

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARINA PRATA MELO

**USO COMBINADO DE FIBRAS DE PVA E PP EM MATRIZES
COM FÍLER CALCÁRIO E METACULIM: EFEITO NAS
PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS
ENGENHEIRADOS**

Uberlândia, 2026

MARINA PRATA MELO

**USO COMBINADO DE FIBRAS DE PVA E PP EM MATRIZES
COM FÍLER CALCÁRIO E METACAILIM: EFEITO NAS
PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS
ENGENHEIRADOS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas e Construção Civil

Orientadora: Prof. Dra. Eliane Betânia Carvalho Costa

Uberlândia, 2026

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

M528
2026

Melo, Marina Prata, 1998-
Uso combinado de fibras de PVA e PP em matrizes com fíler
calcário e metacaulim: efeito nas propriedades de compósitos
cimentícios engenheirados [recurso eletrônico] / Marina Prata
Melo. - 2026.

Orientadora: Eliane Betânia Carvalho Costa.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Civil.
Modo de acesso: Internet.
DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.148>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. I. Costa, Eliane Betânia Carvalho ,1982-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação
em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 328, PPGECC				
Data:	05 de fevereiro de 2026	Hora de início:	08:40	Hora de encerramento:	11:20
Matrícula do Discente:	12322ECV008				
Nome do Discente:	Marina Prata Melo				
Título do Trabalho:	Uso combinado de fibras de PVA e PP em matrizes com fíler calcário e metacaulim: efeito nas propriedades de compósitos cimentícios engenheirados				
Área de concentração:	Construção Civil, Estruturas e Geotecnia				
Linha de pesquisa:	Construção Civil				
Projeto de Pesquisa de vinculação:					

Reuniu-se, em sessão pública por webconferência e na Sala de Reuniões, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Rui Barbosa de Souza - UFS, Leila Aparecida de Castro Motta - UFU e Eliane Betânia Carvalho Costa, orientadora da candidata.

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa, Eliane Betânia Carvalho Costa, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Eliane Betânia Carvalho Costa, Professor(a) do Magistério Superior**, em 05/02/2026, às 11:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leila Aparecida de Castro Motta, Professor(a) do Magistério Superior**, em 05/02/2026, às 11:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rui Barbosa de Souza, Usuário Externo**, em 13/02/2026, às 14:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7035000** e o código CRC **31D23551**.

*À minha mãe, Cláudia Prata (in memoriam), por
ter sido meu maior exemplo.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora, Eliane, por todo o apoio, dedicação e paciência ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Obrigada por tornar essa caminhada mais leve e por me proporcionar espaço e confiança para que eu pudesse evoluir como aluna e como profissional. Sua orientação foi, e continua sendo, um exemplo que eu levarei comigo e que desejo seguir.

À minha mãe, Cláudia Prata, que, embora não esteja mais aqui, me moldou como pessoa e me apoiou quando escolhi seguir o curso de Engenharia Civil. Grande parte dessa conquista é sobre você e sobre a mulher forte que você me ensinou a ser.

Ao meu pai, Mário Filho, e ao meu irmão, Mário Roberto, dois exemplos de professores que me fazem honrar ainda mais a docência. Obrigada por me ouvirem e me apoiarem. Sem vocês eu não teria chegado tão longe.

Aos meus amigos Guilherme, Maria Clara e Lucas, obrigada pelo amparar, pelos momentos de alegria e descontração e por todo o cuidado. Estar com vocês faz o mundo parecer um lugar muito melhor. Espero sempre compartilhar com vocês momentos especiais.

Ao meu colega de mestrado e amigo Thiago Ranilson, pela parceria e pelo apoio durante os períodos de aula e na etapa experimental, auxiliando na caracterização dos materiais e na moldagem dos corpos de prova.

Aos técnicos e laboratórios da FECIV pela colaboração no desenvolvimento da pesquisa: Cristiane (Laboratório de Estruturas), Wanderly (Laboratório de Materiais) e Alisson (Laboratório de Geotecnia).

À Universidade Técnica de Braunschweig (TU Braunschweig) pelo fornecimento das fibras poliméricas, indispensáveis para a realização desta pesquisa, e pelo apoio ao longo do desenvolvimento do estudo, especialmente ao professor Ralf Jänicke, à pós-doutoranda Thamara Lima e ao doutorando Urs Buegger.

À Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia pela disponibilização da mufla para os ensaios de caracterização (Núcleo de Processos Biotecnológicos – NUCBIO); ao Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura (LAMEV) e ao Laboratório Multiusuário em Energias Renováveis (LAMER), nos quais foram realizados os ensaios de caracterização dos materiais, pelos técnicos Rafael Heilbuth e Cristiane Fonseca; ao Laboratório de Separação de Sólido-Fluido (LASSF), onde foram realizados os ensaios de granulometria a laser, com o auxílio do pós-doutorando José Alair.

Ao Laboratório de Química dos Materiais (UFU - Campus Pontal) e à técnica Carolina Rodrigues; ao Laboratório de Caracterização dos Materiais; aos técnicos Roni dos Santos e Flaysner Magayver; à professora Livia Agostinho e ao Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília (LEM/UnB) pela realização do ensaio Chapelle Modificado.

Às professoras Leila Motta e Andrielli Oliveira pela participação na banca de qualificação e pelas contribuições na melhoria deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela bolsa de estudos concedida, que me permitiu dedicar em tempo integral para a realização do mestrado.

RESUMO

Os compósitos cimentícios engenheirados (ECC) são materiais reforçados por fibras caracterizados pela elevada ductilidade e comportamento de enrijecimento por deformação. A formulação típica desses compósitos emprega cinza volante em substituição parcial ao cimento e 2% de fibras de álcool polivinílico (PVA). No entanto, a disponibilidade irregular de cinza volante em algumas regiões, somada ao custo elevado das fibras de PVA tem estimulado a busca por alternativas mais viáveis e sustentáveis. Diante desse contexto, este trabalho teve como objetivo investigar o impacto da substituição total de cinza volante por combinação de metacaulim e filer calcário na matriz de ECC, bem como avaliar o efeito da combinação de fibras de PVA e polipropileno (PP) nas propriedades do compósito. O programa experimental foi desenvolvido em duas etapas: (1) formulação de matrizes com substituição total de cinza volante por metacaulim e filer calcário nas proporções (1M1C e 1M2C), determinando-se o teor de superplastificante por ensaio de mini abatimento; e (2) estudo da combinação das fibras de PVA e PP em substituições volumétricas de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%) em duas matrizes distintas. Os resultados mostraram que a matriz contendo metacaulim e filer calcário (1M2C) apresentou trabalhabilidade e resistência mecânica similares à matriz de referência (M45), tornando-a uma alternativa viável. A combinação de fibras afetou significativamente o comportamento dos compósitos. A mistura com 1,5% PVA e 0,5% PP (1,5A_0,5P) ofereceu o melhor equilíbrio entre resistência e ductilidade. O aumento do teor de PP reduziu a trabalhabilidade e a resistência à flexão, mas aumentou a capacidade de deformação. A análise microestrutural confirmou mecanismos de falha distintos: ruptura das fibras de PVA e arrancamento (*pull-out*) das fibras de PP. O uso combinado de metacaulim e filer calcário mostrou-se viável em substituição a cinza volante na produção de ECC. A combinação de fibras permite ajustar as propriedades do ECC para atender a requisitos específicos de aplicação.

Palavras-chave: *fibras combinadas, metacaulim, filer calcário, ductilidade, tenacidade.*

ABSTRACT

Engineered Cementitious Composites (ECC) are fiber-reinforced materials characterized by high ductility and strain-hardening behavior. The typical formulation of these composites employs fly ash as a partial cement replacement and 2% polyvinyl alcohol (PVA) fibers. However, the irregular availability of fly ash in some regions, combined with the high cost of PVA fibers, has driven the search for more viable and sustainable alternatives. In this context, this work aimed to investigate the impact of fully replacing fly ash with a combination of metakaolin and limestone filler in the ECC matrix, as well as to evaluate the effect of hybridizing PVA and polypropylene (PP) fibers on the composite's properties. The experimental program was developed in two stages: (1) formulation of matrices with full replacement of fly ash by metakaolin and limestone filler in proportions (1M1C and 1M2C), determining the superplasticizer content by mini-slump test; and (2) study of the hybridization of PVA and PP fibers at volumetric substitution levels of 0%, 25%, 50%, 75%, and 100% in two distinct matrices. The results showed that the matrix containing metakaolin and limestone filler (1M2C) exhibited workability and mechanical strength similar to the reference matrix (M45), making it a viable alternative. Fiber hybridization significantly affected the composite's behavior. The mixture with 1.5% PVA and 0.5% PP (1.5A_0.5P) offered the best balance between strength and ductility. Increasing the PP content reduced workability and flexural strength but increased deformation capacity. Microstructural analysis confirmed distinct failure mechanisms: rupture of PVA fibers and pull-out of PP fibers. The combined use of metakaolin and limestone filler proved viable for replacing fly ash in ECC production. Fiber hybridization allows the adjustment of ECC properties to meet specific application requirements.

Keywords: *hybrid fibers, metakaolin, limestone filler, ductility toughness.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curvas tensão-deformação à tração do concreto, FRCC e ECC.....	23
Figura 2 – Curva tensão-deformação típica do ECC e desenvolvimento da fissuração do compósito.	24
Figura 3 – Uso de vigas de ECC em núcleos estruturais: (a) projeto do núcleo estrutural com vigas em ECC; e (b) edifício Nabule Yokohama.....	26
Figura 4 – Laje de ligação: (a) imediatamente após a construção e abertura do tráfego em 2005; e (b) leve abrasão na superfície da laje de ligação após 10 anos de uso.	27
Figura 5 – Represa Mitaka na província de Hiroshima, Japão: (a) barragem Mitaka; (b) danos causados no concreto pela erosão no montante da represa.....	28
Figura 6 – Propriedades mecânicas de fibras utilizadas na produção de compósitos cimentícios engenheirados (ECC).....	40
Figura 7 – Tipos de fibras aplicadas de modo isolado em ECC no período de 2018 a 2024. ...	40
Figura 8 – Estrutura química da fibra de PVA.....	41
Figura 9 – Levantamento do uso de fibras isoladas e híbridas de ECC (2018 – 2023).....	44
Figura 10 – Levantamento do uso de fibras combinadas no período de 2018 a 2024.....	45
Figura 11 – Costura de fissuras em compósitos de fibras combinadas: (a) influência das fibras curtas em microfissuras; e (b) comportamento das fibras longas nas macrofissuras.	46
Figura 12 – Fluxograma das etapas desenvolvidas no programa experimental	50
Figura 13 – Fluxograma caracterização dos materiais usados no ECC.....	51
Figura 14 – Fluxograma dos procedimentos experimentais da Etapa 1.	52
Figura 15 – Fluxograma dos procedimentos experimentais da Etapa 2.	52
Figura 16 – Difrátogramas obtidos para o cimento, cinza volante, metacaulim e fíler calcário.	56
Figura 17 – Curvas de termogravimetria dos materiais finos na forma anidra: (a) cimento; (b) cinza volante; (c) metacaulim; e (d) fíler calcário.	59
Figura 18 – Distribuição das dimensões das partículas do cimento, cinza volante, metacaulim e fíler calcário utilizados na produção do ECC.....	61
Figura 19 – Morfologia das fibras de PVA e PP: (a) PVA; (b) PP; (c) imagem MEV das fibras de PVA; e (d) imagem MEV das fibras de PP.	63
Figura 20 – Distribuição granulométrica da areia natural.	63

Figura 21 – Curvas teor de aditivo versus espalhamento medidos pelo ensaio de mini abatimento das misturas M45, 1M1C e 1M2C.	69
Figura 22 – Ensaio de mini abatimento da pasta M45: (a) 0,1% SP; (b) 0,2% SP; (c) 0,3% SP; (d) 0,4% SP; (e) 0,5% SP; (f) 0,6% SP; (g) 0,7% SP; (h) 0,8% SP.....	70
Figura 23 – Ensaio de mini abatimento da pasta 1M1C: (a) 1,3% SP; (b) 1,4% SP; (c) 1,5% SP; (d) 1,6% SP; (e) 1,7% SP; (f) 1,8% SP; (g) 1,9% SP; (h) 2,1% SP.....	71
Figura 24 – Ensaio de mini abatimento da pasta 1M2C: (a) 0,9% SP; (b) 1,0% SP; (c) 1,1% SP; (d) 1,2% SP; (e) 1,3% SP; (f) 1,4% SP; (g) 1,5% SP; (h) 1,6% SP.....	71
Figura 25 – Curvas de TG: (a) 7 dias; (b) 28 dias; (c) 56 dias; e (d) 91 dias; e DTG: (e) 7 dias; (f) 28 dias; (g) 28 dias; e (h) 91 dias das matrizes M45, 1M1C e 1M2C.....	75
Figura 26 – Influência da idade nos teores de: (a) AQC; e (b) Ca(OH)_2 , das matrizes M45, 1M1C e 1M2C.....	76
Figura 27 – Índice de consistência para a formulação M45_2,0A_0,0P para diferentes teores de superplastificante (a) 0,40%; (b) 0,30%.	79
Figura 28 – Índice de consistência para a formulação M45_0,0A_2,0 considerando diferentes teores de superplastificante: (a) 0,5%; (b) 0,8%; (c) 0,83%; (d) 0,9%. A seta amarela indica exsudação.....	79
Figura 29 – Índice de consistência da formulação 1M2C_2_PVA considerando diferentes teores de SP (a) 1,4%; (b) 1,2%; (c) 1,0%; (d) 0,95%.	80
Figura 30 – Índice de consistência da formulação 1M2C_0,0A_2,0P para diferentes teores de superplastificante: (a) 1,0%; (b) 1,05%; (c) 1,10%.	80
Figura 31 – Índice de consistência das formulações híbridas: (a) 1M2C_1,0A_1,0P (1,10%SP); (b) 1M2C_0,5A_1,5P (1,10% SP).....	81
Figura 32 – Ensaio de resistência à tração na flexão em quatro pontos: (a) configuração do ensaio; (b) posicionamento do extensômetro (<i>clip gauge</i>) utilizado no ensaio.....	83
Figura 33 – Pontos característicos da curva tensão x deformação.	84
Figura 34 – Efeito da hibridização das fibras de PVA/PP no índice de consistência de compósitos cimentícios para as matrizes M45 e 1M2C.	87
Figura 35 – Teor de ar incorporado em função do teor de fibras de PVA no ECC-M45 e ECC-1M2C híbridos.....	89
Figura 36 – Resistência à compressão dos compósitos híbridos em função do teor de fibra de PVA para matrizes M45 e 1M2C. (Nota: O teor de fibras de PP varia inversamente).	91
Figura 37 – Curva tensão x deformação dos compósitos híbridos com a matriz: (a) M45 e (b) 1M2C.....	92

Figura 38 – Curva tensão x deformação para o ECC-M45 com fibras isoladas: (a) PVA e (b) PP, sob diferentes teores de superplastificante.	94
Figura 39 – Fator de energia inicial (E_m) e índice de tenacidade à flexão pós-pico (I_{post}) dos compósitos (a; b) ECC-M45 e (c, d) ECC-1M2C.	95
Figura 40 – Cinética de absorção de água dos compósitos híbridos para as matrizes (a) M45 e (b) M45 com fibras isoladas sob diferentes teores de superplastificante.	97
Figura 40 – Cinética de absorção de água dos ECC-1M2C.	98
Figura 42 – Imagens MEV do ECC com matriz M45 e fibras de PVA: (a, b) superfície de fratura; (c) dano no filamento; (d) ligação interfacial fibra/matriz; e fibras PP (e, f) superfície de arrancamento (<i>pull-out</i>); (g) superfície da fibra; e (h) ligação interfacial fibra/matriz.	99
Figura 43 – Imagens MEV do ECC com matriz 1M2C e fibras de PVA: (a, b) superfície de fratura; (c) dano no filamento; (d) ligação interfacial fibra/matriz; e fibras de PP: (e, f, g) superfície de arrancamento (<i>pull-out</i>); e (h) ligação interfacial fibra/matriz.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Formulação M45 do ECC.	30
Tabela 2 – Aplicações de calcário e metacaulim em ECC.	34
Tabela 3 – Teores de calcário e metacaulim no ECC.	35
Tabela 4 – Resultados mecânicos do ensaio de tração do ECC com calcário e argila calcinada	38
Tabela 5 – Características físicas e mecânicas das fibras de PVA e PP.	42
Tabela 6 – Intervalo de teores das fibras de PVA e PP utilizados na formulação do ECC.	43
Tabela 7 – Teores de fibras combinadas no ECC.	47
Tabela 8 – Características físicas e mecânicas das fibras de PVA e PP encontradas na literatura.	48
Tabela 9 – Composição química do cimento e adições utilizados.	55
Tabela 10 – Compostos identificados no cimento Portland, cinza volante, metacaulim e fíler calcário por DRX.	57
Tabela 11 – Médias e desvios padrão do índice de atividade pozolânica da cinza volante e do metacaulim.	58
Tabela 12 – Massa específica e área superficial dos materiais finos que compõem o ECC. ...	60
Tabela 13 – Diâmetros D10, D50 e D90 dos materiais finos que compõem o ECC.	62
Tabela 14 – Características físicas e mecânicas das fibras de PVA e PP utilizadas no ECC.	62
Tabela 15 – Características físicas da areia natural.	64
Tabela 16 – Traço unitário em massa para as matrizes cimentícias estudadas: Etapa 1.	66
Tabela 17 – Teor de aditivo utilizado e os respectivos diâmetros médios pelo mini espalhamento para as misturas M45, 1M1C e 1M2C.	70
Tabela 18 – Resultados médios de resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico e desvio padrão das matrizes, aos 7, 28, 56 e 91 dias.	72
Tabela 19 – Traço unitário em massa dos compósitos cimentícios estudados	81
Tabela 20 – Propriedades do ECC-M45 e do ECC-1M2C no estado fresco.	86
Tabela 21 – Propriedades mecânicas dos compósitos híbridos (M45 e 1M2C) aos 56 dias. ...	89

LISTA DE SÍMBOLOS

f_o – Resistência à primeira fissura

f_u – Resistência à tração última

ε_t – Capacidade de deformação à tração

E_m – Fator de energia inicial

I_{post} – Índice de tenacidade à flexão pós-pico

f_c – Resistência à compressão

$f_{m,3p}$ – Resistência à tração na flexão pelo ensaio de três pontos

$f_{m\acute{a}x.,4p}$ – Resistência máxima à tração na flexão pelo ensaio de quatro pontos

$\delta_{m\acute{a}x.,4p}$ – Deflexão no meio do vão correspondente à carga máxima

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – Sociedade Americana de Testes Materiais

Al_2O_3 – Óxido de alumínio

BET – Método Brunauer, Emmet e Teller

BF – Fibra de basalto

C_3S – silicato tricálcico (alita)

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou CH – Hidróxido de cálcio (portlandita)

C-A-S-H – Silício aluminato de cálcio hidratado

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

CV – Cinza volante

CaO – Óxido de cálcio

CaCO_3 – Carbonato de cálcio

CPV ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial

CRF – Concreto reforçado por fibras

D10 – Diâmetros correspondente a 10% das partículas

D50 – Diâmetro médio das partículas

D90 – Diâmetro correspondente a 90% das partículas

DRX – Difração de raio X

ECC – Compósitos cimentícios engenheirados

Fe_2O_3 – Óxido férrico

FRX – Fluorescência de raio X

FC – Fíler calcário

HRWR – Aditivo redutor de água de alta performance

LAMER – Laboratório Multiusuário em Energias Renováveis

LME – Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência

LC3 – Cimento de argila calcinada e calcário

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

MK – Metacaulim

M45 – Formulação típica do ECC

MgO – Óxido de magnésio

1M1C – Matriz de metacaulim e fíler calcário nas proporções 1:1

1M2C – Matriz de metacaulim e filler calcário nas proporções 1:2

NUCBIO – Núcleo de Processos Biotecnológicos

Na₂O – Óxido de sódio

PVA – Álcool polivinílico

PP – Polipropileno

PE – Polietileno

PET – Polietileno tereftalato

SiO₂ – Dióxido de silício

SO₃ – Trióxido de enxofre

SF – Fibra de aço

SMA – Liga com memória de forma

SAP – Polímero absorvente

SCM – Material cimentício suplementar

SP – Aditivo superplastificante

SHCC – Compósitos cimentícios com enrijecimento por deformação

TG/DTG – Termogravimetria e termogravimetria derivada

ULECC – Compósito cimentício engenheirado ultraleve

VMA – Aditivo modificador de viscosidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVOS.....	22
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2	COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS ENGENHEIRADOS (ECC)	23
2.1	APLICAÇÕES DO ECC.....	25
2.2	COMPOSIÇÃO DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS ENGENHEIRADOS	28
2.3	USO DA CINZA VOLANTE NO ECC	30
2.4	USO COMBINADO DE METACAULIM E FÍLER CALCÁRIO EM ECC	31
2.4.1	Efeito do metacaulim e fíler calcário nas propriedades do ECC no estado fresco.....	34
2.4.2	Efeito do metacaulim e fíler calcário nas propriedades mecânicas do ECC	37
2.5	FIBRAS UTILIZADAS NA FORMULAÇÃO DO ECC	39
2.5.1	Uso isolado de fibras de PVA e PP	41
2.5.2	Uso híbrido de fibras	43
3	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL: VISÃO GERAL	50
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	51
3.2	ETAPA 1: FORMULAÇÃO DE MATRIZES CIMENTÍCIAS	51
3.3	ETAPA 2: FORMULAÇÃO DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS ENGENHEIRADOS	52
4	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	54
4.1	FINOS: CIMENTO E MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES	54
4.1.1	Fluorescência de Raios X (FRX).....	54
4.1.2	Difração de Raios X	56
4.1.3	Método Chappelle Modificado.....	57
4.1.4	Análise termogravimétrica (TG/DTG).....	58
4.1.5	Massa específica, área superficial e distribuição granulométrica	60
4.2	FIBRAS POLIMÉRICAS	62
4.3	AGREGADO MIÚDO	63
4.4	ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE E ÁGUA	64
4.5	CONCLUSÕES PARCIAIS	64
5	ESTUDO EM MATRIZES	66
5.1	MATRIZES ESTUDADAS.....	66
5.2	MÉTODOS DE ENSAIO	67

5.2.1	Determinação do teor ótimo de aditivo	67
5.2.2	Comportamento mecânico das matrizes.....	67
5.2.3	Análise termogravimétrica (TG/DTG).....	68
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
5.3.1	Determinação do teor ótimo de aditivo superplastificante.....	69
5.3.2	Comportamento mecânico das matrizes.....	72
5.3.3	Análise termogravimétrica (TGA/DTG).....	74
5.4	CONCLUSÕES PARCIAIS	77
6	ESTUDO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS ENGENHEIRADOS.....	78
6.1	FORMULAÇÃO DOS COMPÓSITOS.....	78
6.2	PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS	81
6.3	MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA	82
6.4	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS	82
6.5	PERMEABILIDADE DOS COMPÓSITOS.....	85
6.6	ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	85
6.7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
6.7.1	Propriedades no estado fresco	85
6.7.2	Propriedades no estado endurecido	89
6.7.3	Permeabilidade	97
6.7.4	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	99
6.8	CONCLUSÕES PARCIAIS	100
7	CONCLUSÃO	103
7.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	104

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil (Zhu *et al.*, 2020; Kumar e Saini, 2023), entretanto apresenta desvantagens, como seu comportamento frágil e baixa resistência à tração. Com o objetivo de mitigar essas limitações, pesquisadores (Li, 2019; Hou e Li, 2023; Chen *et al.*, 2024) têm sugerido o uso de concretos reforçados por fibras, como os compósitos cimentícios engenheirados (ECC), que combinam tenacidade e ductilidade devido ao seu enrijecimento por deformação (*strain-hardening*¹).

