a crença de que é complexa a preparação de um ECC – Engineered Cementitious Composite por meio da apresentação de experiências de sucesso em aplicações reais como juntas de dilatação de obras de arte, redução de infiltrações em túneis e estanqueidade de fachadas na construção modular.

Passando por aspectos polêmicos como o funcionamento micro mecânico do ECC, caracterização dos materiais, propagação de fissuras,

cicatrização e durabilidade, a publicação abre caminho para as necessárias pesquisas vindouras, apresenta ainda sugestões de diversos traços para dosagem.

Trata-se de um trabalho desenvolvido de maneira muito séria, alinhado às demandas de um mercado ávido por tecnologias que tragam produtividade, economia e melhoria no desempenho das obras civis perfazendo uma contribuição brilhante dos autores para a comunidade técnica.

Dr. Antonio Carmona Filho

Diretor Técnico da Empresa Carmona Soluções de Engenharia
Membro Fundador da ALCONPAT – Associação Latino-Americana de
Patologia e Controle de Qualidade da Construção Civil-Internacional

APRESENTAÇÃO

A motivação para a publicação deste livro foi apresentar aos profissionais do mercado brasileiro as propriedades e aplicações de um dos materiais mais versáteis já desenvolvido, o Concreto flexível (Engineered Cementitious Composites – ECC). O livro *Concreto flexível com fibras: Princípios, dosagem e aplicações do Engineered Cementitious Composites (ECC)* foi pensado para que seu conteúdo seja expresso de maneira clara, objetiva e didática ao leitor, tornando fácil o entendimento sobre um material ainda pouco conhecido e divulgado no país.

Resumidamente, o Concreto flexível ou conhecido internacionalmente como ECC é um compósito cimentício reforçado com fibras poliméricas, as quais admitem ductilidade por meio da formação de múltiplas microfissuras de abertura controlada (espessura de até 0,1 mm). Nestas condições, é possível tornar estruturas mais seguras, resilientes e duradouras.

Então, neste livro são compilados resultados de pesquisas, dos últimos 30 anos, desenvolvidas por inúmeros pesquisadores do Brasil e do mundo em relação ao ECC. Sua aplicação já ocorre em países como Estados Unidos, Canadá, Japão, China, Alemanha, Índia, entre outros. Desta maneira, analisando o conteúdo estrangeiro, buscamos compatibilizar o ECC à realidade brasileira, indicando os materiais a serem utilizados, dosagens, misturas, bem como potenciais aplicações no cenário nacional.

O uso ECC na construção civil brasileira ainda precisa percorrer um longo caminho, uma vez que as pesquisas nacionais são recentes,

somada à falta de conhecimento dos profissionais da área em relação ao material (principalmente os projetistas). Assim, o livro também tem o propósito de divulgar conhecimento técnico sobre o compósito ao maior número de profissionais do mercado, indicando suas principais características, vantagens, limitações, entre outros.

As finalidades do material são diversas, deste estrutural até como material de revestimento e acabamento. As aplicações do ECC são diversas, como em edificações, pontes, viadutos, túneis, obras de saneamento ou até barragens e obras hidráulicas.

O livro é constituído por dez capítulos que vão desde a problemática e motivação para o desenvolvimento do concreto flexível até os principais desafios e o futuro do ECC no Brasil. Ao longo da obra são discutidas as aplicações do compósito na construção civil, além dos conceitos técnicos que fundamentam seu funcionamento micromecânico.

Indicar os materiais que podem ser utilizados na produção do ECC, bem como os cuidados na dosagem e mistura do compósito, também estão incluídos neste livro. Há capítulos específicos para discussão e apresentação das propriedades do material no estado fresco e endurecido, além de discutir as propriedades especiais que este compósito pode ter, como por exemplo, a aut cicatrização das fissuras ou autolimpeza.