Os ECC são materiais de elevada ductilidade, com uma deformação de tração última superior a 2%, o que representa duas ordens de magnitude a mais do que o concreto convencional (Li, Wang e Wu, 2001; Li, 2019). Esses materiais apresentam enrijecimento por deformação e são capazes de formar múltiplas fissuras com dimensões de até 100 µm (Li, 2008).

A formulação típica de ECC é baseada na mistura M45 proposta por Li (2008), sendo composta por cimento Portland, cinza volante, agregado miúdo, água, aditivos superplastificantes e fibra de álcool polivinílico (PVA), em teores de aproximadamente 2% por volume (Li, 2008; Li *et al.*, 2002). Em um levantamento bibliográfico (2018-2024) (Melo, Tofeti e Costa, 2024), verificou-se que cerca de 20% dos estudos analisados utilizaram a formulação M45. Além desses, outros artigos adotaram versões adaptadas da formulação, com variações no teor de cinza volante (Deng e Yang, 2018; Zhuang *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2022).

A utilização da cinza volante como material cimentício suplementar (SCM) no ECC apresenta vantagens, especialmente no comportamento de enrijecimento por deformação. Esse material contribui para a redução do atrito interfacial entre a matriz do compósito e as fibras de PVA, além de diminuir a tenacidade da matriz, o que favorece a abertura de microfissuras e, consequentemente, o comportamento dúctil do material (Wang e Li, 2007). Adicionalmente, a incorporação da cinza volante auxilia na redução do calor de hidratação (Yu, Li e Leung, 2018), da retração (Deng *et al.*, 2023) e do custo de produção do material (Yu, Li e Leung, 2018).

Apesar das vantagens do seu uso, a disponibilidade da cinza volante é limitada em algumas regiões (Chen *et al.*, 2024) e é possível que seu uso se torne insustentável a longo prazo, considerando a progressiva desativação de usinas termelétricas. Nesse contexto, torna-se necessário investigar novos materiais cimentícios suplementares que possam substituir a cinza volante na composição do ECC sem comprometer suas propriedades mecânicas.

¹ Embora o termo conhecido na literatura seja *strain hardening*, neste trabalho optou-se por usar a expressão enrijecimento por deformação.

A argila calcinada e o calcário são materiais amplamente disponíveis em escala global e apresentam baixo teor de carbono e energia incorporada (Zhu *et al.*, 2022). A combinação desses dois materiais tem sido estudada por pesquisadores (Zhang *et al.*, 2020; Yu, Wu e Leung, 2020; Wang *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2024) na formulação do ECC como substituição parcial do cimento, em razão da melhoria na formação dos produtos de hidratação (Qian *et al.*, 2023). Apesar dos avanços associados ao uso dessas adições, pouco se estuda sobre o efeito da substituição total da cinza volante no ECC sem alteração no teor de cimento.

Além do uso dos SCMs, outra estratégia eficaz no aprimoramento das propriedades dos compósitos é a hibridização das fibras. A hibridização consiste na combinação de duas ou mais fibras na matriz cimentícia do ECC, visando alcançar elevada ductilidade e resistência à tração (Li *et al.*, 2002; Wang e Li, 2007). Essa combinação permite a combinação de propriedades distintas de diferentes tipos de fibras, permitindo a otimização do desempenho mecânico e da fissuração do ECC.

As fibras de PVA são as mais utilizadas na formulação do ECC (Pan *et al.*, 2015; Guan *et al.*, 2023), em razão de sua elevada resistência à tração (1500 – 1650 MPa) (Yıldırım *et al.*, 2018; Al-Gemeel, Zhuge e Youssf, 2019) e da forte adesão físico-química com a matriz cimentícia (Bentur e Mindess, 2007). Compósitos reforçados exclusivamente com fibras de PVA apresentam elevada resistência à primeira fissuração e podem alcançar deformações à tração totais da ordem de 3% a 6% (Li *et al.*, 2002), com aberturas médias de fissuras entre 50 a 100 μm (Li, 2019). Embora em baixo volume, a energia incorporada, a elevada pegada de carbono e o custo associados à fibra de PVA limitam sua aplicação em larga escala (Hu *et al.*, 2024).

As fibras de polipropileno (PP) caracterizam-se por sua natureza hidrofóbica e baixo custo (Hou e Li, 2023), apresentando resistência à tração até 850 MPa (Zhang *et al.*, 2022) e módulo de elasticidade inferiores ao das fibras de PVA. Em compósitos cimentícios, as fibras de PP contribuem para o aumento da capacidade de deformação (Tosun-Felekoglu e Felekoglu, 2013; Hou e Li, 2023). Estudos sobre o uso combinado de fibras de PVA e PP indicam que a hibridização pode melhorar a ductilidade do ECC (Pakravan, Latifi e Jamshidi., 2017), embora nem sempre resulte em ganhos na resistência mecânica (Lin *et al.*, 2020), além de contribuir para o controle da abertura das fissuras (Hou e Li, 2023).

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito do uso combinado de fibras de PVA e PP em matrizes com fíler calcário e metacaulim nas propriedades de compósitos cimentícios engenheirados, por meio da análise das matrizes aplicadas ao ECC e das propriedades dos compósitos com fibras combinadas nos estados fresco e endurecido. Parte-se

da hipótese de que a utilização de uma matriz composta por metacaulim e fíler calcário, aliada à substituição parcial de fibras de PVA por fibras de PP, seja capaz de manter o comportamento de enrijecimento por deformação do compósito, configurando-se, ainda, como uma alternativa viável em regiões de acesso limitado à cinza volante.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste estudo é analisar a influência do uso combinado de fibras de PVA e PP e a substituição da cinza volante por calcário e metacaulim nas propriedades de compósitos cimentícios engenheirados (ECC).

São objetivos específicos:

- Analisar a proporção metacaulim e fíler calcário nas matrizes formuladas;
- Avaliar a influência dos diferentes tipos de fibras e de suas proporções no comportamento dos compósitos cimentícios engenheirados;
- Avaliar o efeito do aditivo superplastificante nos compósitos cimentícios engenheirados com uso de fibras isoladas.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esse trabalho é estruturado em sete capítulos, tal como segue:

- Capítulo 1 – Introdução: contextualização, justificativa e objetivos do trabalho.
- Capítulo 2 – Revisão bibliográfica acerca dos compósitos cimentícios engenheirados (ECC), sua base de projeto, aplicações, composições, fibras aplicadas e principais propriedades no estado fresco e endurecido.
- Capítulo 3 – Planejamento experimental: apresentação das principais etapas do procedimento experimental e métodos de ensaio.
- Capítulo 4 – Caracterização físico-química dos materiais utilizados no estudo.
- Capítulo 5 – Estudo das matrizes: avaliação da influência da substituição total da cinza volante na matriz M45 por metacaulim e fíler calcário.
- Capítulo 6 – Estudo em Compósitos Cimentícios Engenheirados: avaliação da hibridização das fibras de PVA e PP nos compósitos com matriz composta por cinza volante e pela combinação entre metacaulim e fíler calcário.
- Capítulo 7 – Conclusões: principais resultados obtidos no estudo.

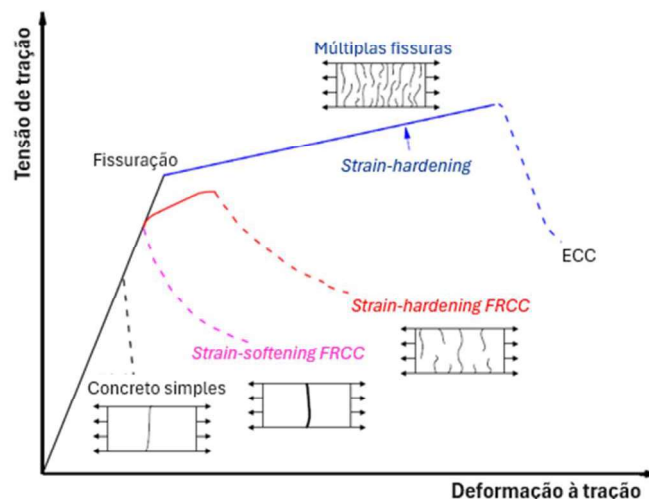
2 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS ENGENHEIRADOS (ECC)

Os compósitos cimentícios engenheirados (ECC) ou compósitos cimentícios com enrijecimento por deformação (SHCC) foram introduzidos inicialmente por Victor Li (Li e Leung, 1992; Li, Stang e Krenchel, 1993) e são materiais reforçados por fibras, geralmente em teor de 2% em volume (Li, 2008; Fahad *et al.*, 2019; Lu *et al.* 2023). A principal característica do ECC é sua elevada ductilidade, com capacidade de deformação à tração superior à 2% (Li, Wang e Wu, 2001). A combinação da ductilidade com o comportamento de enrijecimento por deformação (*strain-hardening*) é necessária para o desenvolvimento da resistência à flexão do compósito (Tosun-Felekoglu e Felekoglu, 2013).

A incorporação de fibras em materiais cimentícios é uma forma de aprimorar a resistência à flexão, a tenacidade e a ductilidade do compósito cimentício, como observado nos compósitos reforçados por fibras (CRF) (Tosun-Felekoglu e Felekoglu, 2013). O comportamento tensão *versus* deformação do concreto convencional, reforçado por fibras e do compósito cimentício engenheirado são apresentados na Figura 1.

A principal diferença entre o CRF e o ECC é o comportamento dos compósitos após a ocorrência da primeira fissura. No CRF, observa-se a redução da capacidade de carga acompanhada pelo alargamento da fissura. Em contraste, o ECC apresenta comportamento de enrijecimento por deformação, no qual o aumento da deformação à tração não se concentra em único ponto, mas se distribui ao longo de múltiplas fissuras, permitindo a recuperação e o aumento da capacidade de carga do material (Li, 2019).

Figura 1 – Curvas tensão-deformação à tração do concreto, FRCC e ECC.

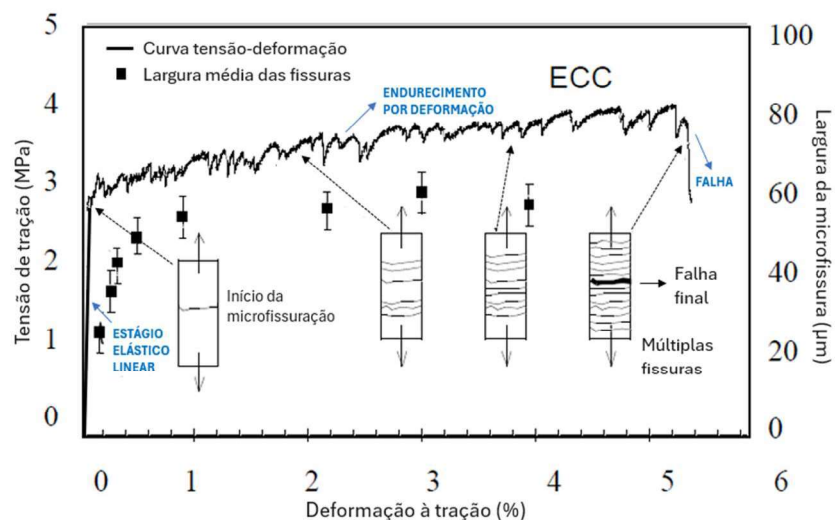


Fonte: Adaptado de Ma, Yi e Wu (2021).

O projeto do ECC fundamenta-se na micromecânica, que busca quantificar as interações mecânicas entre as fibras, a matriz e a interface fibra/matriz durante o carregamento do compósito (Li, 2019), promovendo as condições necessárias para o enrijecimento por deformação (Li, Wang e Wu, 2001).

Segundo Chen *et al.* (2024), as curvas tensão-deformação típicas do ECC exibem três estágios distintos: o elástico linear, o de enrijecimento por deformação e o de falha, conforme ilustrado na Figura 2. No primeiro estágio, o comportamento é linear, com a matriz do compósito suportando a carga sem a formação de fissuras. Esse estágio se encerra com o surgimento das primeiras microfissuras, marcando o início do estágio de enrijecimento por deformação, no qual o efeito de ponte das fibras se torna crucial. As fibras limitam a abertura das fissuras existentes e favorecem a formação de novas microfissuras. Durante a fase de enrijecimento por deformação, o compósito exibe múltiplas microfissuras com larguras estabilizadas de até 100 μm (Lepech e Li, 2009), sendo a carga máxima atingida quando ocorre a saturação das fissuras no material. No estágio de falha, a capacidade das fibras de suportar a carga entre as fissuras é ultrapassada, resultando em um aumento significativo da largura das fissuras. Nesse ponto, pode ocorrer o arrancamento ou a ruptura das fibras, levando à redução progressiva da capacidade de carga e, conseqüentemente, à falha do material.

Figura 2 – Curva tensão-deformação típica do ECC e desenvolvimento da fissuração do compósito.



Fonte: Adaptado de Li (2008).

O comportamento dos compósitos cimentícios engenheirados está relacionado à ação de ponte das fibras em fissuras, que se refere à capacidade das fibras atravessarem as fissuras da

matriz, transmitindo tensões e impedindo a sua propagação (Li, 2003). Seguindo o princípio da micromecânica, a seleção adequada da fibra para reforço do ECC não considera apenas suas características físicas e mecânicas, mas também as interações entre a fibra e a matriz cimentícia.

A distribuição das fibras na matriz cimentícia desempenha um papel fundamental na resistência do compósito, além de restringir e limitar a propagação das microfissuras. Esse mecanismo reduz a fragilidade do concreto e alterando o seu modo de falha (Aydin e Baradan, 2013). As ligações físico-químicas entre as fibras e matriz contribuem para a resistência da interface. Para otimizar essa interface, é necessário compreender a natureza da superfície das fibras e das ligações entre os dois materiais (Halvaei *et al.*, 2015).

Além de orientar a seleção dos materiais constituintes do compósito (Li *et al.*, 2024) e ajuste dos componentes, como o tipo e as dimensões das fibras (Yang e Li, 2010), a análise micromecânica também contribui para o controle de largura de fissuras em ECC com fibras combinadas (Hou e Li, 2023), para a formulação de ECC em aplicações específicas, como o ECC leve (Gou *et al.*, 2023) e para o desenvolvimento de compósitos capazes de suportar temperaturas elevadas (Zhang *et al.*, 2023).

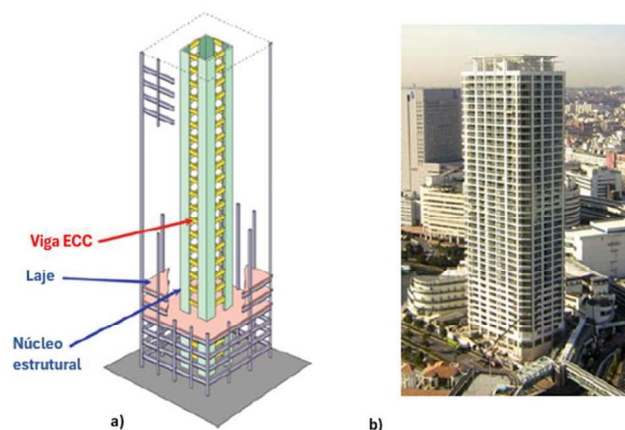
2.1 APLICAÇÕES DO ECC

As aplicações dos compósitos cimentícios engenheirados são diversas e abrangem várias áreas da construção civil. O foco de desempenho do ECC varia conforme sua aplicação, podendo abranger a resiliência estrutural, a durabilidade, a eficiência operacional ou otimização do processo construtivo (Li, 2019). Além disso, o ECC pode ser usado em reparos, *retrofit* e novas construções. A análise das aplicações é fundamental para orientar e impulsionar o desenvolvimento contínuo desse material, garantindo sua eficácia e segurança em diferentes contextos, principalmente devido às diretrizes limitadas para seu uso (Li, 2019).

O ECC é um material promissor no desempenho de estruturas sujeitas a abalos sísmicos devido às propriedades de enrijecimento por deformação e microfissuras (Ghahsareh *et al.*, 2024). Figura 3.a. No caso de edifícios altos, a utilização do ECC nas vigas de acoplamento visa melhorar o desempenho sísmico das vigas (Zhang *et al.*, 2020). No Japão, edifícios como o Glorio Tower, em Tóquio, Nabule Yokohama Tower, em Yokohama e Kitahama Tower, em Osaka, adotam vigas de acoplamento de ECC em seus núcleos estruturais (Li, 2019), como mostrado na Figura 3.b. Comparado ao concreto armado convencional, o ECC se destaca pela maior resiliência, tenacidade e ductilidade (Li, 2019; Singh e Munjal, 2020). Além disso, a

tecnologia do ECC pode ser aplicada em amortecedores de paredes não estruturais para garantir a segurança durante abalos sísmicos (Fukuyama e Suwada, 2003).

Figura 3 – Uso de vigas de ECC em núcleos estruturais: (a) projeto do núcleo estrutural com vigas em ECC; e (b) edifício Nabule Yokohama.

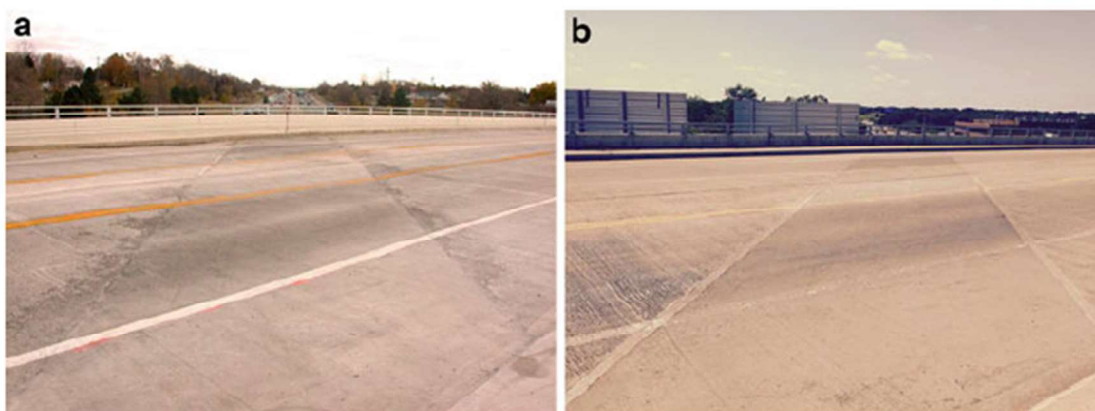


Fonte: Adaptado de Li (2009).

Diversos estudos sobre o uso do ECC têm sido realizados com o objetivo de aumentar a segurança das estruturas durante abalos sísmicos. Entre eles, destacam-se as investigações sobre junta interna viga-pilar (Yuan *et al.*, 2013), paredes de cisalhamento de placas de aço compostas (Yang, Xu e Pan, 2021), pilares com ECC reforçado por aço (Hou *et al.*, 2020; Yuan *et al.*, 2018; Zhang, Li e Deng, 2022), vigas de ECC reforçadas com aço (Ding *et al.*, 2018), estruturas em pontes (Wang *et al.*, 2018; Hou *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2021).

Lajes de tabuleiros de ponte em aço-ECC mostraram um bom desempenho à flexão (Wang *et al.*, 2018). Entretanto, o uso de ECC de alta resistência pode resultar em tensões de retração, o que pode impactar negativamente a integridade estrutural. O uso de ECC em tabuleiros de pontes sem juntas de dilatação tem sido relatado (Hou *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2021). Embora as juntas de dilatação sejam consideradas essenciais para a acomodação de movimentações estruturais, elas podem comprometer a integridade do tabuleiro da ponte (Li, 2019). Nesse sentido, o ECC, quando aplicado como laje de ligação em substituição às juntas de dilatação, pode ser uma solução promissora para mitigar esse problema. A maior tenacidade, ductilidade e a capacidade de auto recuperação desse material contribuem para selar as fissuras (Zhang, Hu e Ma, 2019). Na Figura 4 é mostrada a primeira laje de ligação de ECC do mundo, executada em 2005 em um tabuleiro de ponte no Michigan (EUA) e sua condição de uso após 10 anos.

Figura 4 – Laje de ligação: (a) imediatamente após a construção e abertura do tráfego em 2005; e (b) leve abrasão na superfície da laje de ligação após 10 anos de uso.



Fonte: Li (2019).

O ECC também pode ser utilizado em lajes, como demonstrado em um estudo recente que utilizou o compósito cimentício ultraleve (ULECC) com o objetivo de reduzir o peso próprio da laje e aprimorar o seu desempenho à flexão (Deng *et al.*, 2023).

Os elementos de ECC apresentam desempenho satisfatório sob impactos de baixa velocidade, devido à capacidade de restringir a ruptura frágil, mantendo a integridade estrutural (Yang e Li, 2012). Em altas velocidades, os painéis de ECC apresentaram menor danos e maior capacidade de absorção de energia em relação aos painéis de concreto simples (Maalej, Quek e Zhang, 2005). Em um estudo sobre a resistência à explosão de painéis de ECC, verificou-se que há uma diminuição do diâmetro das crateras e da esfoliação em comparação à painéis de concreto armado normal (Chilvers *et al.*, 2020).

A permeabilidade das estruturas de ECC é baixa devido à estreita largura de fissuras e pode ser ainda menor devido à capacidade de autocicatrização do material (Li, 2019). Assim, estruturas hidráulicas construídas com esse compósito são eficazes em manter a estanqueidade. Exemplos dessa aplicação foi adotado no reparo de duas barragens: Mitaka e Usina Hidrelétrica Hohenwarte II.

A barragem Mitaka (Figura 5), localizada na província de Hiroshima, sofreu danos pela abrasão da água e passou por uma elevação da altura, além de ter sua face montante protegida com uma camada de ECC para resistir à penetração de água (Rokugo *et al.*, 2009). Na Usina Hidrelétrica Hohenwarte II, na Alemanha, um reparo foi realizado na junta de bloco devido a um vazamento, utilizando ECC aplicado por *spray* na face montante da barragem (Muller e Mechtcherine, 2018). Quatro anos após o reparo, verificou-se que o ECC foi eficaz em suprimir a formação de fissuras (Li, 2019).

Figura 5 – Represa Mitaka na província de Hiroshima, Japão: (a) barragem Mitaka; (b) danos causados no concreto pela erosão no montante da represa.



Fonte: Li (2019).

Como demonstrado, o ECC pode ser utilizado em diferentes áreas da construção civil, desempenhando um papel importante na segurança, durabilidade, recuperação rápida após eventos adversos. Além disso, a formulação do ECC permite que ele seja adaptado às necessidades específicas da estrutura e ao ambiente em que será utilizado.

2.2 COMPOSIÇÃO DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS ENGENHEIRADOS

Os compósitos cimentícios engenheirados são compostos principalmente por finos, agregado miúdo, água, aditivos químicos e fibras. Os finos incluem tanto o cimento quanto os materiais cimentícios suplementares (SCM), principalmente a cinza volante (Ghahsareh *et al.*, 2024). O teor de cimento, geralmente de duas a três vezes superior ao dos concretos convencionais, é fundamental para o controle da tenacidade da matriz (Wang e Li, 2007). A cinza volante é frequentemente utilizada em proporção superior a massa de cimento (Al-Fakih *et al.*, 2023).

Os agregados utilizados são predominantemente miúdos (Li, 2012), com diâmetro máximo de 250 μm (Li, 2008; Huang *et al.*, 2013). Os agregados miúdos melhoram o desempenho do compósito, permitindo um controle eficaz da tenacidade à fratura da matriz, e possibilitando que o compósito alcance o enrijecimento por deformação sem comprometer o desempenho à tração (Huang *et al.*, 2013; Yu *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2022).

Embora não seja usual, alguns estudos têm adotado o uso de agregados graúdos na formulação sem comprometer o enrijecimento por deformação e alta ductibilidade do material (dimensões máximas de 5-8 mm, 8-15 mm e 10-20mm (Dong *et al.*, 2024) e 5-9 mm, 9-13 mm

e 13-17 mm (Xie *et al.*, 2024)). Alguns estudos têm sido realizados visando substituir a areia natural por resíduos, como borracha triturada (Helal, Tahwia e Youssf, 2024), areia proveniente de rejeitos de minério de ferro (Zhang *et al.*, 2024).

Os aditivos químicos comumente adotados são os aditivos superplastificantes e/ou modificadores de viscosidade. A utilização de aditivos químicos auxilia no controle da reologia do ECC no estado fresco, o que evita a interferência na composição do compósito (Kong, Bike e Li, 2003; Kong, Bike e Li, 2006).

O aditivo redutor de água de alta performance (HPWR) à base de policarboxilato foi considerado o mais eficaz para manter as propriedades desejadas no estado fresco e na aplicação do ECC típico (M45) (Li, 2008). Segundo Ghahsareh *et al.* (2024), o HPWR é utilizado para ajustar a trabalhabilidade, enquanto o aditivo modificador de viscosidade (VMA) ajusta a viscosidade, garante a dispersão das fibras e evita a segregação dos agregados finos e das fibras.

As fibras, sintéticas ou naturais, são empregadas tanto de forma isolada quanto em combinações híbridas. O tipo, tamanho, quantidade de fibra são adotados para satisfazer os critérios de múltiplas microfissuras e controle da abertura das fissuras (Li, 2008). O teor de fibra utilizada no ECC é limitado a 2% em relação ao volume total de sólidos (Li, 2002; Fahad *et al.*, 2019; Lu *et al.*, 2023). A utilização de um teor abaixo do crítico resulta no comportamento frágil quando submetido à tração e o valor acima do crítico eleva o custo, afeta a produção e o comportamento mecânico do ECC (Li, 2003). O teor de fibras influencia na trabalhabilidade, com o aumento do teor de fibras maior a tendência de aglomeração da mistura (Khan *et al.*, 2023). A distribuição inadequada de fibras pode resultar em falhas internas, comprometendo a eficácia do enrijecimento por deformação do compósito (Lei *et al.*, 2019).

O diâmetro das fibras também influencia no comportamento do ECC. Fibras com diâmetros menores tendem a romper mais facilmente quando são solicitadas na matriz, resultando em um comportamento de amolecimento por tração do compósito (Chen *et al.*, 2024). Em contraste, fibras com diâmetros maiores têm uma maior capacidade de serem arrancadas sem romper o que contribui para obtenção do enrijecimento por deformação e a aumento da resistência à fissuração da matriz.

A formulação inicial do ECC proposta por Li, denominada M45 (Li, 2008; Wang e Li, 2007; Li, 2008; Pakravan, Lafiti e Jamshidi, 2016), cuja composição é apresentada na Tabela 1, foi desenvolvida a fim de obter um material com elevada resistência à tração, ductilidade e com capacidade de enrijecimento por deformação (Li, 2008). Nesta formulação, a proporção entre agregado miúdo e finos (cimento + cinza volante) foi definida em 0,36 para manter a

rigidez e estabilidade volumétrica. A relação água/finos foi fixada em 0,26. A fibra utilizada é a de PVA com revestimento oleado na superfície (1,2% da massa da fibra).

Tabela 1 – Formulação M45 do ECC.

Mistura	Cimento	Cinza Volante	Areia	Água	Aditivo	Fibra (%)
M45	1	1,2	0,8	0,56	0,012	0,02

Fonte: Li (2008).

2.3 USO DA CINZA VOLANTE NO ECC

A incorporação de materiais cimentícios suplementares (SCMs) é adotada como uma estratégia para a redução parcial do teor de clínquer (Lothenbach, Scrivener e Hooton, 2011), num cenário em que a produção do cimento Portland é responsável por cerca de 7% das emissões globais antropogênicas (ABCP, 2019). No ECC, o SCM mais utilizado é a cinza volante (Shoji *et al.*, 2022), um subproduto das usinas termelétricas, em razão das suas propriedades mecânicas e vantagem em termos ambientais.

A composição da cinza volante (CV) é predominantemente dióxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3) (Lothenbach, Scrivener e Hooton, 2011) e são classificadas como pozolanas artificiais (ABNT NBR 12653:2015). Suas partículas são tipicamente esféricas, com diâmetros variando entre 1 e 150 μm e maioria das partículas menor que 45 μm (IBRACON, 2022). A cinza volante deve atender a classificação da NBR 12653:2014, com $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) > 70\%$, $\text{SO}_3 < 5\%$, teor de álcalis disponíveis em $\text{Na}_2\text{O} < 1,5\%$ e perda ao fogo menor que 6%. O material retido na peneira 45 μm deve ser menor que 20%.

Na presença de água e hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) da reação do cimento Portland, é capaz de formar produtos de hidratação capazes de preencher os espaços capilares da matriz (Mehta e Monteiro, 2014). Além da reação pozolânica, a CV pode contribuir no preenchimento de vazios existentes na matriz cimentícia e melhora no desempenho mecânico do compósito (IBRACON, 2022).

A ASTM C618:2022 estabelece classificação para a cinza volante usada como material cimentício suplementar no concreto de cimento em duas classes: classe C e classe F. A classe C corresponde às cinzas volantes com propriedades cimentantes e pozolânicas e teor de $\text{CaO} > 18\%$, enquanto as cinzas da classe F apresentam apenas propriedades pozolânicas e tem no máximo 18% de CaO na composição. As relações de $(\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ e } \text{Fe}_2\text{O}_3) > 50\%$, $\text{SO}_3 < 5\%$,

perda ao fogo $< 6\%$ e material retido na peneira $45\ \mu\text{m} < 34\%$ são as mesmas para as duas classes.

Na formulação típica do ECC (M45), a proporção de cinza volante corresponde a 1,2 vezes o volume de cimento Portland (Li, 2008). Wang e Li (2007) avaliaram o efeito de diferentes razões de cinza volante, variando de 0,1 a 1,5, em ECCs reforçados com fibras de PVA, e observaram que o aumento do teor de cinza volante reduz o atrito interfacial, a ligação química fibra/matriz e a tenacidade da matriz, favorecendo o mecanismo de enrijecimento por deformação. De forma complementar, Yang, Yang e Li (2007) demonstraram que teores elevados de cinza volante (entre 1,2 e 5,6) promovem a redução da retração por secagem e aprimoram a robustez da ductilidade à tração. Apesar desses benefícios associados a capacidade de enrijecimento por deformação do ECC, elevados teores de cinza volante resultam em redução da resistência à compressão do material (Yang, Yang e Li, 2007; Qi *et al.*, 2025).

O uso de cinzas volantes, no entanto, apresenta desafios de disponibilidade e qualidade. A oferta anual de cinza volante representa cerca de 30% da produção de cimento (Yu, Wu e Leung, 2020), o que gera incerteza sobre a disponibilidade para atender à crescente demanda da indústria da construção. Além disso, a sua produção está ameaçada pela transição energética, que busca reduzir o uso de termelétricas a carvão devido às emissões de dióxido de carbono (Diaz-Loya *et al.*, 2019).

A redução na oferta da cinza volante é agravada pela variabilidade da qualidade disponível: estima-se que menos de um terço da cinza volante produzida seja adequada para uso em compósitos cimentícios devido à variabilidade na sua qualidade (Ruben, 2016). Com o intuito de preservar as características desejáveis desses compósitos e promover a sustentabilidade, novos materiais cimentícios suplementares, como o calcário e a argila calcinada, estão sendo explorados na formulação do ECC.

2.4 USO COMBINADO DE METACAILIM E FÍLER CALCÁRIO EM ECC

O uso combinado de metacaulim (ou argila calcinada) e fíler calcário na composição do ECC tem sido impulsionado pelos estudos com cimento à base de clínquer, argila calcinada e calcário (LC₃) (Zhang *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2021; Qi *et al.*, 2025; Sun *et al.*, 2026; Wang *et al.*, 2026). Os primeiros estudos sobre a utilização do cimento LC₃ no ECC começaram em 2020, com um aumento significativo em 2022, em decorrência da preocupação global com a sustentabilidade no setor da construção (Al-Fakih *et al.*, 2023). Nesse contexto, metacaulim e o calcário destacam-se como materiais cimentício suplementares de baixa emissão de CO₂ e

com ampla disponibilidade de matéria prima em todo o mundo (Sabir, Wild e Bai, 2001; Scrivener, 2014; Scrivener *et al.*, 2018).

A obtenção do metacaulim, que é essencialmente um silicato de alumínio amorfo ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), é realizada por meio de um processo endotérmico de desidroxilação que ocorre em temperaturas de cerca de 600°C e 800°C (Cai *et al.*, 2018) em fornos rotativos convencionais (Scrivener *et al.*, 2018). Após ser submetida ao processo de calcinação, a argila caulinítica apresenta propriedades pozolânicas (Fernandez, Martirena e Scrivener, 2011). Embora o custo da argila calcinada seja superior ao da cinza volante, em razão do processo de calcinação, esse material se apresenta como uma alternativa viável para estudos de substituição em materiais cimentícios, especialmente em regiões onde a disponibilidade de cinza volante é limitada (Scrivener *et al.*, 2018).

A argila caulinítica calcinada é um material alumino silicato fino, com dimensão de partículas compreendidas entre 2 e 10 μm e área superficial específica de cerca de 10 a 25 m^2/g (Brykov, Krasnobaeva e Mookeev, 2015). Durante a hidratação, o silicato de alumínio amorfo (AS_2) presente no metacaulim reage com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) formando o sílico aluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H) e hidratos de aluminatos (Sabir, Wild e Bai, 2001). Na presença de calcário, a alumina pode reagir com o carbonato de cálcio e formar carboaluminatos hidratados (Hc/Mc) (Bonavetti, Rahhal e Irassar, 2001). Os produtos de hidratação formados preenchem os espaços vazios e contribuem para o desenvolvimento das propriedades do compósito (Al-Fakih *et al.*, 2023).

As adições carbonáticas são capazes de acelerar as reações de hidratação, influenciar os hidratos formados e promover o preenchimento entre as partículas (Lothenbach *et al.*, 2008). A contribuição do calcário na hidratação do sistema cimentício acontece quimicamente e fisicamente (Borodier, 2015; Lothenbach, Scrivener e Hooton, 2011; Weerdt *et al.*, 2011). Quimicamente, há formação de íons carbonato na solução, que reagem com os aluminatos convertendo monossulfoaluminato em hemicarboaluminato e, posteriormente, transformando em monocarboaluminato (Weerdt *et al.*, 2011; Zajac *et al.*, 2014).

Fisicamente, o calcário apresenta finura inferior à do cimento, o que contribui para o preenchimento de espaços vazios em sistemas cimentícios (Lothenbach, Scrivener e Hooton, 2011) e promove pontos de nucleação na superfície do carbonato de cálcio para a formação do C-S-H, intensificando a hidratação da alita (C_3S) e reduzindo o período de dormência (Dhandapani *et al.*, 2021).

A incorporação de materiais carbonáticos pode impactar a matriz cimentícia de três formas distintas: (i) ação como preenchimento por diluição, (ii) ação de cisalhamento e (iii)

efeito de empacotamento de partículas (Dhandapani *et al.*, 2021). Na diluição, a substituição do cimento por um material inerte ou de baixa reatividade diminui a formação dos hidratos no meio cimentante, o que pode reduzir as propriedades dos sistemas cimentício. A ação de cisalhamento do material de preenchimento caracteriza-se pelo rompimento das partículas de cimento com aumento de superfícies de nucleação e consequente aceleração das reações de hidratação. O efeito de empacotamento pode reduzir os espaços capilares intersticiais que os produtos de hidratação precisam preencher, resultando na melhora das propriedades mecânicas em idade inicial.

O metacaulim tem sido utilizado como substituto parcial do clínquer no cimento LC₃ (cimento de argila calcinada com calcário) juntamente do calcário, sendo a proporção calcário e metacaulim de 1:2 em massa (Scrivener *et al.*, 2018). Segundo Avet *et al.*, (2016) a reatividade da argila calcinada é influenciada pelo teor de caulinita presente em sua composição. Os autores verificaram que a argila calcinada com teores de 40% ou mais de caulinita propiciaram ao sistema LC₃-50 (50% de clínquer, 30% de argila calcinada, 15% de calcário e 5% de gipsita) resistências similares à do cimento Portland comum.

Na Tabela 2 são mostrados alguns estudos em ECC com uso do metacaulim e calcário em substituição parcial ao cimento Portland no ECC, quanto parcial e/ou total da cinza volante, especificação do ligante substituído e o teor de substituição, além do tipo e teor de fibra utilizado, em volume. As siglas M e C correspondem ao metacaulim (ou argila calcinada) e fíler calcário, respectivamente.

Tabela 2 – Aplicações de calcário e metacaulim em ECC.

Referência	Ligante substituído	Teor de substituição	Fibra utilizada
Zhu <i>et al.</i> (2022)	Cimento Portland	30% (M) + 15% (C)	PP (2%)
Zhang <i>et al.</i> (2020)	Cimento Portland	30% (M) + 15% (C)	PVA (2%)
Yu, Wu e Leung (2020)	Cinza volante - total Cimento Portland - parcial	100% (CV) 70% e 80% (Cimento)	PVA (2%)
Wang <i>et al.</i> (2021)	Cimento Portland	10%, 30% e 50%	PE (2%)
Liu <i>et al.</i> (2021)	Cimento Portland	30% (M) + 15% (C)	PP (0,5%, 1%, 1,5%, 2% e 2,5%)
Hou, Zhang e Li (2022)	Cimento Portland	25% (M) + 25% (C)	PP (2%)
Zhou <i>et al.</i> (2022)	Cimento Portland	35%, 50% e 65%	PE (2%)
Hou e Li (2023)	Cimento Portland	25% (M) + 25% (C)	2% PVA; 1,5% PVA + 0,5% PP; 1% PVA + 1% PP; 0,5% PVA + 1,5% PP; 2% PP
Chen <i>et al.</i> (2024)	Cimento Portland Cinza volante	55%, 70% e 80% 33%, 50%, 77% e 100%	PVA (2%)

Fonte: Autora (2026).

2.4.1 Efeito do metacaulim e filer calcário nas propriedades do ECC no estado fresco

Na Tabela 3 são apresentadas formulações adotadas em estudos realizados de ECC com uso de metacaulim e filer calcário, identificando a proporção: cimento; calcário; metacaulim, bem como a relação cinza volante: cimento (CV/OPC), a relação água/finos (a/f), a consistência e a densidade desses no estado fresco.

Yu, Wu e Leung (2020) investigaram ECC produzidos com substituição do cimento em teores elevados de metacaulim e calcário (70% e 80%), sem uso de cinza volante. Os resultados indicaram que a trabalhabilidade foi reduzida devido ao menor tamanho das partículas de LC3 em comparação ao cimento Portland, o que exigiu o aumento da relação água/aglomerante comparado às misturas de ECC convencional (0,2-0,3) (Li, 2019). Além disso, misturas com elevados teores de substituição de cimento por calcário e metacaulim e maiores teores de água/aglomerante apresentaram densidades ligeiramente inferiores em comparação ao ECC típico.

Tabela 3 – Teores de calcário e metacaulim no ECC.

Referência	Cimento	Calcário	Metacaulim	FA/OPC	a/f	Espalhamento (mm)
Zhu et al. (2020)	55	15	30	2,2	0,3	185
					0,2	173
					0,16	165
Zhang et al. (2020)	100	0	0	2,2	0,25	-
	55	15	30	2,2	0,3	-
	55	15	30	2,2	0,3	-
Yu, Wu e Leung (2020)	30	23,3	46,7	-	0,3	160-200
	20	26,7	53,3	-	0,35	
					0,4	
					0,3	160-200
					0,35	
Wang et al. (2021)	90	3,33	6,66	-	0,192	164
	70	10	20	-	0,192	157
	50	15	30	-	0,192	178
Liu et al. (2021)	50	15	30	-	0,4	-
Hou, Zhang e Li (2022)	100	0	0	1	0,25	168
	50	25	25	2	0,25	154-169
Zhou et al. (2022)	100	0	0	-	0,28	185
	65	11,67	23,34	-	0,28	174
	50	16,67	33,34	-	0,28	165
	35	21,67	43,33	-	0,28	150
Hou e Li (2023)	50	25	25	2	0,25	190-195
Chen et al. (2024)	45	0	0	1,2	0,3	-
		6	12	0,82	0,3	-
		9,17	18,33	0,61	0,3	-
		12,33	24,67	0,4	0,3	-
		18,33	36,67	-	0,3	-
	30	0	0	2,33	0,3	-
		7,67	15,33	1,57	0,3	-
		11,67	23,33	1,17	0,3	-
		15,67	31,33	0,77	0,3	-
		23,33	46,67	-	0,3	-
	20	0	0	4	0,3	-
		9	18	2,65	0,3	-
		13,33	26,67	2	0,3	-
		17,67	35,33	1,35	0,3	-
		26,67	53,33	-	0,3	-

Fonte: Autora (2026).

Zhang *et al.* (2020) verificaram a estrutura de poros do ECC com matriz LC3 e observaram que as fibras dispersas não afetaram significativamente a interconectividade dos

poros na matriz. Entretanto, a porosidade total aumentou de 19% (ECC de referência) para 26% no ECC com calcário de diâmetro médio de 3 μm e 27,6% no ECC com calcário de diâmetro médio 12 μm .

Liu *et al.* (2021) também analisaram o ECC com adições em relação à porosidade. O compósito com metacaulim e calcário teve menor porosidade em relação ao ECC com apenas cimento. Constatou-se também que as adições minerais contribuíram para a diminuição da fluidez das misturas.

No ECC estudado por Zhu *et al.* (2020) com fibras de polipropileno (PP), metacaulim e calcário na composição, foram aplicadas três relações água/finos (0,3; 0,2 e 0,16). Para todas as relações água/finos, o espalhamento e a densidade diminuíram em relação ao ECC com cimento Portland.

No estudo de Wang *et al.* (2021) a substituição de cimento por metacaulim e calcário no ECC acelerou os tempos de início e fim de pega. O ECC com adições teve início de tempo de pega em 6,0 horas e o fim de pega em 10,1 horas, enquanto a amostra de controle sem calcário e metacaulim apresentou início e fim de pega em 6,6h e 11,4h. A aceleração nos tempos de pega pode ser atribuída ao fato de a metacaulim ter área superficial elevada, o que reduz o teor de água livre na matriz.

Hou, Zhang e Li (2022) investigaram uma formulação do ECC com substituição de 50% de cimento por calcário e metacaulim em uma proporção 1:1. A substituição exigiu um aumento no teor de aditivo superplastificante para manter a fluidez desejada da matriz ao incorporar as fibras.

Zhou *et al.* (2022) estudaram misturas de ECC leve², com densidade entre 1400 e 1500 kg/m³, com substituição de cimento por calcário e metacaulim (na proporção 1:2) nos teores de 0%, 30%, 50% e 65%. A fluidez da mistura diminuiu à medida que o teor de substituição de cimento aumentou, reduzindo o espalhamento de 185 mm (0% de substituição) para 150 mm (65% de substituição). Esse comportamento evidencia a redução da trabalhabilidade com o uso de metacaulim e calcário. Segundo Al-Fakih *et al.* (2023), poucos estudos com ECC leves incorporam metacaulim na composição devido à sua elevada área superficial, característica que exige maior demanda de água e/ou aditivos superplastificantes para evitar aglomeração. Tal como constatado por Hou, Zhang e Li (2022).

² Para a produção do ECC leve, foram utilizados como agregados a areia quartzosa e microesferas de cinza volante.

2.4.2 Efeito do metacaulim e filler calcário nas propriedades mecânicas do ECC

Zhang *et al.* (2020) analisaram a resistência à compressão de ECC com calcário e metacaulim na proporção 1:2 em substituição de 45% do teor de cimento. Os resultados mostraram que o ECC com 100% de cimento Portland alcançou 55,3 MPa aos 28 dias, o ECC com adições alcançou 32,1 MPa com uso de calcário com diâmetro médio de 3 μm e 31,3 MPa com calcário de diâmetro médio de 12 μm .

Zhu *et al.* (2020) constataram um aumento da resistência à compressão com a diminuição da relação água/finos no ECC com calcário e metacaulim em substituição parcial ao cimento. Com um teor de água/finos igual a 0,16, o ECC com adições alcançou resistência à compressão aos 28 dias de 43,3 MPa, enquanto o compósito sem adições alcançou 53,6 MPa. Apesar do menor teor de cimento para as reações de hidratação, o efeito pozolânico do metacaulim foi capaz de reagir com o hidróxido de cálcio e resultar em produtos de hidratação (Trauchessec *et al.*, 2015).

Yu, Wu e Leung (2020) mostraram que um ECC com alto teor de substituição de cimento por calcário e metacaulim e ausência de cinza volante na composição pode ser capaz de atingir resistência à compressão inicial suficiente aos três dias (23 a 30 MPa). Uma substituição de 70% alcançou resistência à compressão de 64,52 MPa aos 28 dias, valor comparável ao ECC-M45 com 55% de cinza volante de 68 MPa (Wang e Li, 2007). No entanto, a resistência diminuiu com o aumento do teor de substituição de cimento pelas adições. Essa redução pode ser atribuída à diminuição do teor de portlandita na mistura pela hidratação do cimento e reações pozolânicas (Yu *et al.*, 2018, Chen *et al.*, 2023).