Entendendo que a fissuração é inerente ao comportamento do ECC, criam-se dúvidas sobre a real durabilidade do compósito. Assim, o Capítulo 8 detalha todos os ensaios já realizados com o ECC, visando indicar seu comportamento quando exposto às situações extremas, mostrando resultados surpreendentes.

Esperamos que aprecie a obra e nos colocamos a sua disposição para eventuais discussões sobre o tema, desenvolvimento de novas pesquisas ou demais assuntos pertinentes aos compósitos cimentícios. Desejamos uma ótima leitura!

1

INTRODUÇÃO

Técnicas, materiais e sistemas construtivos avançam com o passar dos anos devido às demandas do setor da construção civil. Novos compósitos cimentícios são desenvolvidos com o intuito de diminuir as anomalias nas construções, de maneira a prezar pela sua segurança estrutural, durabilidade e funcionalidade.

Como exemplo da tecnologia do concreto, estão: o concreto de alta resistência (CAR), concreto de alto desempenho (CAD) e o concreto de ultra alto desempenho (UHPC). Todos desenvolvidos para que a durabilidade do conjunto seja cada vez maior, consumindo a menor quantidade possível de cimento e outros materiais que agridem severamente o meio ambiente, além de otimizarem o sistema estrutural. No entanto, as matrizes ainda necessitam de reforços para que possuam ductilidade.

Então, imagine se fosse possível conceber propriedades do aço a um compósito cimentício, tais como: alta resistência à tração, deformação e ductilidade. Seria um grande desafio e uma grande contribuição à tecnologia do concreto, não? Pois bem, esta tecnologia já existe há mais de 30 anos e aos poucos vem sendo pesquisada e conhecida no Brasil.

Este compósito é denominado como *Engineered Cementitious Composites* (ECC), mas também conhecido como “*Bendable concrete*”

2

APLICAÇÕES DO ECC NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O ECC foi desenvolvido para atender demandas de vários seguimentos da construção civil, as quais serão discutidas neste capítulo. Devido ao amplo mercado que os compósitos cimentícios possuem, constantemente são descobertas novas aplicações para o ECC. Como discutido no Capítulo 1, o desenvolvimento do ECC é baseado nas necessidades da aplicação final, portanto, um compósito que será aplicado em um sistema estrutural de edificação terá propriedades diferentes daquele a ser aplicado em obras de infraestrutura. Todavia, ambos devem ser dúcteis.

É importante destacar que as aplicações em campo do compósito auxiliam na validação do material e, tendo sucesso, este vai se consolidando no setor. O uso do ECC é feito em circunstâncias que o concreto convencional é limitado, onerando e podendo prejudicar seriamente a durabilidade do conjunto.

Neste capítulo, são apresentadas as aplicações do ECC no mundo, em edificações, obras de infraestrutura viária/saneamento, entre outras.

3

FUNCIONAMENTO MICROMECAÂNICO

À medida em que se buscam compósitos cimentícios de alto desempenho, como o CAD, UHPC ou ECC, a microestrutura e as trocas de energia entre os componentes tornam-se fatores decisivos. A microestrutura do ECC é composta por três fases (ver Figura 29). A primeira corresponde à matriz cimentícia, destacando a importância dos seus parâmetros físicos, como: a resistência à compressão, módulo de elasticidade, tenacidade, índice de vazios e dimensão dos grãos. A segunda fase está relacionada à fibra, sendo importante conhecer as suas propriedades físicas e mecânicas. Já a interface fibra-matriz é a terceira fase da microestrutura do ECC (LI, V.; WANG, 2006; LU; YU; LEUNG, 2018).

4

MATERIAIS CONSTITUINTES

Os materiais utilizados em um ECC são, praticamente, os mesmos empregados nas argamassas cimentícias, ou seja, aglomerantes, adições minerais, agregados miúdos, aditivos químicos, fibras e água. A simplicidade dos insumos de um ECC possibilita a produção deste compósito em, praticamente, qualquer lugar, apesar de que a dosagem exige um bom conhecimento técnico. Tecnologistas acostumados à dosagem de argamassas e concretos podem encontrar dificuldades na produção do ECC, uma vez que a concepção é baseada na ductilidade (multifissuração controlada), e não nas resistências.