A substituição de cinza volante por calcário e metacaulim analisada por Chen *et al.* (2023) resultou no aumento da resistência à compressão do ECC. Os autores atribuíram o acréscimo de resistência à maior finura do calcário e elevada reatividade da metacaulim utilizada no estudo em relação à cinza volante utilizada, o que permitiu uma hidratação mais completa com o cimento (Chen *et al.*, 2023).

A resistência à tração do ECC é uma característica mais crítica do que a resistência à compressão, devido à utilização do material em zonas de tração ou cisalhamento com finalidade de controle de fissuras (Yu, Wu e Leung, 2020). Na Tabela 4 são mostrados alguns valores de resistência à primeira fissura (f_o), resistência à tração última (f_u) e capacidade de deformação à tração (ϵ_t) de misturas de ECC com calcário e argila calcinada na composição.

Tabela 4 – Resultados mecânicos do ensaio de tração do ECC com calcário e argila calcinada

Referência	Cimento	Calcário	Metacaulim	f_o (MPa)	f_u (MPa)	ε_t (%)
Zhu et al. (2020)	55	15	30	1,4	2,5	6
				1,7	3,3	7,1
				2	3,8	8,9
	100	-	-	2,1	3,4	3,7
				2,6	4	1,1
				3,9	4,8	0,6
Zhang et al. (2020)	55	15	30	3,2	4,1	6,5
	55	15	30	3,1	4,1	5,2
	100	-	-	5,15	6,5	4,1
Yu, Wu e Leung (2020)	30	70		-	5,19	0,63
				-	4,67	0,96
				-	4,26	1,15
	20	80		-	4,65	0,57
				-	3,92	0,73
				-	3,24	1,02
Wang et al. (2021)	90	-	-	-	-	-
	70	-	-	-	-	-
	50	-	-	-	-	-
Li et al. (2021)	55	15	30	-	-	1,73
Hou, Zhang e Li (2022)	100	0	0	1,56	2,51	5,3
	50	25	25	1,61	3,01	8,99
	50	25	25	1,94	3,75	5,35
	50	25	25	1,51	2,4	7,54
	50	25	25	1,5	2,62	5,04
	50	25	25	1,58	3,07	4,06
Zhou et al. (2022)	100	0	0	4,4	6,7	3,5
	65	11,67	23,34	3,05	6,3	4,8
	50	16,67	33,34	2,65	6	5,9
	35	21,67	43,33	2,03	5,6	4,9
Hou e Li (2023)	50	25	25	4,25	6,51	4,62
				2,34	3,96	3,93
				1,88	3,2	4,83
				1,5	2,52	4,97
				1,34	2,36	7,65

Fonte: Autora (2026).

Em Yu, Wu e Leung (2020), apenas algumas misturas analisadas no ECC com teor elevado de substituição de cimento por calcário e metacaulim exibiram comportamento de enrijecimento por deformação e capacidade de deformação à tração superior a 1%. Há uma tendência de redução da resistência à tração com o acréscimo da relação água/finos e do teor da substituição do cimento. A deformação à tração apresentou valores maiores com o acréscimo

da relação água/finos, provavelmente devido à significativa redução da tenacidade à fratura da matriz e à redução na interação interfacial fibra/matriz (Yu, Wu e Leung, 2020).

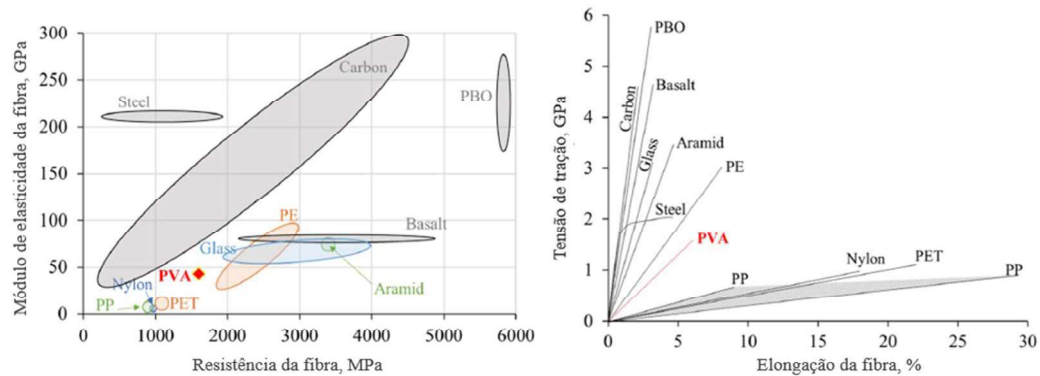
Zhu *et al.* (2020) obtiveram resistências à tração menores no compósito com calcário e metacaulim que no ECC com cimento Portland, entretanto, devido à maior viscosidade do sistema com as duas adições houve uma maior dispersão das fibras na matriz. A melhoria na dispersão das fibras foi responsável pela menor dispersão dos resultados de resistência à tração.

Alguns estudos avaliaram as larguras de fissuras dos compósitos ECC com metacaulim e calcário (Zhu *et al.*, 2020; Zhou *et al.*, 2022). A substituição de cimento por argila calcinada e calcário no ECC diminuiu a faixa de largura de fissuras de 86,7-144,0 μm (ECC com cimento) para 81,6-127,8 μm (ECC com substituição parcial por adições) (Zhu *et al.*, 2020). O ECC leve estudado por Zhou *et al.* (2022) apresentou maior número de fissuras ao substituir o cimento por metacaulim e calcário, mas tiveram menor espaçamento entre fissuras. As fissuras desse compósito mantiveram-se abaixo de 100 μm .

2.5 FIBRAS UTILIZADAS NA FORMULAÇÃO DO ECC

Uma variedade de fibras é utilizada na composição do ECC, como aço (Zhu *et al.*, 2021; Wang, Wang e Zhu, 2022), basalto (Özkan e Demir, 2020), carbono (Halvaei *et al.*, 2020), fibras recicladas (Hou, Li e Li, 2024), fibras naturais (Zukowski *et al.* 2020), liga de memória (Chen *et al.*, 2022), sendo predominante o uso das poliméricas PVA (Pan *et al.*, 2015; Guan *et al.*, 2023), PE (Long *et al.*, 2024) e PP (Zhang *et al.*, 2020). O desempenho do compósito depende das propriedades físicas e mecânicas das fibras, da interação interfacial fibra/matriz (Heede *et al.*, 2018; Bandala *et al.*, 2020; Lin *et al.*, 2021; Khan *et al.*, 2023) e da orientação das fibras na matriz cimentícia (Li, 2003). Na Figura 6 são indicadas as propriedades mecânicas de alguns tipos de fibras aplicados na produção de ECC.

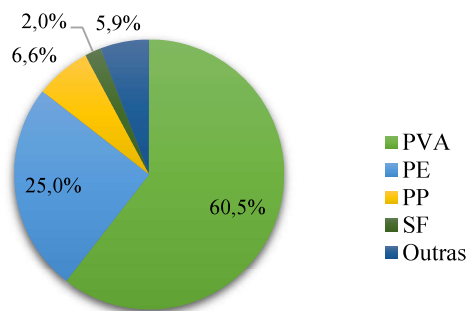
Figura 6 – Propriedades mecânicas de fibras utilizadas na produção de compósitos cimentícios engenhierados (ECC).



Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2020).

Um levantamento bibliográfico³ realizado na base *Scopus* no período de 2018 a 2024, utilizando o termo *engineered cementitious composites*, identificou 891 artigos publicados em periódicos Qualis A1 de acesso aberto. Desses, 77,9% empregam fibras isoladas e 10,8% utilizam sistemas híbridos de fibras no ECC. No uso isolado, verificou-se que a fibra mais utilizada é a fibra de PVA (60,5%); seguida pela fibra de PE (25%); e fibra de PP (6,6%), conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Tipos de fibras aplicadas de modo isolado em ECC no período de 2018 a 2024.



Fonte: Melo, Tofeti, Costa (2024).

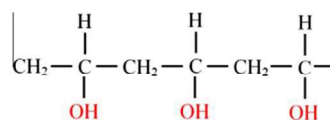
³ Esse levantamento bibliográfico foi realizado pela autora e publicado nos anais do 65º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON).

2.5.1 Uso isolado de fibras de PVA e PP

As fibras de PVA caracterizam-se por sua natureza hidrofílica, devido à presença de grupos hidroxilas em sua estrutura (Li, Wang e Wu, 2001), conforme mostrado na Figura 8, o que lhes confere a capacidade de formar ligações de hidrogênio. Essa característica resulta em uma elevada intensidade de ligação na interface fibra/matriz cimentícia (Bentur e Mindess, 2007), favorecendo o mecanismo de ruptura da fibra em detrimento do seu arrancamento (Li, Wang e Wu, 2001). Entretanto, a ruptura prematura das fibras pode limitar a capacidade de deformação e a ductilidade do compósito. Para reduzir a adesão físico-química com a matriz e, conseqüentemente, evitar a ruptura prematura das fibras, estas recebem um revestimento oleado (Li *et al.*, 2002).

Além disso, as fibras de PVA tem boa compatibilidade química com o cimento Portland (Noushini, Samali e Vessalas, 2013) e elevada resistência à tração, o que contribui para a resistência à tração na primeira fissura (Li, 2019). ECCs reforçados com PVA podem alcançar deformações à tração de 3% a 7% (Li *et al.*, 2002), com aberturas médias de fissuras entre 50 e 100 µm (Li, 2019). Apesar de seu desempenho mecânico elevado, a energia incorporada, a elevada pegada de carbono e o alto custo associados às fibras de PVA limitam sua aplicação em larga escala (Zhu *et al.*, 2020; Hou e Li, 2023; Hu *et al.*, 2024).

Figura 8 – Estrutura química da fibra de PVA.



Fonte: Noushini, Samali e Vessalas (2013).

As fibras de polipropileno (PP) são consideradas uma opção mais ecológica e de baixo custo em relação à fibra de PVA (Shoji *et al.*, 2022; Hou e Li, 2023). São fibras de natureza hidrofóbica, o que resulta em uma ligação fibra/matriz fraca. Além da ligação fibra/matriz, a natureza da fibra afeta sua distribuição. Fibras hidrofílicas como PVA tendem a ter maior molhabilidade da superfície pela pasta de cimento, o que resulta em uma distribuição mais uniforme das fibras (Li, 2019; Hou e Li, 2023). Por outro lado, as fibras de PP não fornecem força físico-química para melhorar a sua dispersão (Li, 2019).

Além disso, a elevada razão de aspecto (comprimento/diâmetro) das fibras de PP somada ao maior número de fibras para um mesmo volume devido ao menor diâmetro das fibras de PP, torna o compósito suscetível à aglomeração e má distribuição das fibras e aumenta a demanda de aditivo superplastificante para melhorar a dispersão das fibras (Felekoglu *et al.* 2014; Zhang *et al.*, 2022; Hou e Li, 2023).

Em comparação às fibras de PVA, as fibras de PP apresentam menor módulo de elasticidade e maior alongamento na ruptura, conferindo ao compósito com fibras de PP maior ductilidade (Zhang *et al.*, 2020). Na Tabela 5 são mostrados os intervalos de resultados das características físicas e mecânicas para as fibras de PP obtidas no levantamento bibliográfico por Melo, Tofeti e Costa (2024).

Tabela 5 – Características físicas e mecânicas das fibras de PVA e PP.

Fibra	Comprimento (mm)	Diâmetro (μm)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Densidade (g/cm³)	Alongamento (%)
PVA	3 - 35	12 - 200	400 - 3000	11 - 110	0,91 - 1,60	2,42 - 80
PP	6 - 45	10 - 110	350 - 6120	3,5 - 9,5	0,90 - 0,91	4 - 80

Fonte: Melo, Tofeti, Costa (2024).

Os dados do levantamento indicaram que as fibras de PVA são majoritariamente utilizadas nos comprimentos de 12 mm (61%) (Shabakhty, Karimi e Bakhtiary, 2024; Li, Wang e Ren, 2024; Zhang *et al.*, 2024), seguido por 8 mm (16%) (Zokaei *et al.*, 2023; Baloch *et al.*, 2023), com diâmetros de 39 μm e 40 μm (Zhu *et al.*, 2022; Han *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2023), módulo de elasticidade entre 35 e 43 GPa (Qiu *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2024) e resistência à tração de 1500 – 1650 MPa (Yıldırım *et al.*, 2018; Al-Gemeel, Zhuge e Youssf, 2019). O uso de fibra de PVA com alongamento de 80% foi registrado somente por Abdallah *et al.*, 2024.

Num estudo comparativo entre fibras de PVA com diâmetro 39 μm (REC15) e 660 μm (RF4000), Khan *et al.* (2023) observaram que as fibras de diâmetros menores resultaram em um compósito mais dúctil e com maior resistência em comparação com as de diâmetros maiores. Lin *et al.* (2021) constataram que o uso da fibra de 12 mm propicia maior resistência à tração quando comparada às fibras de 6, 9 e 18 mm no ECC. No entanto, Ismail, Abdelaleem e Hassan (2018) compararam o uso de fibras de PVA de 8 mm e 12 mm em ECC e identificaram que as fibras mais curtas (8 mm) apresentaram aumento no desempenho do compósito em termos de abertura da primeira fissura, resistência, ductilidade, tenacidade e fissuração. O uso de fibras de PVA mais longas pode resultar na aglomeração durante a mistura, o que leva a uma

distribuição heterogênea no compósito, e consequentemente, pode comprometer o desempenho. Por outro lado, as fibras mais curtas têm um efeito de costura das fissuras limitado na matriz do ECC (Cheng *et al.*, 2023).

Li *et al.* (2002) observaram que o tratamento da superfície da fibra de PVA oleada, com 1,2% de lubrificante em relação à massa da fibra, melhora o enrijecimento por deformação à tração do compósito, permitindo uma deformação superior a 4%. Em decorrência do custo elevado das fibras de PVA oleadas em comparação às fibras não oleadas, alguns estudos sugerem novos projetos de mistura do ECC incorporando a fibra de menor custo para obtenção do compósito com propriedades desejadas (Guan *et al.*, 2023).

As fibras de polipropileno (PP) apresentam diâmetro na faixa de 12 a 32 μm (Tan *et al.*, 2023; Shabakhty, Karimi e Bakhtiary, 2024), comprimento predominante de 12 mm e, consequentemente, maior fator de forma (comprimento/diâmetro) (Ehrenbring *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022; Hou, Zhang e Li, 2022). Essas características físicas influenciam a dispersão da fibra na matriz.

Embora a resistência à tração dessa fibra geralmente seja inferior a 850 MPa, um valor máximo de 6120 MPa foi registrado por Bandala *et al.* (2020). O módulo de elasticidade varia de 1 a 8 MPa, sendo suscetíveis a elevada elongação (Heede *et al.*, 2018). Os teores de fibras de PVA e PP utilizados na formulação do ECC encontrados na literatura são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Intervalo de teores das fibras de PVA e PP utilizados na formulação do ECC.

Fibra	Intervalo teor (% de volume)
PVA	0,15 - 5,00
PP	0,50 - 6,00

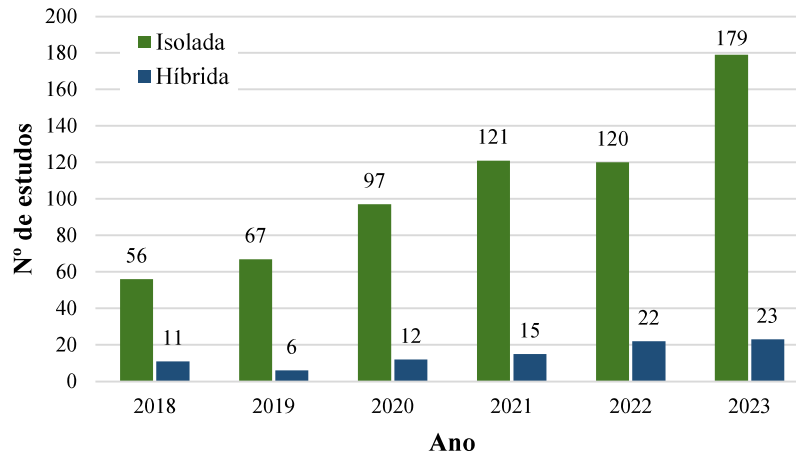
Fonte: Melo, Tofeti, Costa (2024).

2.5.2 Uso combinado de fibras

A hibridização das fibras consiste na combinação de uma ou mais fibras na matriz cimentícia, com o objetivo de formular compósitos com elevada ductibilidade e resistência a partir do ajuste da interface fibra/matriz (Li, 2002; Wang e Li, 2007). O uso de fibras combinadas nos compósitos cimentícios tem aumentado nos últimos anos (Figura 9), visando aprimorar a sustentabilidade dos materiais constituintes do ECC e melhorar seu desempenho mecânico (Hou e Li, 2023). Essa abordagem permite combinar as propriedades distintas de

diferentes tipos de fibras, proporcionando maior eficiência no controle de fissuras e melhorando as propriedades mecânicas do compósito.

Figura 9 – Levantamento do uso de fibras isoladas e híbridas de ECC (2018 – 2023)

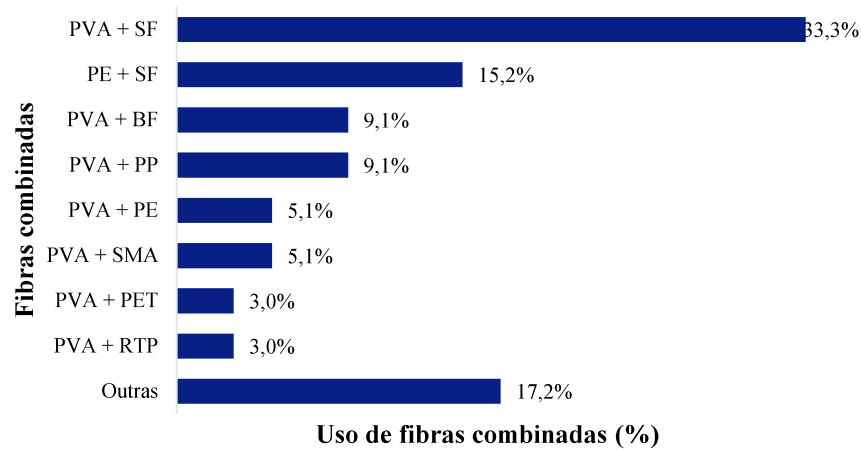


Fonte: Autora (2026).

Na Figura 10 são apresentadas as combinações de fibras mais utilizadas entre 2018 e 2024. Foram identificadas vinte combinações distintas de fibras nas formulações do ECC. Destas, quinze incluíam fibras de PVA em sua composição (75,3%).

A combinação híbrida mais frequente é de fibra de PVA com fibra de aço (PVA + SF), presente em 33 estudos, seguida por fibra de polietileno com fibra de aço (PE + SF), encontrada em 17 estudos. A presença de fibra de aço em combinações híbridas corresponde a 50,5% dos estudos sobre ECC no período de 2018 a 2024. Apesar de ter sido a segunda mais utilizada, sua presença se limitou à combinação com fibras de PVA e PE (PVA + SF; PE + SF; PVA + PE + SF).

Figura 10 – Levantamento do uso de fibras combinadas no período de 2018 a 2024



Fonte: Melo, Tofeti e Costa (2024).

O comportamento mecânico do ECC pode ser aprimorado pela investigação dos efeitos das propriedades das fibras na matriz. A maioria dos estudos utiliza apenas um tipo de fibra, entretanto, o uso isolado da fibra em compósitos cimentícios engenheirados pode limitar seu desempenho, melhorando apenas uma propriedade específica, como a resistência ou a ductilidade (Vandewalle *et al.*, 2004).

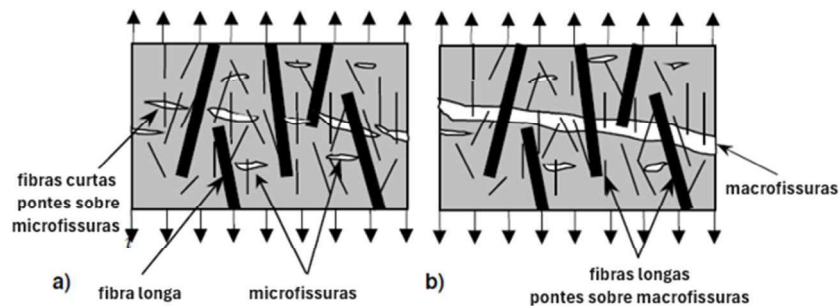
A hibridização de fibras tem se mostrado eficaz na melhoria de mais de uma propriedade do compósito. Em um estudo com uso de fibras de PVA e fibras obtidas da reciclagem de pneus, o aumento do teor de fibras combinadas resultou no aumento da resistência à tração direta e à flexão (Mohammed, Khed e Liew, 2018). Além de influenciar na transferência de tensões pelas fibras, a hibridização também é capaz de alterar a reologia e microestrutura do compósito. Um exemplo é a influência da distribuição e tamanho das falhas na matriz nas propriedades mecânicas (Hou e Li, 2023).

Markovic (2006) apresentou o comportamento das fibras curtas e longas na costura de fissuras sob aumento da tensão de tração. Durante o esforço de tração, microfissuras surgem nas zonas interfaciais ao redor dos grãos de agregado e, ao se conectarem, geram fissuras maiores que eventualmente levam a falha do material (Van Mier, 1997). As fibras curtas, com menor diâmetro, mostram-se mais eficazes na transferência de tensões nessas microfissuras (Figura 11.a), e, para um mesmo volume de fibras, sua quantidade no ECC é maior em comparação às fibras de diâmetro maior (Markovic, 2006; Hou e Li, 2023). Como a formação de microfissuras e a ação de ponte das fibras ocorrem nas fases iniciais da tração, as fibras

curtas exercem um papel crucial no aumento da resistência à tração do compósito (Markovic, 2006).

À medida que as microfissuras se ampliam e se conectam, formando microfissuras, as fibras longas tornam-se mais ativas na costura dessas fissuras (Figura 11.b). A atuação das fibras longas contribui principalmente para melhorar a ductibilidade do compósito e, em menor grau, também a resistência à tração. Elas garantem uma resposta estável após o pico de tensão, enquanto as fibras curtas tornam-se progressivamente menos eficazes, devido ao seu arrancamento conforme maior abertura da fissura (Markovic, 2006).

Figura 11 – Costura de fissuras em compósitos de fibras combinadas: (a) influência das fibras curtas em microfissuras; e (b) comportamento das fibras longas nas microfissuras.



Fonte: Adaptado de Markovic (2006).

A hibridização de fibras com diferentes módulos de elasticidade é uma estratégia usada para otimizar as propriedades dos compósitos cimentícios. As fibras de maior módulo, como por exemplo as fibras de aço, possibilitam o aumento da resistência do compósito, enquanto as de baixo módulo, como as sintéticas, são utilizadas para melhorar a ductilidade (Hou e Li, 2023). Porém, como observado por Hou e Li (2023), a hibridização de fibras ainda enfrenta desafios, como por exemplo, a fração total de fibras nem sempre é constante, o que dificulta a análise dos benefícios do uso das fibras combinadas. Na Tabela 7 são mostrados teores de fibras combinadas utilizadas nas formulações de ECC.

Tabela 7 – Teores de fibras combinadas no ECC.

Combinação híbrida	Referências	Teor total	Teores de fibra
PVA + SF	Al-Gemeel et al. (2018)	2,00%	1,75% (PVA) + 0,75% (SF)
	Yu et al. (2019)	2,50%	2,00% (PVA) + 0,50% (SF)
	Gürbüz e Erdem (2020)	2,00%	1,50% (PVA) + 0,50% (SF)
	Zhu et al. (2020)	2,30%	0,60% (PVA) + 1,70% (SF)
	Zhang et al. (2021)	3,00%	2,00% (PVA) + 1,00% (SF)
	Qasim et al. (2022)	2,10%	1,47% (PVA) + 0,73 (SF)
PE + SF	Zhou et al. (2018)	2,00%	1,50% (PE) + 0,50% (SF)
	Zhou et al. (2018)	2,00%	0,50% (PE) + 1,50% (SF)
	Zhu et al. (2022)	2,00%	1,25% (PE) + 0,75% (SF)
	Rawat et al. (2022)	2,25%	1,25% (PE) + 1,00% (SF)
	Rawat et al. (2022)	2,25%	1,50% (PE) + 0,75% (SF)
	Rawat et al. (2022)	2,50%	1,75% (PE) + 0,75% (SF)
	Zhu et al. (2022)	2,00%	1,00% (PE) + 1,00% (SF)
PVA + BF	Özkan e Demir (2020)	2,00%	1,50% (PVA) + 0,50% (BF)
	Zhuang et al. (2022)	2,20%	1,80% (PVA) + 0,40% (BF)
	Zhu et al. (2022)	2,00%	1,20% (PVA) + 0,80% (BF)
	Zhu et al. (2022)	2,50%	1,50% (PVA) + 1,00% (BF)
	Shen et al. (2023)	2,60%	1,80% (PVA) + 0,80% (BF)
PVA + PP	Van den Heede et al. (2018)	4,00%	2,00% (PVA) + 2,00% (PP)
	Hu et al. (2022)	2,00%	1,00% (PVA) + 1,00% (PP)
PVA + PE	Jing et al. (2023)	2,00%	0,60% (PVA) + 1,40% (PE)
	Alemu et al. (2023)	1,35%	1,25% (PE) + 0,10% (PVA)
	Hu et al. (2024)	2,00%	1,00% (PVA) + 1,00% (PE)
PVA + PET	Lu et al. (2023)	2,00%	1,00% (PVA) + 1,00% (PET)
PVA + SMA	Chen et al. (2021)	2,70%	1,70% (PVA) + 1,00% (SMA)
	Gurbuz et al. (2023)	2,25%	2,00% (PVA) + 0,25% (SMA)
PVA + RTP	Zhong et al. (2023)	2,00%	1,75% (PVA) + 0,25% (RTP)
	Chen et al. (2024)	2,00%	1,00% (PVA) + 1,00% (RTP)

Fonte: Melo, Tofeti e Costa (2024).

Os estudos sobre o emprego combinado de fibras de PVA e PP em compósitos cimentícios engenheirados indicam que a hibridização tende a melhorar a capacidade de deformação do ECC (Pakravan, Latifi e Jamshidi, 2017), embora nem sempre resulte em ganhos na resistência mecânica. Na Tabela 8 são mostrados intervalos de valores referentes às características das fibras PVA e PP encontradas na literatura, tanto em uso isolado, quanto em uso híbrido.

Tabela 8 – Características físicas e mecânicas das fibras de PVA e PP encontradas na literatura.

Fibra	Comp. (mm)	Diâmetro (µm)	Rt (MPa)	E (GPa)	Densidade (g/cm³)	Elongação (%)
PVA isolada	3 - 35	12 - 200	400 - 3000	11 - 110	0,91 - 1,60	2,42 - 80
PVA híbrida	8 - 30	15 - 660	900 - 1780	6 - 66	1,20 - 1,30	6 - 14
PP isolada	6 - 45	10 - 110	350 - 6120	3,5 - 9,5	0,90 - 0,91	4 - 80
PP híbrida	12 - 20	18 - 150	450 - 850	3,45 - 8	0,90 - 0,91	11,2 - 36,4

Fonte: Melo, Tofeti e Costa (2024).

Tosun-Felekoglu e Felekoglu (2013) observaram que, em compósitos ECC com teor total de 3% de fibras (3,0% PVA – 0,0% PP; 2,0% PVA – 1,0% PP; 1,5% – 1,5% PP; 1,0% PVA – 2,0% PP; 0,0% PVA – 3,0% PP) e matriz à base de cimento e cinza volante, as misturas com maiores teores de PVA aumentaram a resistência à flexão (da ordem de 33% a 67%) e romperam entre 10 e 15 mm de deflexão. Por outro lado, as formulações com maior proporção de PP exibiram maiores capacidade de deformação (aproximadamente 120% de aumento para a mistura com 3% de PP) e mantiveram a capacidade de carregamento até cerca de 20 mm de deflexão. Pakravan, Latifi e Jamshidi (2014) analisaram compósitos cimentícios híbridos (volumes totais de fibras de 1,2% e 2,0%) com substituições das fibras de PVA por PP nas proporções de 25% e 50%. Para os compósitos com 2% de fibras e 25% de PP, a redução da carga correspondente à primeira fissura e a carga de pós-fissuração foram de aproximadamente 4% e 10%, respectivamente.

Pakravan, Jamshidi e Lafiti (2016) investigaram a hibridização de fibras de PP de baixo módulo, com diferentes geometrias de seção transversal (circular – 2 GPa; triangular – 1,5 GPa), combinadas com fibras de PVA de elevado módulo (circular – 40 GPa), nas proporções de 1,6% de PVA e 0,4% de PP. As combinações PVA + PP circular e PVA + PP triangular reduziram a resistência à flexão do compósito em 36% e 33%, respectivamente, quando comparadas ao ECC reforçado apenas com PVA. No entanto, enquanto a combinação PVA + PP circular resultou em redução da deformação em flexão (-3,09%), a mistura com PP triangular aumentou a deformação em 33%.

Lin *et al.* (2020) compararam compósitos ECC reforçados exclusivamente com fibras de PVA (1,5%; 2,0% e 2,5%) com compósitos híbridos contendo o mesmo volume total de fibras, combinando 1,0% de PVA com 0,5%; 1,0% ou 1,5% de PP. Para a mistura com total de 2,0% de fibras, detectaram reduções de 33,54% na resistência à tração e de 21,40% na deformação última. Ainda assim, o incremento no teor de PP aumentou a taxa de enrijecimento

por deformação em comparação ao compósito contendo apenas PVA. Hou e Li (2023) analisaram um ECC híbrido com matriz LC3, teor total de fibras de 2% e diferentes proporções PVA/PP (2,0/0,0; 1,5/0,5; 1,0/1,0; 0,5/1,5 e 0,0/2,0). A mistura com proporção igual a 1,0/1,0 apresentou controle da abertura de fissuras sob tração em torno de 50 μm a 2% de deformação. Com o aumento do teor de fibras de PP, observou-se redução da resistência à tração do compósito entre aproximadamente 40% e 64%. Por outro lado, houve aumento da capacidade de deformação à tração nas misturas 1,0/1,0 (4,55%), 0,5/1,5 (7,58%) e 0,0/2,0 (65,58%). A fibra de PVA apresenta elevada rigidez na costura de fissuras devido à sua elevada rigidez e forte ligação fibra/matriz, enquanto a fibra de PP, com menor rigidez e ligação fibra/matriz fraca, exibe menor ação de ponte entre fissuras.

Além disso, Hu *et al.* (2024) incorporaram fibras de PVA oleada e PP modificada superficialmente na proporção 1:1, totalizando 2% em volume. As fibras de PP apresentavam diâmetro de 150 μm , reduzindo a quantidade de fibras necessárias para ocupar o mesmo volume e, adicionalmente, receberam modificação superficial para melhorar a aderência fibra/matriz. A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostrou que a maioria das fibras de PVA sofreu arrancamento, exibindo superfícies ásperas, enquanto as fibras de PP permaneceram lisas, com alguns pontos de pasta na superfície.

3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL: VISÃO GERAL

Os estudos discutidos no Capítulo 2 contemplam tanto o uso de metacaulim e fíler calcário quanto a hibridização de fibras de PVA e PP. Embora essas duas abordagens sejam exploradas na literatura, ainda persistem lacunas no entendimento do compósito formulado com substituição total da cinza volante por metacaulim e fíler calcário sem modificação no teor total de cimento Portland. Além disso, são limitados os estudos que associam essa estratégia ao uso combinado de fibras de PVA e PP.

Neste contexto, o programa experimental foi desenvolvido em duas etapas para avaliar: (1) o efeito da substituição da cinza volante por metacaulim e o fíler calcário nas propriedades das matrizes e (2) a influência uso de fibras combinadas no compósito cimentício engenheirado (ECC). A sequência das etapas dessa pesquisa é apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma das etapas desenvolvidas no programa experimental



Fonte: Autora (2026).

Previamente às etapas 1 e 2, foi realizada a caracterização dos materiais utilizados na pesquisa por meio de ensaios físicos e químicos. Na Etapa 1, foram formuladas matrizes cimentícias com substituição total da cinza volante por metacaulim (M) e fíler calcário (C), nas proporções 1:1 (1M1C) e 1:2 (1M2C). O teor de cimento e a relação água/finos foi mantido constante e o teor ótimo de aditivo superplastificante definido por meio do ensaio de mini abatimento. Nessa etapa, foram avaliadas três composições (M45; 1M1C; 1M2C) por meio de ensaios de índice de consistência, densidade de massa, resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico e termogravimetria aos 7, 28, 56 e 91 dias.

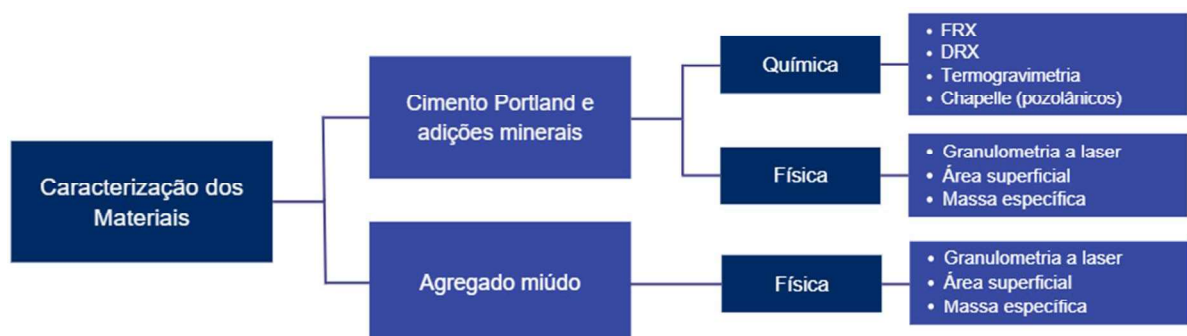
Na Etapa 2, o efeito da hibridização de fibras de álcool polivinílico (PVA) e polipropileno (PP) nas propriedades do ECC foi avaliado em duas matrizes distintas: uma de

referência (M45) e uma constituída de metacaulim e fíler calcário definida na etapa 1 (ME1). Foram estudadas cinco combinações de fibras de PVA e PP, substituindo o teor de fibra de PVA em 0%; 25%; 50%; 75% e 100%. O teor total de fibras foi mantido a 2%, em relação ao volume de sólidos.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O cimento, a cinza volante, o metacaulim e o fíler calcário foram caracterizados por ensaios físicos e químicos, enquanto a areia por ensaios físicos. A caracterização química dos finos foi realizada por fluorescência de raios X (FRX), análise termogravimétrica (TGA) e difração de raios X (DRX). A atividade pozolânica da cinza volante e o metacaulim foi realizada pelo método Chapelle modificado. A caracterização física dos finos e da areia foi realizada por granulometria a laser, massa específica e área superficial BET. Na Figura 13 é apresentado um fluxograma dos ensaios realizados para caracterização dos materiais.

Figura 13 – Fluxograma caracterização dos materiais usados no ECC.

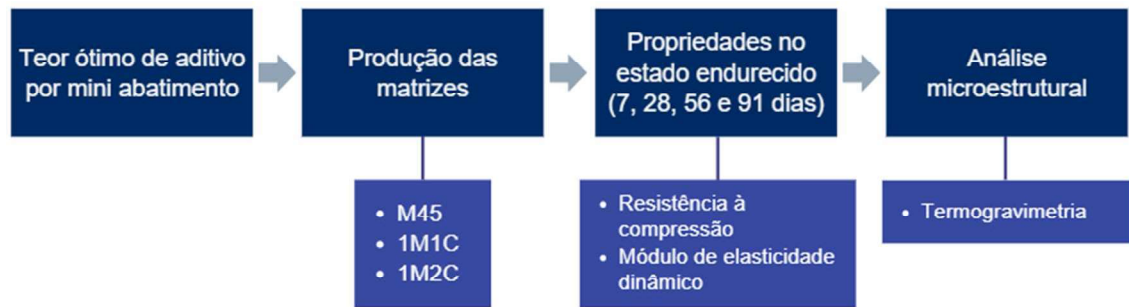


Fonte: Autora (2026).

3.2 ETAPA 1: FORMULAÇÃO DE MATRIZES CIMENTÍCIAS

A Etapa 1 do procedimento experimental teve como objetivo avaliar o desempenho de matrizes desenvolvidas a partir da substituição total de cinza volante por metacaulim e fíler calcário em compósitos cimentícios engenheirados (ECC). Na Figura 14 são apresentados os procedimentos experimentais da Etapa 1 do estudo.

Figura 14 – Fluxograma dos procedimentos experimentais da Etapa 1.



Fonte: Autora (2026).

Nesta etapa, a relação água/finos foi mantida em 0,26 e a relação areia/finos em 0,36. O teor de superplastificante foi ajustado com base nos resultados do ensaio de mini abatimento, visando determinar a dosagem ótima para cada mistura.

O comportamento mecânico das matrizes foi investigado por ensaios de resistência à compressão, conforme NBR 7215:2019, e módulo de elasticidade dinâmico, conforme ABNT NBR 15630:2008. Esses ensaios foram realizados nas idades de 7, 28, 56 e 91 dias. Também foi realizado o ensaio de termogravimetria (TG/DTG), nestas idades, para análise dos produtos hidratados nas matrizes.

3.3 ETAPA 2: FORMULAÇÃO DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS ENGENHEIRADOS

A Etapa 2 consistiu em avaliar a substituição da fibra de PVA pela fibra de PP em cinco teores distintos. Foram adotadas as seguintes combinações de fibras: 2,0% PVA e 0,0% PP; 1,5% PVA e 0,5% PP; 1% PVA e 1% PP; 0,5% PVA e 1,5% PP; e 0% PVA e 2% PP para duas matrizes. Ao todo, foram analisadas dez misturas com fibras combinadas. Uma visão geral dos procedimentos experimentais adotados nesta etapa está apresentada na Figura 15.

Figura 15 – Fluxograma dos procedimentos experimentais da Etapa 2.



Fonte: Autora (2026).

Nesta etapa, o teor de superplastificante foi definido para obtenção do índice de consistência igual a 240 ± 20 mm. Para os compósitos com fibras isoladas (2,0% PVA e 0,0% PP e 0% PVA e 2% PP) da matriz de referência (M45) foram estudados teores distintos de superplastificante a fim de avaliar o efeito da trabalhabilidade na resistência à flexão e deformação do compósito. No estado fresco, foram determinados o índice de consistência (NBR 13276:2016), a densidade de massa e o teor de ar incorporado (NBR 13278:2005).

Foram realizados ensaios de resistência à compressão (NBR 7215:2019), à tração na flexão em três pontos, (NBR 13279:2005) e em quatro pontos (Zhang, Zhang e Deng, 2022). Nesta etapa, também foi avaliada a permeabilidade dos compósitos pelo ensaio de absorção por capilaridade (ABNT NBR 15259:2005). Os ensaios foram realizados aos 56 dias em função do caráter pozolânico dos materiais utilizados (cinza volante e metacaulim), os quais promovem um desenvolvimento tardio das reações e da formação dos produtos de hidratação, refletindo em ganhos de resistência em idades mais avançadas.

Para avaliar a microestrutura do ECC em relação ao mecanismo de falha das fibras foram realizados ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nesse capítulo são apresentadas as características físicas e químicas dos materiais utilizados na produção das matrizes e ECC, com o objetivo de aprimorar a compreensão do comportamento dos compósitos, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido.

Os materiais utilizados foram o cimento Portland CPV – ARI (Nacional), cinza volante (Pozo Fly), metacaulim (Metacaulim do Brasil), fíler calcário Profine 1 (Provale), fibra de álcool polivinílico (PVA), fibra de polipropileno (PP), areia natural quartzosa, aditivo superplastificante à base de éter policarboxilato e água.

4.1 FINOS: CIMENTO E MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES

As matrizes cimentícias do ECC foram produzidas com cimento Portland CPV – ARI, composto por clínquer, sulfato de cálcio e material carbonático. Optou-se pela sua utilização devido ao menor teor de adições, de modo que a influência de demais materiais cimentícios suplementares possa ser excluída. Os materiais cimentícios suplementares são a cinza volante, proveniente de uma planta termelétrica no sul do Brasil, metacaulim e fíler calcário.

4.1.1 Fluorescência de Raios X (FRX)

A identificação dos principais óxidos da composição cimento e das adições foi feita por Fluorescência de Raios X (FRX). Previamente à análise de FRX, determinou-se a perda ao fogo para determinação do teor de voláteis do material. A perda ao fogo foi determinada conforme NBR NM 18:2012, utilizando uma mufla da marca *Jung*, no laboratório do Núcleo de Processos Biotecnológicos (NUCBIO/UFU), a uma temperatura máxima de 1000°C. A técnica de preparo de amostra realizada para o FRX é a de pérola fundida, com utilização de 1 g de material, fundente tetraborato de lítio e solução de brometo de lítio. Após fundição, o material foi analisado num espectrômetro de FRX, modelo S8 Tiger da marca *Bruker*, no Laboratório Multiusuário em Energias Renováveis (LAMER/UFU), utilizando o *software* GeoQuant. A composição química do cimento e das adições utilizadas estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Composição química do cimento e adições utilizados.

Óxidos (%)	Cimento	Cinza Volante	Calcário	Metacaulim
CaO	57,85	1,70	32,13	0,10
SiO ₂	17,16	58,31	1,17	44,66
Al ₂ O ₃	4,34	22,71	0,08	38,76
Fe ₂ O ₃	2,70	4,94	0,00	4,79
MgO	2,62	0,83	5,46	0,18
SO ₃	1,73	0,01	0,00	0,01
K ₂ O	0,95	2,84	0,01	0,76
TiO ₂	0,23	1,05	0,01	1,28
P ₂ O ₅	0,18	0,10	0,03	0,07
Na ₂ O	0,13	0,74	0,02	0,17
Mn ₂ O ₃	0,09	0,04	0,00	0,14
Perda ao fogo	5,88	3,87	37,8	5,07

Fonte: Autora (2026).

O cimento Portland CPV atende aos requisitos estabelecidos pela NBR 16697:2018 quanto aos teores máximos de óxido de magnésio (MgO) e perda ao fogo, ambos limitados a 6,5%.

A cinza volante é composta predominantemente por sílica e alumina, com $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$, perda ao fogo inferior a 6%, teor de óxido sulfúrico (SO₃) igual a 0,01%, valor inferior ao limite de 5% estabelecido pela NBR 12653:2014, além de baixo teor de óxido de cálcio (CaO) (1,7%). De acordo com a ASTM C618:202, a cinza volante é classificada como Classe F, em razão do teor de CaO inferior a 18%, característica associada a materiais com propriedades exclusivamente pozolânicas.

O filer calcário é composto por CaO e apresenta óxido de magnésio em sua composição. A impureza ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) presente no calcário é de 1,25%.

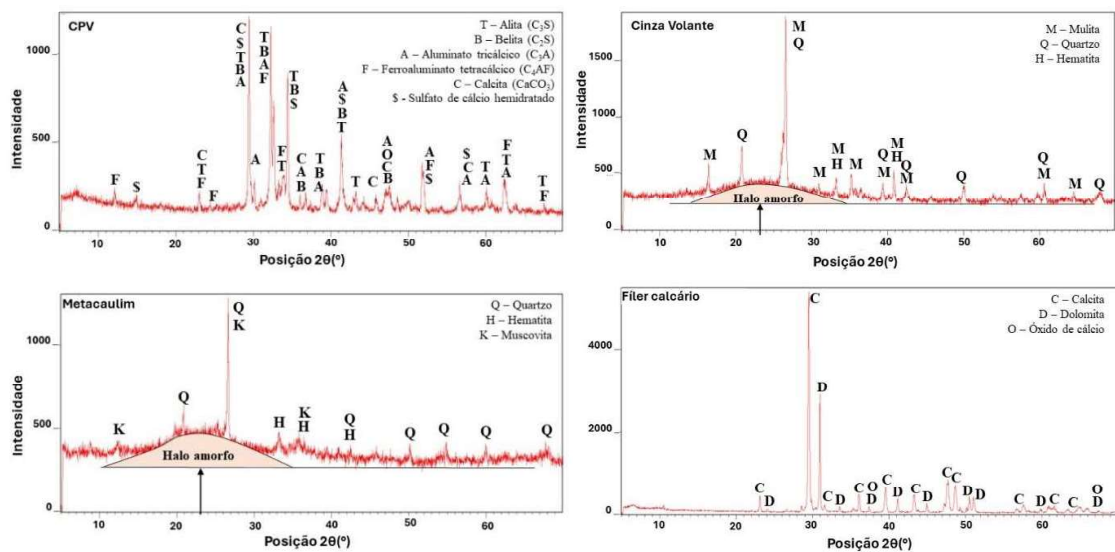
O metacaulim é composto principalmente por sílica, alumina e ferro e atende aos limites químicos de dióxido de silício (SiO₂) ($\geq 44\%$ e $\leq 65\%$) e Al₂O₃ ($\geq 32\%$ e $\leq 46\%$) estabelecidos pela NBR 15894:2010 e o somatório dos teores de CaO e MgO é inferior a 1,5%. Entretanto, o valor de perda ao fogo do material excedeu o limite especificado de 4%. O somatório dos teores de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ correspondeu a 88,21%, superando o limite de 70% especificado pela NBR 12653:2014. Além disso, o teor de óxido de ferro é o responsável pela coloração vermelho-alaranjada da amostra de metacaulim utilizada.