A diferença mais perceptível entre as argamassas cimentícias convencionais e o ECC é a adição de altos teores de fibras poliméricas (~ 2,0 a 3,0% em volume), alto consumo de pozolanas e baixo consumo de agregados miúdos. Visto que a resistência à compressão do ECC pode atingir facilmente 80 MPa, a baixa relação água-aglomerante é inevitável, resultando na inserção de aditivos químicos dispersantes de grande eficiência, como os superplastificantes de quarta geração (à base de policarboxilato). Outros aditivos também podem ser adicionados na mistura, tais como os incorporadores de ar ou modificadores de viscosidade.

5

DOSAGEM E MISTURA DOS MATERIAIS

Diante da disponibilidade dos materiais apresentados, é importante destacar que não existe uma proporção ideal para formular um compósito que atenda todas as condições de aplicação. Portanto, para cada caso, o ECC necessita de dosagens independentes, alterando as proporções dos insumos. A concepção do traço do compósito vai além da trabalhabilidade e resistência à compressão. A proporção dos materiais é pensada para que haja ocorrência da microfissuração e a compatibilidade entre as fibras poliméricas e matriz cimentícia.

O ECC pode ser produzido para que atenda diferentes níveis de consistência, sendo: secos, plásticos ou fluídos (autoadensáveis). Os compósitos de consistência seca são utilizados para a extrusão de artefatos, como, por exemplo, tubulações. Já o ECC de consistência plástica foram os primeiros a serem desenvolvidos e aplicados para concretagens *in loco* e para a indústria de pré-fabricados. Porém, misturas plásticas diminuem a velocidade de concretagem, demandam maior mão de obra e necessitam de vibração mecânica. Diante de algumas desvantagens, a reologia do ECC evoluiu para compósitos mais fluídos, chegando nos autoadensáveis. Para a produção de peças pré-fabricadas, o ECC autoadensável

6

PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

Para o ECC, as propriedades mecânicas relacionadas à tração são as mais relevantes. No entanto, esta não deve ser a única preocupação, uma vez que também devem ser conhecidas a resistência à compressão, fadiga, fluência, resistência de aderência, entre outras. No mesmo sentido, as propriedades físicas também precisam ser quantificadas, como a absorção de água, índice de vazios, porosidade, densidade de massa, entre outras; visando à durabilidade do sistema com o ECC.

Muitas definições de projeto consideram as propriedades do ECC com base em resultados aos 28 dias. No entanto, quais são as alterações mecânicas e físicas que o compósito pode apresentar ao longo do tempo? Há diminuição ou aumento da ductilidade do ECC durante sua vida útil?

Diante disto, este capítulo trará todos os parâmetros necessários para que se tenha entendimento das propriedades do ECC.

7

PROPRIEDADES ESPECIAIS

O ECC é considerado um compósito cimentício multifuncional. Existem algumas propriedades especiais que podem ser incorporadas ao ECC, como a autolimpeza. Outras já são autogênicas e inerentes ao compósito, como a autocicatrização e autorregeneração. Portanto, além de apresentar ductilidade, o ECC pode ter o complemento de outras características que ampliam seu campo de aplicação. Quando estas funções são consideradas na concepção do compósito, asseguram-se condições para que as construções conservem seu desempenho por mais tempo. Assim, esse subcapítulo discute as propriedades especiais que podem ser concebidas ao ECC.

7.1 Autocicatrização e autorregeneração

Nos compostos cimentícios, a autocicatrização pode ser dividida em dois métodos, o autógeno e autônomo. A cicatrização autógena ocorre por meio de agentes que exercem mais de uma função na matriz cimentícia, como as pozolanas. Estas são, muitas vezes, adicionadas para diminuição do consumo de cimento, ganho de resistência ao longo do tempo e podem atuar como agente principais de cicatrização na matriz.