4.1.2 Difração de Raios X

As fases cristalinas presentes nos materiais foram detectadas por meio da difração de raios X utilizando-se equipamento Shimadzu modelo XRD6000, localizado no Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Federal de Uberlândia. Foi utilizada uma fonte de radiação $\text{CuK}\alpha$, com voltagem 60,0 kV, corrente 50,0 mA, intervalo de varredura de $2\theta = 4$ a 70° , velocidade de $2^\circ/\text{min}$ e passo de $0,02^\circ$.

A identificação qualitativa das fases cristalinas foi realizada com base nas fichas cristalográficas ICSD (*International Crystal Structure Database*). Os difratogramas obtidos para o cimento, cinza volante, metacaulim e filer calcário são mostrados na Figura 16. Os compostos cristalinos identificados são apresentados na Tabela 10.

Figura 16 – Difratogramas obtidos para o cimento, cinza volante, metacaulim e filer calcário.



Fonte: Autora (2026).

Os principais compostos identificados pela DRX corroboram com os principais óxidos detectados na FRX. O difratograma da cinza volante apresenta um halo amorfo, característico de materiais pozzolânicos, em $23^\circ 2\theta$ (Hoppe Filho, 2008). Os compostos cristalinos encontrados são o óxido de silício (quartzo), o sílico-aluminato (mulita) e o óxido de ferro (hematita).

O espectro de difração de raios X do metacaulim identificou o óxido de silício (quartzo) e o sílico-aluminato hidratado de potássio (muscovita) como os principais compostos cristalinos da amostra. Na Figura 16, identifica-se o halo amorfo do metacaulim também na região de $23^\circ 2\theta$, indicando a presença de material amorfo na amostra (Medina, 2011).

Para o fíler calcário, identificou-se a presença de carbonato de cálcio (calcita), carbonato de cálcio e magnésio (dolomita) e óxido de cálcio (cal livre), confirmando a natureza carbonática do material.

Tabela 10 – Compostos identificados no cimento Portland, cinza volante, metacaulim e fíler calcário por DRX.

Material	Nome do composto	Fórmula Química	Mineral	Código de Referência
Cimento Portland	Silicato tricálcico	C_3SiO_5	Alita	49-0442
	Silicato dicálcico	Ca_2SiO_4	Belita	49-1673
	Aluminato tricálcico	$Ca_3Al_2O_6$	-	38-1429
	Ferro-aluminato tricálcico	$Ca_2(Al,Fe^{+3})_2O_5$	Brownmillerita	30-0226
	Sulfato de cálcio hemihidratado	$CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$	Bassanita	41-0224
	Carbonato de cálcio	$CaCO_3$	Calcita	24-0027
Cinza Volante	Óxido de silício	SiO_2	Quartzo	01-85-0930
	Sílico-aluminato	$Al_4.52Si_{1.48}O_{9.74}$	Mulita	01-079-1457
	Óxido de ferro	Fe_2O_3	Hematita	01-073-0603
Metacaulim	Óxido de silício	SiO_2	Quartzo	01-85-0930
	Sílico-aluminato hidratado de potássio	$KMg_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$	Muscovita	010-0495
Fíler calcário	Carbonato de cálcio	$CaCO_3$	Calcita	24-0027
	Carbonato de cálcio e magnésio	$CaMg(CO_3)_2$	Dolomita	036-0426
	Óxido de cálcio	CaO	Cal livre	043-1001

Fonte: Autora (2026).

4.1.3 Método Chapelle Modificado

A atividade pozolânica da cinza volante e do metacaulim foi determinada pelo método Chapelle modificado, conforme NBR 15895:2010. O ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília (LEM/UnB), utilizando-se solução de tetraborato de sódio para a padronização do ácido clorídrico (HCl) empregado nas etapas de titulação. O método baseia-se na quantificação do consumo de cal (CaO) decorrente da reação pozolânica, a partir da mistura de $1,0000 \pm 0,0010$ g da amostra do material pozolânico com $2,0000 \pm 0,0010$ g de óxido de cálcio (CaO) em 250 mL de água, mantida sob agitação por 16 ± 1 h. O índice de atividade pozolânica foi calculado em função da quantidade de CaO fixada pelo material, sendo o resultado expresso em mg de $Ca(OH)_2$ fixado por grama de material.

pozolânico. De acordo com Raverdy *et al.* (1980), um material é classificado como pozolânico quando apresenta consumo mínimo de 330 mg CaO por grama de amostra (436 mg de $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ de amostra).

Os resultados do ensaio Chapelle modificado para a cinza volante e o metacaulim são apresentados na Tabela 11. O índice de atividade pozolânica foi determinado a partir da média de duas repetições realizadas para cada material. Observou-se que o metacaulim apresentou elevada atividade pozolânica, com valor médio de 744,136 mg $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$, superior ao limite mínimo de 436 mg $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$, sendo, portanto, classificado como material pozolânico. A cinza volante apresentou valor médio de 300,89 mg $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$, inferior ao critério de referência, indicando baixa reatividade pozolânica nas condições de ensaio e, conseqüentemente, não sendo classificada como pozolânica pelo método adotado.

Tabela 11 – Médias e desvios padrão do índice de atividade pozolânica da cinza volante e do metacaulim.

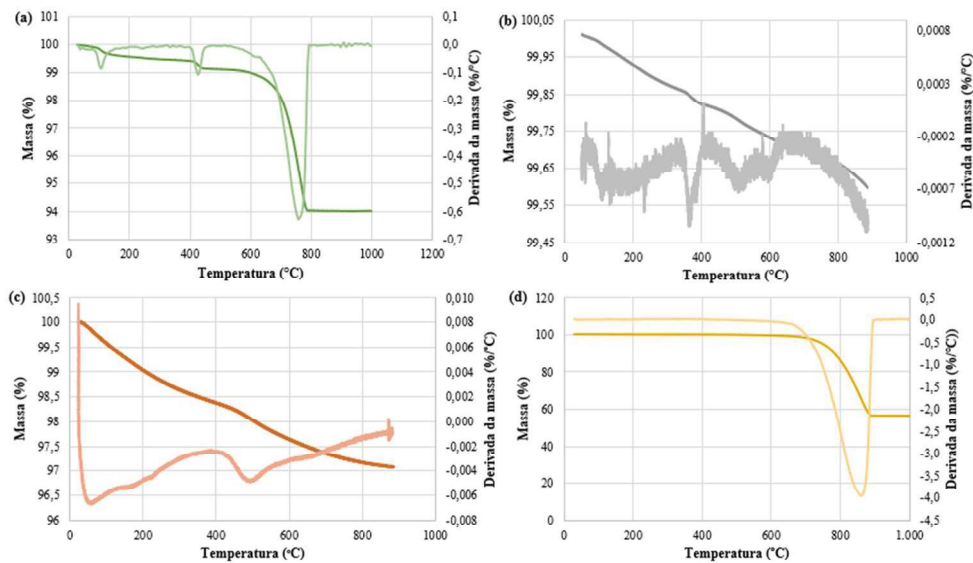
Amostra	Atividade pozolânica (mg Ca(OH)_2 / grama de amostra)
Cinza volante	300,89 $\pm$ 52,85
Metacaulim	744,13 $\pm$ 335,64

Fonte: Autora (2026).

4.1.4 Análise termogravimétrica (TG/DTG)

A análise termogravimétrica foi realizada pelo sistema TA *Instruments*, da série Discovery modelo TGA 55, localizado no Laboratório de Química dos Materiais no Campus Pontal (UFU), a partir da medição da mudança de massa do material em função do aumento da temperatura. O objetivo é identificar os principais processos que ocorrem durante a mudança de massa nos materiais anidros. Os ensaios foram realizados em atmosfera inerte, em cadinho de alumina sem tampa, taxa de aquecimento de 20°/min entre 25°C e 900°C e massa padronizada de 50 mg. Os resultados são mostrados na Figura 17.

Figura 17 – Curvas de termogravimetria dos materiais finos na forma anidra: (a) cimento; (b) cinza volante; (c) metacaulim; e (d) filer calcário.



Fonte: Autora (2026).

A termogravimetria diferencial (DTG) consiste na derivada da curva termogravimétrica (TG) para obter os picos correspondentes aos fenômenos que ocorrem na amostra. Durante o incremento de temperatura, são analisadas três regiões: desidratação (105 °C – 400 °C), desidroxilação (400 °C – 500 °C) e descarbonatação (500°C – 800 °C) (Scrivener, Snellings e Lothenbach, 2016).

A TG do cimento CPV (Figura 17.a) apresentou três picos. Os picos 1 (85 °C – 145 °C) e 2 (400 °C – 450 °C) correspondem à desidratação do C-S-H e desidroxilação da portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), respectivamente, no cimento hidratado, o que leva a inferir que o cimento sofreu leve hidratação na estocagem. As perdas de massa nos picos 1 e 2 são 0,26 mg e 0,28 mg e o teor de portlandita é de 1,15%. O pico 3 (570 °C – 800 °C) da DTG do cimento corresponde à descarbonatação do carbonato de cálcio (CaCO_3). A perda de massa nesse pico é 5,02 mg e o teor de carbonato de cálcio calculado é 11,41%.

A TG da cinza volante (Figura 17.b) apresentou perda de massa total igual a 0,43%, indicando massa residual significativa. Nota-se na curva DTG, a presença de ruídos, o que dificultou a identificação das perdas de massa referente a cada pico característico. Wons *et al.* (2020) analisando dois tipos de cinza volante por DTA/TG e análise de gases liberados (EGA) identificou a presença de quatro picos característicos: 20 a 200°C referente a perda de água adsorvida; 200 a 230°C devido ao processo de carbono residual; 400°C ocorre a combustão de hidrocarbonetos e carbono residual, seguida pela liberação de água; 700°C e 800°C ocorre a

descarbonatação do carbonato de cálcio presente, sendo esse o pico verificado com maior perda de massa. No caso da cinza volante analisada, não foi identificada a presença de carbonato de cálcio no DRX.

A curva DTG do metacaulim (Figura 17.c) apresentou um pico em torno de 60°C, associado à perda de água livre. Observou-se ainda um segundo pico entre 400 °C e 600°C, correspondente à desidroxilação da caulinita, comportamento também reportado por Medina, 2011.

O filer calcário (Figura 17.d) apresentou apenas um pico entre 630°C e 885°C correspondente à descarbonatação dos carbonatos de cálcio e magnésio e perda de massa por aquecimento nesse pico de 43,38 mg. O teor calculado de carbonatos para o calcário corresponde a 98,59% e atende ao requisito normativo da NBR 16697:2018 para utilização como material carbonático (> 75%).

4.1.5 Massa específica, área superficial e distribuição granulométrica

Os materiais finos foram caracterizados por ensaios de massa específica, área superficial e distribuição granulométrica das partículas. A massa específica dos materiais finos foi determinada segundo recomendações da NBR 16605:2017, com utilização de um frasco volumétrico de Le Chatelier e querosene como meio dispersor.

Para a análise da área superficial específica utilizou-se o método BET no analisador da marca *Micromeritics*, modelo ASAP 2020 Plus. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência (LME-CICS) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) e no Laboratório de Química de Materiais no Campus Pontal (UFU). A análise consiste na adsorção de partículas de gás nitrogênio para quantificar a área superficial das partículas. Os valores de massa específica e área superficial BET são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 – Massa específica e área superficial dos materiais finos que compõem o ECC.

Propriedade	Cimento	Cinza Volante	Metacaulim	Calcário
Massa específica (g/cm ³)	3,07	1,98	2,67	2,76
Área superficial BET (m ² /g)	1,49 ¹	0,41	26,65	4,01 ¹
Área superficial por difração a laser (m ² /g)	1,25	1,10	0,96	3,28
Fator de forma ²	1,19	0,37	27,76	1,25

Fonte: Autora (2026).

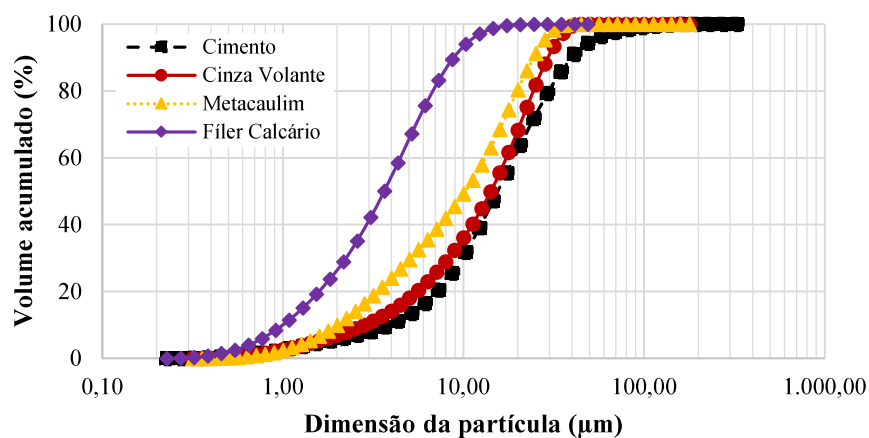
¹ Ensaios realizados no Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência (LME-CICS) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

² Relação entre a área superficial BET e a área superficial por difração a laser.

O fator de forma dos materiais foi calculado pela razão entre a área superficial BET e a área superficial obtida por difração a laser, uma análise que pressupõe que as partículas são esféricas, lisas e sólidas (Hunger e Brouwers, 2009). O cimento, o calcário e o metacaulim apresentam fatores de forma maiores que 1. O elevado fator de forma do metacaulim reflete sua forma irregular e angulada (Cai *et al.*, 2018). O fator de forma da cinza volante apresentou resultado menor que 1, que pode ser atribuído ao processo de produção da cinza volante ou à aglomeração do material. O valor de área superficial BET obtido para a cinza volante ($0,41 \text{ m}^2/\text{g}$) está coerente com os resultados reportados por Magalhães, Cezar e Lustosa (2023), que obtiveram $0,51 \text{ m}^2/\text{g}$, e por Parente (2020), que registrou $0,76 \text{ m}^2/\text{g}$, ambos para cinzas volantes fornecidas pela mesma empresa (Pozofly).

A distribuição granulométrica das partículas dos materiais finos foi determinada por granulometria a laser, utilizando o equipamento *Mastersizer 2000* da marca *Malvern* com acessório *Hydro 2000 MU* para análise em via úmida, localizado no Laboratório de Separação de Sólido- Fluidos (LASSF) da Universidade Federal de Uberlândia. As partículas de cimento, de cinza volante e de metacaulim foram suspensas em álcool isopropílico PA, enquanto as partículas do filer calcário foram dispersas em água, ambos processos realizados com auxílio de ondas ultrassônicas a uma velocidade de rotação de 2500 rpm. Para cada amostra, foram realizadas cinco leituras de granulometria. As curvas granulométricas dos materiais finos (cimento CPV, metacaulim, cinza volante, filer calcário) estão representadas na Figuras 18. Os valores de D10, D50 e D90 são mostrados na Tabela 13.

Figura 18 – Distribuição das dimensões das partículas do cimento, cinza volante, metacaulim e filer calcário utilizados na produção do ECC.



Fonte: Autora (2026).

Tabela 13 – Diâmetros D10, D50 e D90 dos materiais finos que compõem o ECC.

Diâmetros	Cimento	Cinza Volante	Metacaulim	Calcário
D10 (µm)	2,2	2,5	2,0	0,9
D50 (µm)	12,6	12,6	10,2	2,5
D90 (µm)	34,0	26,1	24,4	7,0

Fonte: Autora (2026).

A distribuição granulométrica da cinza volante é semelhante à do cimento CPV utilizado, com D50 igual a 12,6 µm em ambos os materiais (ou seja, 50% das partículas apresentam diâmetro $\leq 12,6$ µm). O metacaulim apresenta partículas mais finas, com diâmetro médio de 10,2 µm. Com diâmetro médio de 2,5 µm, o filer calcário é o material utilizado que possui a distribuição granulométrica mais fina.

4.2 FIBRAS POLIMÉRICAS

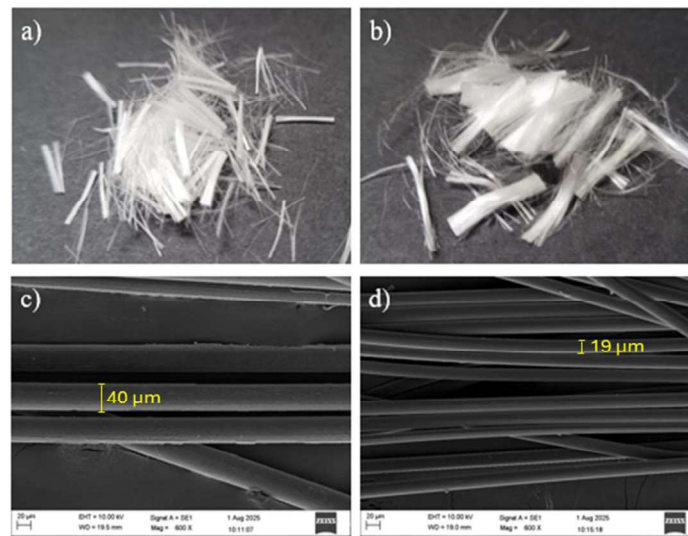
As fibras utilizadas na composição dos ECCs são de álcool polivinílico (PVA) e polipropileno (PP). As fibras hidrofílicas de PVA (REC15), da marca *Kuraray Corporation*, têm diâmetro de 40 µm e comprimento de 8 mm. As fibras hidrofóbicas PP (PMN 12/18) com diâmetros 18 µm e comprimento de 12 mm são da marca alemã *Krampe Harex*. As propriedades das fibras são apresentadas na Tabela 14. As fibras são ilustradas na Figura 19.

Tabela 14 – Características físicas e mecânicas das fibras de PVA e PP utilizadas no ECC.

Fibras	Diâmetro (µm)	Comprimento (mm)	Densidade (kg/m³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento (%)
PVA	40	8	1300	1560	28	12,5
PP	18	12	910	300	1,3 – 1,8	9

Fonte: Dados dos fornecedores (2026).

Figura 19 – Morfologia das fibras de PVA e PP: (a) PVA; (b) PP; (c) imagem MEV das fibras de PVA; e (d) imagem MEV das fibras de PP.

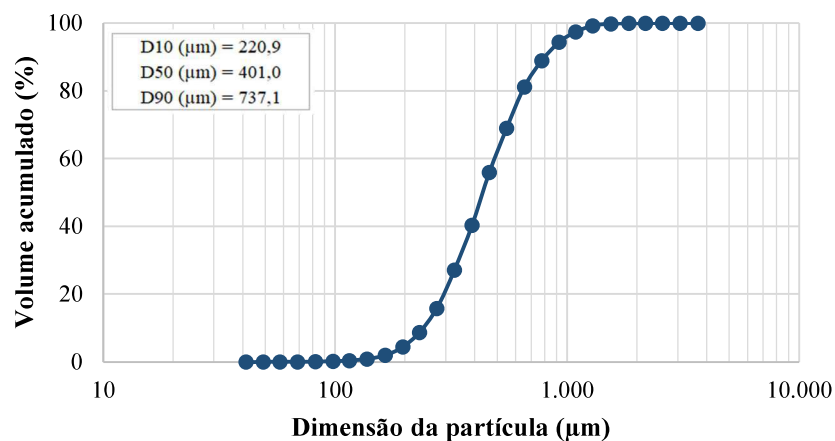


Fonte: Autora (2026).

4.3 AGREGADO MIÚDO

A areia natural quartzosa utilizada foi adquirida comercialmente na cidade de Uberlândia – MG. Sua distribuição granulométrica foi determinada pela técnica de análise de imagens dinâmicas para determinar o tamanho das partículas, utilizando o equipamento Qicpic (*Sympatec*) com dispersão a seco por gravidade *Gradis* e taxa de aquisição dos dados de 25 imagens por segundo. A massa da amostra de areia para análise foi de 329,15 g. A Figura 20 apresenta a distribuição granulométrica da areia e os diâmetros característicos (D10, D50 e D90) das partículas.

Figura 20 – Distribuição granulométrica da areia natural.



Fonte: Autora (2026).

A massa específica da areia foi determinada por picnometria de gás Hélio no equipamento Accupyc 1340 (marca *Micromeritics*) e a área superficial específica obtida pelo método BET a partir da adsorção de nitrogênio com utilização do equipamento *Belsorp Max* (Bel Japan). As características físicas da areia são apresentadas na Tabela 15. O diâmetro médio das partículas da areia é 401 μm , enquanto o diâmetro médio da areia comumente utilizada no ECC é de 110 μm , segundo Li (2008).

Tabela 15 – Características físicas da areia natural.

Propriedades	Areia natural
Densidade (g/cm^3)	2,09
Área superficial BET (m^2/g)	3,06
D10 (μm)	220,9
D50 (μm)	401,0
D90 (μm)	737,1

Fonte: Autora (2026).

4.4 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE E ÁGUA

Para alcançar a trabalhabilidade adequada, será utilizado aditivo superplastificante *MasterGlenium 3500*, da marca BASF, com base química de éter policarboxilato e densidade variando de 1,10 a 1,14 g/cm^3 (BASF, 2014). A água utilizada nas matrizes e no ECC é proveniente da rede de abastecimento de água do município de Uberlândia – MG.

4.5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Os ensaios de caracterização física indicaram que o cimento e a cinza volante possuem distribuições granulométricas semelhantes, com D50 igual a 12,6 μm , enquanto o metacaulim apresentou partículas ligeiramente mais finas (D50 de 10,2 μm). O filer calcário, por sua vez, apresentou a maior finura entre os materiais (diâmetro médio de 2,5 μm), indicando potencial para intensificar o efeito filer e atuar como agente de nucleação, o que pode favorecer o preenchimento de vazios e o empacotamento da matriz.

O cimento, o filer calcário e o metacaulim apresentam partículas predominantemente não esféricas e de superfície irregular conforme indicado pelos fatores de forma superiores a 1. Além da superfície irregular, o metacaulim apresentou a maior área superficial (26,65 m^2/g).

Em termos de caracterização química, tanto o metacaulim quanto a cinza volante apresentaram halo amorfo, característica associada a materiais pozolânicos. Entretanto, pelo método Chapelle modificado a atividade pozolânica foi identificada apenas para o metacaulim, classificando a cinza volante como um material sem atividade pozolânica.

As fibras poliméricas de PVA e PP utilizadas diferem em suas características físicas e mecânicas. As fibras de PVA possuem natureza hidrofílica e apresentam maiores valores de densidade, resistência à tração, módulo de elasticidade e alongação. Por outro lado, as fibras de PP apresentam caráter hidrofóbico e menor diâmetro, o que implica a necessidade de um número de fibras aproximadamente sete vezes maior para uma mesma fração volumétrica de fibras de PVA.

5 ESTUDO EM MATRIZES

Este capítulo tem como objetivo avaliar a influência da substituição total da cinza volante por metacaulim e fíler calcário nas propriedades de matrizes, para posteriormente aplicação nos compósitos cimentícios engenheirados. Foram estudadas três matrizes, uma de referência com cinza volante (M45) e duas constituídas pelo uso combinado de metacaulim e fíler calcário, nas proporções 1M:1C e 1M:2C. Foram realizados ensaios de mini abatimento para definição do teor ótimo de aditivo em pastas; e resistência à compressão e termogravimetria em matrizes, nas idades de 7, 28, 56 e 91 dias.

5.1 MATRIZES ESTUDADAS

As matrizes foram confeccionadas com cimento Portland CPV – ARI, cinza volante, fíler calcário e metacaulim. A caracterização dos materiais utilizados foi apresentada no Capítulo 4.

A matriz de referência segue a formulação M45, na qual a proporção entre cimento e cinza volante é de 1:1,2 em massa. A cinza volante foi substituída, em volume, por metacaulim e fíler calcário nas proporções 1:1 (1M1C) e 1:2 (1M2C). As proporções das adições minerais foram ajustadas com o objetivo de investigar a influência desses materiais nas propriedades da matriz cimentícia. A relação água/finos foi mantida constante em 0,26, assim como a relação areia/finos, fixada em 0,36. As proporções em massa das misturas analisadas são apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Traço unitário em massa para as matrizes cimentícias estudadas: Etapa 1.

Materiais	M45	1M1C	1M2C
Cimento	1	1	1
Cinza volante	1,2	-	-
Calcário	-	0,85	1,14
Metacaulim	-	0,81	0,54
Areia/finos	0,36	0,36	0,36
Água/finos	0,26	0,26	0,26

Fonte: Autora (2026).

O teor de aditivo superplastificante foi determinado pelo ensaio de mini abatimento.

5.2 MÉTODOS DE ENSAIO

5.2.1 Determinação do teor ótimo de aditivo

O teor de aditivo superplastificante foi determinado pelo ensaio de mini abatimento adaptado da metodologia proposta por Kantro (1980). Para a execução do ensaio, utilizou-se um mini cone posicionado sobre uma base, ambos em acrílico, determinando-se o espalhamento médio das misturas. Foram estudadas as três pastas: M45, 1M1C e 1M2C, mantendo-se as proporções de finos e relação água/finos apresentadas na Tabela 16.

Os materiais em pó, previamente homogeneizados, foram misturados manualmente com o aditivo superplastificante diluído em água, por 30 segundos. Em seguida, a mistura foi realizada mecanicamente, utilizando mixer (500W) operando em velocidade mínima por 60 s, seguida de uma pausa de 15 s e, posteriormente, em velocidade alta por 30 s, totalizando 90 s de mistura mecânica. Após a mistura, o molde em formato de tronco cone foi preenchido sobre a base de acrílico. O diâmetro de espalhamento foi medido em três direções, 45 s após o preenchimento e retirada do molde. O teor ótimo de aditivo foi definido como o ponto correspondente à estabilização do diâmetro de espalhamento, mesmo com o aumento do teor de aditivo.

5.2.2 Comportamento mecânico das matrizes

O comportamento mecânico das matrizes foi avaliado pelos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico e resistência à compressão. Foram moldados corpos de prova cilíndricos 5×10 cm conforme a NBR 7215:2019. Os ensaios foram realizados aos 7, 28, 56 e 91 dias. Para cada mistura e idade, foram moldados três corpos de prova, totalizando trinta e seis corpos de prova cilíndricos.

O módulo de elasticidade dinâmico foi realizado com o equipamento de ultrassom da marca *Controls*, modelo 58E-48, com transdutores de 50 mm de diâmetro, frequência 54 kHz e resolução de 0,01 μ s. O ensaio foi realizado conforme NBR 15630:2008. Posteriormente, foi determinada a resistência à compressão em máquina universal de ensaios EMIC DL60000, disponível no Laboratório de Estruturas (FECIV/UFU).

5.2.3 Análise termogravimétrica (TG/DTG)

A análise dos produtos de hidratação das matrizes foi realizada por meio da análise termogravimétrica (TG/DTG). Fragmentos dos corpos de provas ensaiados à compressão foram coletados e secos em estufa a 40 °C por 30 min. Em seguida, as amostras foram submetidas à paralisação da hidratação pelo método de troca de solvente, no qual a água foi substituída por álcool isopropílico, conforme procedimento adaptado de Maciel *et al.* (2019). O procedimento consistiu em dois ciclos de imersão de 1 h, na proporção de 1 g de pasta para 10 mL de isopropílico, seguidos de dois ciclos de 24 h na proporção de 1:50. Após a troca de solvente, as amostras foram novamente secas em estufa a 40°C por 30 min, moída em moinho de discos oscilantes da marca Herzog e peneiradas, sendo utilizada para análises a fração passante na peneira 75 µm.

Os ensaios de termogravimetria foram realizados em um equipamento da série *Discovery* modelo TGA 55 (TA *Instruments*), por meio da medição da variação de massa do material em função do aumento de temperatura. O objetivo da análise é identificar os principais processos associados à perda de massa dos materiais hidratados nas idades de 7, 28, 56 e 91 dias, a fim de avaliar o desenvolvimento da hidratação. As análises foram conduzidas em atmosfera inerte, utilizando cadinho de alumina sem tampa, com taxa de aquecimento de 20°C/min no intervalo de temperatura de 25°C a 900°C e massa padronizada da amostra padronizada em 15 mg.

5.2.4 Análise estatística

A significância estatística dos efeitos da idade e do tipo de matriz nas propriedades mecânicas das matrizes foi avaliada por meio da análise de variância (ANOVA) de dois fatores com repetição, adotando-se intervalo de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$). Quando constatada diferença estatisticamente significativa, aplicou-se o teste de Tukey, com o objetivo de identificar grupos homogêneos em relação à propriedade analisada.

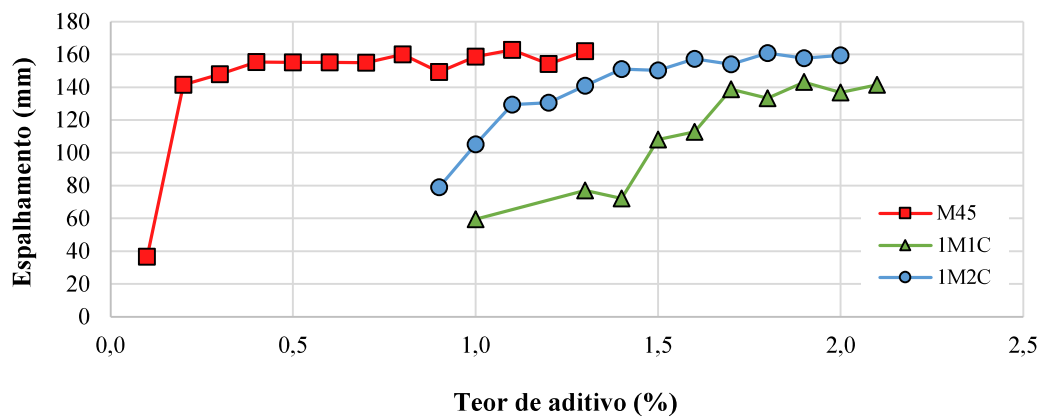
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.3.1 Determinação do teor ótimo de aditivo superplastificante

Na Figura 21 e Tabela 17 são apresentados os diâmetros espalhamento (D) em função dos teores de aditivo superplastificante (SP), expressos em relação a quantidade total de finos, para cada mistura avaliada.

Conforme esperado, o aumento do teor de superplastificante resultou no maior espalhamento, indicando uma melhora na fluidez da matriz até atingir o ponto de saturação. Considerando que todas as pastas analisadas foram produzidas com a mesma relação água/finos e volume constante finos, a variação na demanda de aditivo superplastificante foi atribuída às características das adições empregadas. Essas substituições influenciaram na reologia da mistura, exigindo maiores teores de aditivo para alcançar a fluidez.

Figura 21 – Curvas teor de aditivo versus espalhamento medidos pelo ensaio de mini abatimento das misturas M45, 1M1C e 1M2C.



Fonte: Autora (2026).

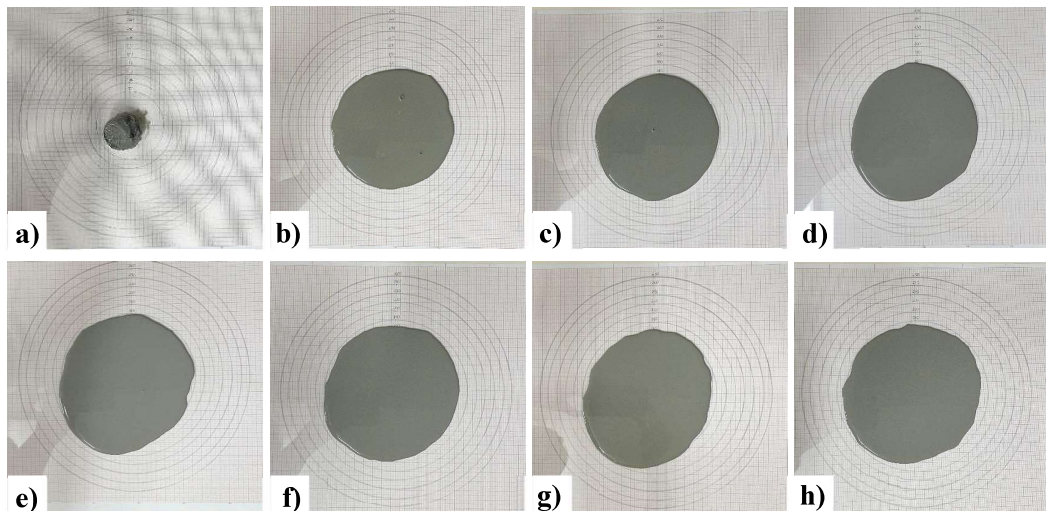
Tabela 17 – Teor de aditivo utilizado e os respectivos diâmetros médios pelo mini espalhamento para as misturas M45, 1M1C e 1M2C.

Matriz M45													
SP (%)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3
D (mm)	36,7	141,5	148,0	155,3	155,2	155,2	155,0	160,1	149,3	158,7	162,8	154,2	162,0
Matriz 1M1C													
SP (%)	0,5	1	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1	-	-
D (mm)	-	59,6	77,1	72,2	108,1	112,7	138,8	133,2	143,2	136,8	141,5	-	-
Matriz 1M2C													
SP (%)	0,5	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
D (mm)	-	79,1	105,2	129,4	130,6	140,9	151,0	150,2	157,2	153,9	160,8	157,6	159,4

Fonte: Autora (2026).

A mistura M45, composta por cimento e cinza volante, apresentou aumento no espalhamento até o teor 0,4% de SP, conforme mostrado nas Figuras 21 e 22. A partir desse ponto, os valores de espalhamento passaram a diminuir ou estabilizar em aproximadamente 155 mm. Comparadas à matriz M45, as pastas formuladas com metacaulim e filer calcário apresentaram maior demanda por aditivo. Com teores de SP inferiores a 0,9%, a mistura 1M1C não apresentou fluidez suficiente para a realização do ensaio de mini abatimento.

Figura 22 – Ensaio de mini abatimento da pasta M45: (a) 0,1% SP; (b) 0,2% SP; (c) 0,3% SP; (d) 0,4% SP; (e) 0,5% SP; (f) 0,6% SP; (g) 0,7% SP; (h) 0,8% SP.

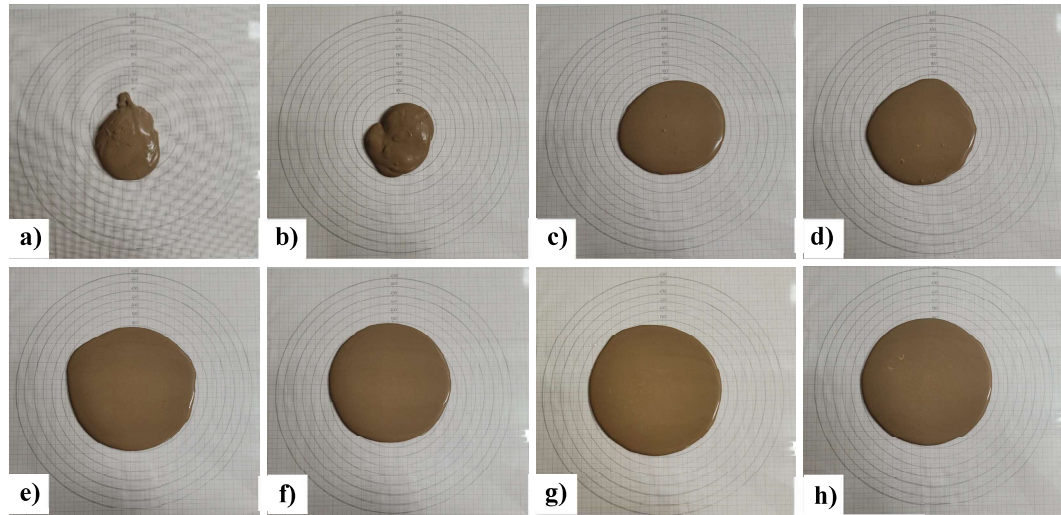


Fonte: Autora (2026).

Em relação às misturas 1M1C (Figura 23) e 1M2C (Figura 24), notou-se uma tendência de estabilização com teores de SP de 1,7% e 1,4%, respectivamente. Dessa forma, esses valores

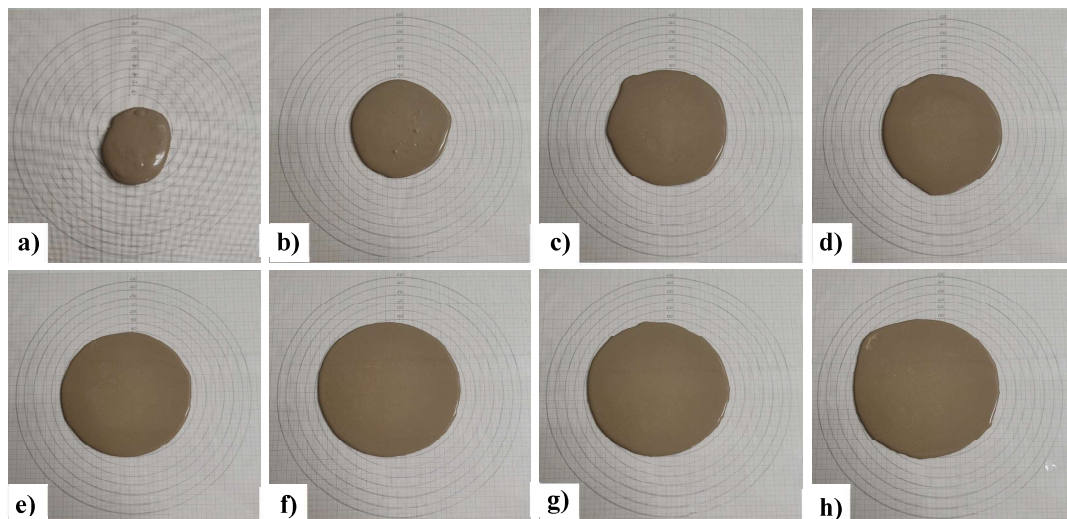
foram definidos como os teores ótimos de superplastificante para cada uma das pastas, correspondendo ao ponto de saturação do aditivo, além do qual não se observam ganhos significativos de fluidez com o aumento do teor de SP.

Figura 23 – Ensaio de mini abatimento da pasta 1M1C: (a) 1,3% SP; (b) 1,4% SP; (c) 1,5% SP; (d) 1,6% SP; (e) 1,7% SP; (f) 1,8% SP; (g) 1,9% SP; (h) 2,1% SP.



Fonte: Autora (2026).

Figura 24 – Ensaio de mini abatimento da pasta 1M2C: (a) 0,9% SP; (b) 1,0% SP; (c) 1,1% SP; (d) 1,2% SP; (e) 1,3% SP; (f) 1,4% SP; (g) 1,5% SP; (h) 1,6% SP.



Fonte: Autora (2026).

As partículas comumente esféricas da cinza volante tendem a reduzir a tensão de escoamento e a viscosidade plástica da mistura, o que melhora a fluidez do material e pode

reduzir a quantidade de água necessária para alcançar a fluidez (Burgos-Montes, Alonso e Puertas, 2013). Por outro lado, as partículas de elevada área específica ($26,6 \text{ m}^2/\text{g}$) do metacaulim aumentam a tensão de escoamento e viscosidade (Vance *et al.*, 2023). Consequentemente, as misturas com metacaulim e fíler calcário exigem maior demanda de água e aditivo na mistura para manter a fluidez (Frías, Rojas e Cabrera, 2000; Cai *et al.*, 2018).

Outro fator relevante que contribui no aumento de aditivo é a presença de partículas finas nos sistemas cimentícios. No presente estudo, as dimensões médias das partículas (D50) do fíler calcário ($2,5 \text{ }\mu\text{m}$) e do metacaulim ($10,2 \text{ }\mu\text{m}$) são inferiores à dimensão das partículas da cinza volante ($12,6 \text{ }\mu\text{m}$). A incorporação de materiais com elevada finura aumenta o esforço de escoamento (Dhandapani *et al.*, 2021; Al-Fakih *et al.*, 2023; Yu, Wu e Leung, 2020), além de favorecer a aglomeração das partículas do metacaulim, o que eleva a demanda de água da pasta (Vance *et al.*, 2023).

5.3.2 Comportamento mecânico das matrizes

A Tabela 18 apresenta os valores médios e desvio-padrão (DP) da resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico das matrizes estudadas nas quatro idades avaliadas. A análise estatística indicou que o tipo de matriz, a idade e a interação entre esses fatores exerceram influência estatisticamente significativa sobre a resistência à compressão. O detalhamento da análise estatística consta no Apêndice B.

Tabela 18 – Resultados médios de resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico e desvio padrão das matrizes, aos 7, 28, 56 e 91 dias.

Resistência à compressão (MPa)					Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)				
Matriz		M45	1M1C	1M2C	Matriz		M45	1M1C	1M2C
7 dias	Média	39,38	75,28	73,05	7 dias	Média	25,79	29,01	30,02
	DP	1,40	1,10	2,95		DP	0,31	0,37	0,46
28 dias	Média	65,45	96,51	81,92	28 dias	Média	30,16	29,52	32,59
	DP	0,64	2,46	2,16		DP	0,42	0,32	0,66
56 dias	Média	73,61	108,06	82,31	56 dias	Média	26,47	24,47	32,31
	DP	2,85	2,67	2,94		DP	0,99	1,56	1,31
91 dias	Média	92,35	92,64	96,71	91 dias*	Média	-	-	-
	DP	2,70	3,67	4,15		DP	-	-	-

* Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico não pôde ser realizado devido à indisponibilidade do equipamento, decorrente de problemas técnicos.

Fonte: Autora (2026).

Aos 7 dias, as matrizes com substituição total da cinza volante por metacaulim e fíler calcário apresentaram resistências à compressão superiores à matriz de referência M45. Não se constatou diferença estatística em termos de resistência à compressão média para as matrizes 1M1C (75,28 MPa) e 1M2C (73,05 MPa) aos 7 dias. Essas matrizes superaram a M45 (39,38 MPa) em aproximadamente 90%. Esse resultado evidencia que a combinação entre metacaulim e calcário favorece o ganho de resistência em idades iniciais, o que pode ser explicado pela maior finura do fíler calcário. O fíler calcário atuou como agente de nucleação, contribuindo para a aceleração da hidratação do cimento (Zhu *et al.*, 2020). O metacaulim também contribuiu como agente de preenchimento na matriz (Mehta e Monteiro, 2014), pois apresenta menor granulometria em relação à cinza volante.

Em relação à evolução ao longo do tempo, a matriz M45 apresentou o maior ganho relativo entre 7 e 28 dias, com aumento de 64% (39,38 para 65,45 MPa). Por outro lado, as matrizes 1M1C e 1M2C apresentaram incrementos menores no mesmo intervalo, de 25% e 13%, respectivamente. O incremento da resistência aos 56 dias (15%) e 91 dias (25%) para a matriz M45 reforça o papel da cinza volante no desenvolvimento da resistência em idades mais avançadas devido à sua atividade pozolânica (Yang, Yang e Li, 2007; Burgos-Montes, Alonso e Puertas, 2013). As matrizes M45 e 1M2C não apresentaram diferença estatisticamente significativa na resistência à compressão aos 56 dias.

Ao comparar as matrizes com metacaulim e calcário, observa-se que a matriz 1M1C, com maior teor de metacaulim, apresentou resistências superiores à 1M2C nas idades de 28 e 56 dias, com diferenças de aproximadamente 18% e 31%, respectivamente. Esses resultados corroboram com Tang *et al.* (2019), que observaram o efeito positivo do aumento do teor de metacaulim na resistência à compressão em sistemas ternários com cimento Portland e fíler calcário, atribuindo esse comportamento às reações pozolânicas. Adicionalmente, o aluminato proveniente do metacaulim pode reagir com o carbonato de cálcio do fíler, promovendo a formação de carboaluminatos, o que contribui para o refinamento microestrutural e para o aumento da resistência da matriz (Scrivener *et al.*, 2018).

Os resultados de módulo de elasticidade dinâmico seguiram a mesma tendência da resistência à compressão. As matrizes com metacaulim e calcário apresentam maior rigidez que a matriz M45 em idades iniciais. Aos 7 dias, os valores de 1M1C (29,01 GPa) e 1M2C (30,02 GPa) foram superiores ao da M45 (25,79 GPa), correspondendo a aumentos de aproximadamente 12,5% e 16,4%, respectivamente. Esse resultado por ser atribuído a elevada finura do fíler calcário e, conseqüente densificação da matriz.