8

DURABILIDADE DO ECC

A deterioração das estruturas de concreto armado afeta muitas obras de infraestrutura de transporte, como pontes, viadutos, túneis e rodovias. Também há indícios de degradação precoce nas estruturas de edificações, como prédios residenciais, comerciais e institucionais. Sendo o concreto armado um dos grandes responsáveis pelos avanços na construção mundial, é importante destacar que sua durabilidade pode estar vulnerável quando as construções não possuem um projeto adequado e manutenção adequada.

Praticamente todas as estruturas em concreto armado passarão por uma restauração e melhoria, pois o desgaste é um fenômeno natural. As preocupações voltam-se quando o desgaste é acelerado e as manutenções corretivas passam a ser mais constantes. No cenário das obras de infraestrutura no Brasil, muitas vezes, conseguir recursos para realizar a manutenção é um grande desafio.

Muitos mecanismos de degradação nas estruturas de concreto armado desenvolvem-se devido aos índices de fissuração das peças, sendo um deles a corrosão das armaduras. O produto da corrosão é expansivo e provoca o aumento das fissuras na região danificada até que ocorra o deslocamento de concreto do cobrimento. Uma vez que o cobrimento

9

DUCTILIDADE DO ECC AO LONGO DO TEMPO

Já existem construções contendo ECC como material estrutural, com VUP de 75 anos, mesmo o material tendo sido concebido há poucos anos. Pesquisadores, como Boshoff e Van Zijl (2007) e Lepech e Li (2008), perceberam a necessidade de entender o comportamento destes compósitos ao longo do tempo, sendo uma relevante lacuna de pesquisa. Neste sentido, é importante esclarecer em qual idade há a estabilização da ductilidade do ECC. Ou seja, qual a capacidade de deformação “final” do ECC a longo prazo?

Trabalhos como os de Lepech e Li (2006) já estimaram a perda de até 40% da capacidade de deformação do ECC com fibras hidrofílicas aos 180 dias em relação aos resultados obtidos nos primeiros 28 dias de idade. Já para os reforços hidrofóbicos, Lepech e Li (2006) e Yu, J. *et al.* (2018) verificaram que a deformabilidade do compósito não apresentou diminuição ao longo do tempo. Por outro lado, a interação apenas por atrito entre a fibra e a matriz limitou as contribuições do reforço ao compósito, quando comparada a uma fibra de PVA (SHEN *et al.*, 2018).

O comportamento das curvas de deformação dos compósitos com fibras de PE (hidrofóbicas) e PVA (hidrofílicas) ao longo do tempo é

10

DESAFIOS E O FUTURO DO ECC NO BRASIL

Mesmo que o ECC já esteja sendo estudado há quase 30 anos, ainda há muitas lacunas para serem esclarecidas, como é o caso do desempenho do compósito à fluência e fadiga à tração, uma vez que estas dependem especificamente das propriedades de alongamento da fibra. Também, há a necessidade de ampliar ainda mais o conhecimento das propriedades do ECC que ainda apresenta resultados incipientes, mas promissores, como: comportamento ao fogo e resistência residual, capacidade de regeneração, perda da ductilidade ao longo do tempo e ganhos na resistência de aderência das fibras hidrofóbicas à matriz. No entanto, para avançar com o assunto, é preciso de um tempo de maturação, a fim de que as respostas sejam assertivas e indiquem os resultados reais do ECC nas diferentes condições analisadas.

A partir de 2010, o número de pesquisas, publicações e aplicações reais do ECC aumentou consideravelmente, o que despertou a curiosidade de mais pessoas, empresas e órgãos pelo mundo. Em alguns países, como é o caso dos Estados Unidos e Japão, o assunto já é conhecido e debatido por comitês técnicos, além da solução ECC ser aceita pelo mercado. Não é atoa que estes dois países são referência no tema, uma