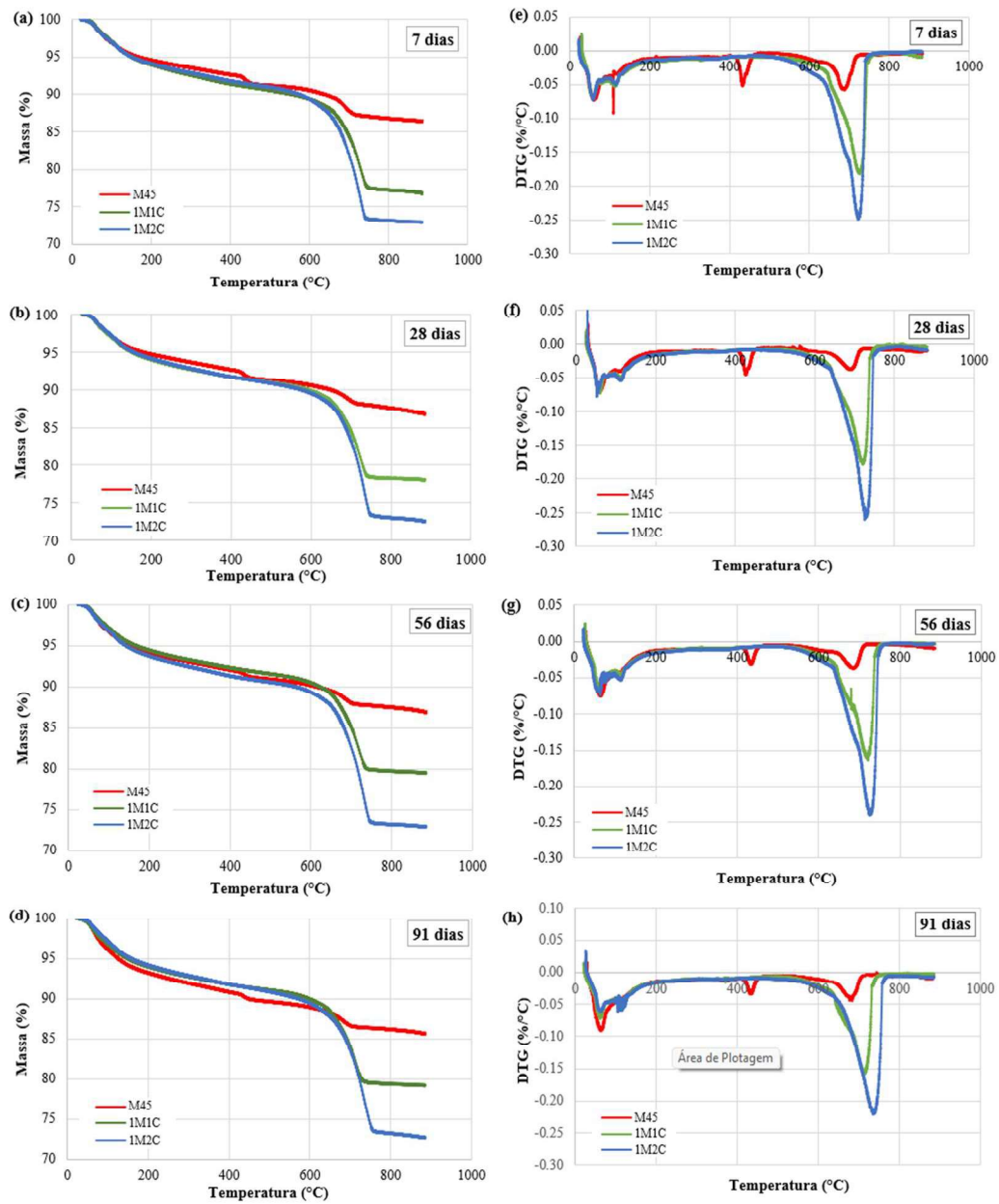
Aos 28 dias, os valores tornam-se mais próximos, embora 1M2C permaneça com o maior módulo (32,59 GPa). Aos 56 dias, observa-se redução do módulo para a M45 e 1M1C, enquanto 1M2C mantém valores elevados (31,31 GPa), sugerindo diferenças no desenvolvimento microestrutural e na rigidez ao longo do tempo, aspecto que pode estar relacionado ao grau de hidratação, à distribuição de defeitos internos e às características de porosidade da matriz.

5.3.3 Análise termogravimétrica (TGA/DTG)

As curvas de perda de massa (TG/DTG) para as matrizes M45, 1M1C e 1M2C nas idades de 7, 28, 56 e 91 dias são apresentadas na Figura 25.

Nas curvas de DTG da matriz M45, foram identificados três picos: 100°C – 400°C, correspondente à desidratação do C-S-H e aluminatos hidratados; 400°C – 500°C, a desidroxilação da portlandita (Ca(OH)_2); e 500°C – 800°C, a descarbonatação do carbonato de cálcio (CaCO_3) (Scrivener, Snellings e Lothenbach, 2016). Nas matrizes com metacaulim e filer calcário, foram observados apenas os picos referentes à desidratação do C-S-H e aluminatos hidratados e da descarbonatação do CaCO_3 .

Figura 25 – Curvas de TG: (a) 7 dias; (b) 28 dias; (c) 56 dias; e (d) 91 dias; e DTG: (e) 7 dias; (f) 28 dias; (g) 28 dias; e (h) 91 dias das matrizes M45, 1M1C e 1M2C.

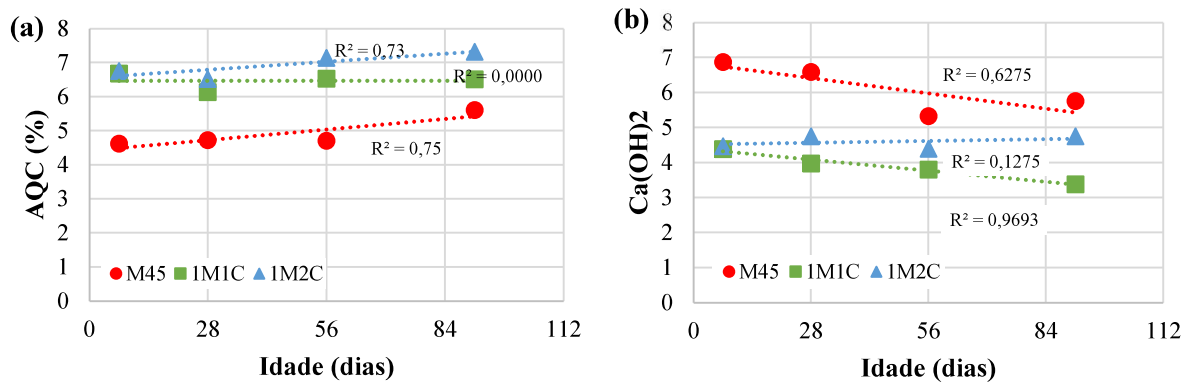


Fonte: Autora (2026).

A partir dos dados de perda de massa dos picos obtidos pelas curvas termogravimétricas, calculou-se os teores de água quimicamente combinada (AQC), Ca(OH)_2 e CaCO_3 para todas as idades analisadas. A AQC foi determinada no intervalo entre 100°C e 400°C , o teor de hidróxido de cálcio quantificado no intervalo entre 400°C e 600°C , e o carbonato de cálcio entre 600°C e 900°C . Os dados foram corrigidos para a base de não voláteis por meio da aplicação do fator de correção (Fc), cujos resultados estão apresentados na Tabela A1 (Apêndice A). Na

Figura 26 estão apresentadas o teor de AQC e de Ca(OH)_2 em função da idade para as três matrizes analisadas.

Figura 26 – Influência da idade nos teores de: (a) AQC; e (b) Ca(OH)_2 , das matrizes M45, 1M1C e 1M2C.



Fonte: Autora (2026).

Tal como esperado, observa-se um aumento do teor de AQC com a idade. Na mistura com cinza volante (M45), esse acréscimo foi acompanhado de redução do teor de Ca(OH)_2 . Embora o ensaio de Chapelle modificado tenha classificado a cinza volante como material sem atividade pozolânica, esse resultado evidencia a ocorrência desta reação.

Entre as misturas avaliadas, a M45 apresentou os menores teores de água quimicamente combinada, o que justifica os menores valores de resistência à compressão. As misturas com metacaulim e fíler calcário apresentaram menores teores de Ca(OH)_2 em todas as idades o que pode ser atribuído a maior reatividade do metacaulim em relação à cinza volante. Além das reações pozolânicas, o aumento da resistência à compressão das matrizes 1M1C e 1M2C em comparação à M45 também pode ser atribuída a maior quantidade de partículas finas no sistema, que atuam como pontos de nucleação, favorecendo a precipitação e o desenvolvimento dos produtos de hidratação (Dhandapani *et al.*, 2021).

Na mistura 1M1C verificou-se uma constância no teor de água quimicamente combinada, porém houve redução do teor de portlandita em comparação à 1M2C. A maior disponibilidade de silicato de alumínio amorfo (AS_2) devido ao maior teor de metacaulim na matriz 1M1C pode ter contribuído para o consumo da portlandita (Sabir, Wild e Bai, 2001; Zajac *et al.*, 2014). Além disso, a reação entre o carbonato de cálcio do fíler calcário e a alumina presente no metacaulim favoreceu a formação de carboaluminatos hidratados (Bonavetti,

Rahhal e Irassar, 2001; Al-Fakih *et al.*, 2023). Tais efeitos justificam o aumento da resistência da matriz 1M1C em comparação à 1M2C.

Os resultados demonstram que a combinação de metacaulim (material pozolânico altamente reativo) e filer calcário (agente de nucleação) foi mais eficaz para desenvolver microestrutura e resistência do que o uso de cinza volante.

5.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

A demanda por aditivo superplastificante foi influenciada pelo tipo de adição mineral empregada e pelas proporções entre metacaulim e filer calcário. A matriz M45 apresentou menor demanda de aditivo, com ponto de saturação identificado em 0,4% de SP/finos, comportamento atribuído à morfologia das partículas da cinza volante.

Misturas com metacaulim e filer calcário apresentaram maior demanda de aditivo, sendo identificado os teores ótimos de SP das misturas 1M1C e 1M2C em 1,7% e 1,4%, respectivamente. O maior consumo de aditivo pelas misturas 1M1C e 1M2C foi associado à elevada área específica das partículas irregulares do metacaulim e à maior finura das partículas do filer calcário. A fluidez da mistura foi menor na mistura com o maior teor de metacaulim.

A matriz M45 apresentou ganho contínuo de resistência à compressão ao longo do tempo, comportamento associado à reação pozolânica da cinza volante. O ensaio Chapelle modificado não foi eficiente na determinação da atividade pozolânica da cinza volante. A identificação do consumo gradual de CH com a idade e aumento do teor água quimicamente combinada pela cinza volante foi detectada pela análise termogravimétrica.

A substituição da cinza volante por metacaulim e filer calcário resultou em maiores resistências à compressão nas idades iniciais, em função da maior reatividade do metacaulim, presença de maior quantidade de partículas finas no sistema, atuando como filer e agente de nucleação, acelerando a hidratação. O módulo de elasticidade das matrizes 1M1C e 1M2C foram superiores à da matriz M45, indicando maior rigidez e densificação da matriz. A mistura com o maior teor de metacaulim (1M1C) apresentou resistência à compressão superior em comparação à mistura 1M2C. Entretanto, as matrizes M45 e 1M2C apresentaram valores similares de resistência à compressão aos 56 dias.

Considerando o consumo de aditivo superplastificante e a trabalhabilidade das matrizes estudadas, além da M45, a matriz 1M2C foi selecionada para o estudo em ECC da Etapa 2. Em virtude da ocorrência das reações pozolânicas, os ensaios mecânicos serão realizados aos 56 dias.

6 ESTUDO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS ENGENHEIRADOS

Essa etapa foi realizada a fim de avaliar a influência da hibridização das fibras de PVA e PP nas propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios engenheirados (ECC). Foram desenvolvidas doze formulações de ECC, sendo sete com a matriz de referência (M45) e cinco com a matriz contendo metacaulim e filer calcário (1M2C). O teor total de fibras foi mantido constante em 2% em volume, variando-se o teor de fibra de PVA em 0%; 25%; 50%; 75% e 100%. Adicionalmente, foram avaliados dois teores de superplastificante no compósito com a matriz M45 na presença da fibra PVA ou PP isoladas.

Os materiais utilizados para a produção dos ECCs, bem como suas características foram apresentadas no Capítulo 4. No estado fresco, os compósitos foram avaliados pelos ensaios de índice de consistência, massa específica e teor de ar incorporado. No estado endurecido, foram realizados ensaios para determinação da resistência à compressão, da resistência à tração na flexão em três pontos e em quatro pontos, e absorção de água por capilaridade. A microestrutura do ECC foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

6.1 FORMULAÇÃO DOS COMPÓSITOS

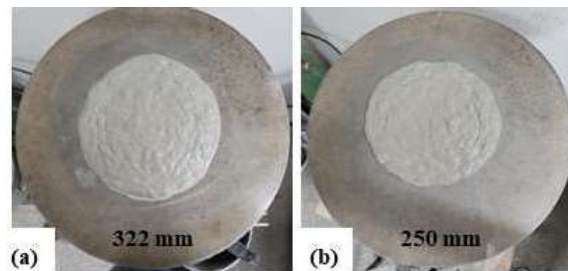
Os compósitos foram produzidos com as matrizes M45 (referência) e 1M2C, constituída por metacaulim e calcário na proporção 1:2 (em volume). A relação água/finos ($a/f = 0,26$), a proporção areia/finos ($s/f = 0,36$), o teor total de fibras (2% em volume) e o volume total das adições minerais foram mantidos constantes. As fibras foram combinadas em cinco proporções de PVA/PP (2,0A_0,0P; 1,5A_0,5P; 1,0A_1,0P; 0,5A_1,5P; 0,0A_2,0P).

A definição do teor de superplastificante (SP) para os ECCs foi baseada no estudo em pasta (Capítulo 5). Para determinar o teor ideal nas composições com fibra, foram considerados dois critérios de trabalhabilidade: (1) diâmetro de espalhamento de 240 ± 20 mm e (2) ausência de exsudação.

As misturas contendo fibras individuais (2,0A_0,0P; 0,0A_2,0P) foram avaliadas com dois teores distintos do aditivo. Para o compósito com fibra de PVA (M45_2,0A_0,0P), o teor de superplastificante foi definido a partir do teor ótimo de 0,40% determinado pelo método de Kantro para a matriz M45. No entanto, esse teor resultou em um espalhamento de 322 mm (Figura 27a), que excedeu o limite especificado. Diante disso, o teor de superplastificante foi reduzido para 0,3%, o que proporcionou um espalhamento de 250 mm (Figura 27b). Teores de SP inferiores a 0,30% comprometeram a trabalhabilidade do ECC com matriz M45 (ECC-

M45), dificultando o processo de moldagem. Uma dosagem inadequada de aditivo pode prejudicar a aplicabilidade do compósito in loco e, conseqüentemente, seu desempenho (Hou e Li, 2023). Portanto, para avaliar o efeito do teor de superplastificante na presença da fibra de PVA, foram estudados os teores de 0,30% e 0,40%.

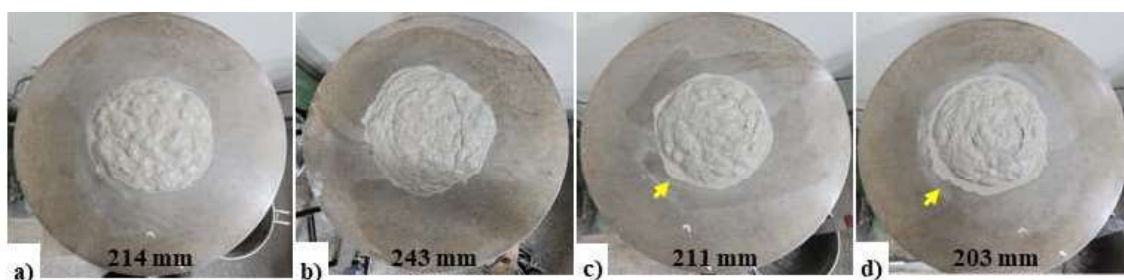
Figura 27 – Índice de consistência para a formulação M45_2,0A_0,0P para diferentes teores de superplastificante (a) 0,40%; (b) 0,30%.



Fonte: Autora (2026).

Para compósito com a fibra de PP (M45_0,0A_2,0P), o teor de superplastificante de 0,40% não proporcionou trabalhabilidade adequada. Diante disso, foram avaliados teores de SP de 0,50%, 0,80%, 0,83% e 0,90%. Observou-se que o espalhamento aumentou com o incremento do teor de SP, passando de 214 mm (com 0,5%, Figura 28a) para 243 mm (com 0,8% Figura 28.b). No entanto, ensaios com teores mais elevados de SP, 0,83% e 0,9% (Figuras 28.c e 28.d, respectivamente), demonstraram que um excesso de superplastificante não resulta em maior fluidez e, pode inclusive afetar negativamente a dispersão das fibras. Esse fenômeno também foi observado por Felekoglu *et al.* (2014) e Hou, Zhang e Li (2022). A partir dos critérios de trabalhabilidade predefinidos, os teores de 0,50% e 0,80% de superplastificante foram selecionados para a formulação com fibra de PP.

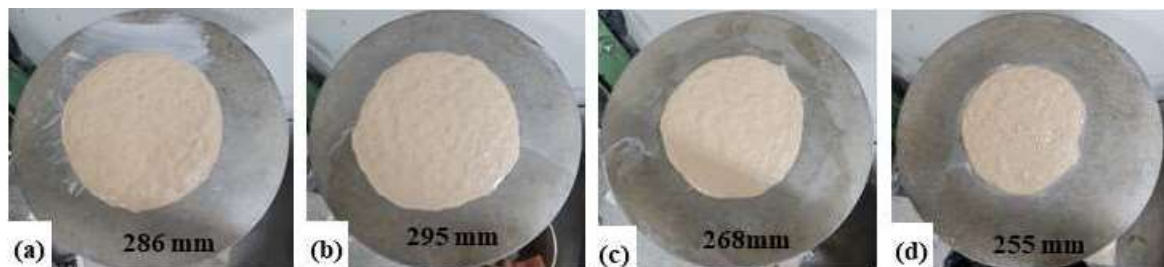
Figura 28 – Índice de consistência para a formulação M45_0,0A_2,0 considerando diferentes teores de superplastificante: (a) 0,5%; (b) 0,8%; (c) 0,83%; (d) 0,9%. A seta amarela indica exsudação.



Fonte: Autora (2026).

O teor de aditivo superplastificante para os compósitos com a matriz 1M2C também foi definido a partir do teor ótimo previamente estabelecido (1,4%). Para a formulação com 2% de PVA, observou-se que embora a matriz tenha atingido o ponto de saturação com 1,4% de SP, esse mesmo teor resultou em um espalhamento de 286 mm (Figura 29a). Dessa forma, foi feita a redução do teor de SP para 1,2%, 1,0% e 0,95%. Para esses teores, o espalhamento médio foi de 295 mm, 268 mm e 255 mm respectivamente (Figuras 29b; 29c e 29d). Adotou-se o teor de 0,9% de SP para a mistura 1M2C_2,0A_0,0P, visto que os demais teores não atingiram os critérios de trabalhabilidade estabelecidos.

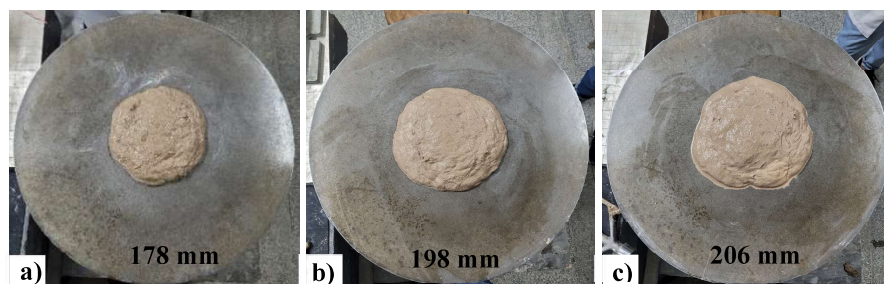
Figura 29 – Índice de consistência da formulação 1M2C_2_PVA considerando diferentes teores de SP (a) 1,4%; (b) 1,2%; (c) 1,0%; (d) 0,95%.



Fonte: Autora (2026).

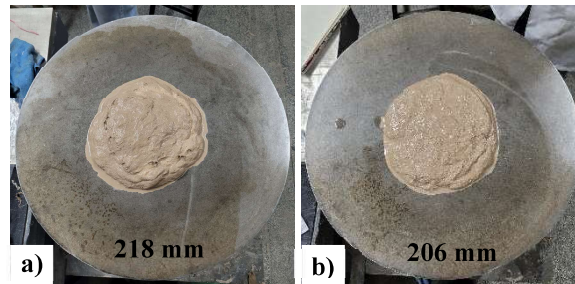
Para o compósito com fibras de PP (1M2C_0,0A_2,0P) foram avaliados os teores de SP de 1,0% e 1,1%. Embora nenhum dos teores avaliados tenham atingido o espalhamento pré definido (Figura 30), optou-se por efetuar as misturas evitando a ocorrência de exsudação, como foi observado nas misturas híbridas (1M2C_1,0A_1,0P; 1M2C_0,5A_1,5P) a partir de 1,10% de SP (Figura 31). No caso destas misturas híbridas, foi adotado o teor de 1,05% de superplastificante.

Figura 30 – Índice de consistência da formulação 1M2C_0,0A_2,0P para diferentes teores de superplastificante: (a) 1,0%; (b) 1,05%; (c) 1,10%.



Fonte: Autora (2026).

Figura 31 – Índice de consistência das formulações híbridas: (a) 1M2C_1,0A_1,0P (1,10%SP); (b) 1M2C_0,5A_1,5P (1,10% SP)



Fonte: Autora (2026).

As formulações dos compósitos cimentícios estudadas, expressas em traço unitário em massa, são apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 – Traço unitário em massa dos compósitos cimentícios estudados

ID	CPV	CV	FC	MK	a/f	s/f	PVA (%)	PP (%)	SP (%)
M45_2,0A_0,0P	1	1,2	-	-	0,26	0,36	2,0	-	0,30
M45_2,0A_0,0P	1	1,2	-	-	0,26	0,36	2,0	-	0,40
M45_1,5A_0,5P	1	1,2	-	-	0,26	0,36	1,5	0,5	0,33
M45_1,0A_1,0P	1	1,2	-	-	0,26	0,36	1,0	1,0	0,35
M45_0,5A_1,5P	1	1,2	-	-	0,26	0,36	0,5	1,5	0,50
M45_0,0A_2,0P	1	1,2	-	-	0,26	0,36	-	2,0	0,50
M45_0,0A_2,0P	1	1,2	-	-	0,26	0,36	-	2,0	0,80
1M2C_2,0A_0,0P	1	-	1,12	0,54	0,26	0,36	2,0	-	0,95
1M2C_1,5A_0,5P	1	-	1,12	0,54	0,26	0,36	1,5	0,5	1,00
1M2C_1,0A_1,0P	1	-	1,12	0,54	0,26	0,36	1,0	1,0	1,05
1M2C_0,5A_1,5P	1	-	1,12	0,54	0,26	0,36	0,5	1,5	1,05
1M2C_0,0A_2,0P	1	-	1,12	0,54	0,26	0,36	-	2,0	1,10

Fonte: Autora (2026).

6.2 PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

As misturas de ECC foram preparadas utilizando um misturador de bancada de dupla velocidade (Pavitest, modelo C3010) com capacidade de 5 L. Os materiais sólidos anidros (cimento, cinza volante, calcário, metacaulim e areia) foram pré-homogeneizados e o aditivo superplastificante foi previamente dissolvido na água de amassamento. Para as misturas contendo ambos os tipos de fibras, as fibras de PVA e PP foram previamente homogeneizadas antes de sua adição à mistura. Para melhorar a dispersão e evitar a formação de aglomerados, todas as fibras foram incorporadas somente após a obtenção de uma matriz homogênea,

conforme prática consolidada na literatura (Hou *et al.*, 2022; Zhu *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2024).

A sequência de mistura foi adaptada da NBR 16541:2016 em seis etapas: (1) mistura dos materiais sólidos com 2/3 da água pré-homogeneizada com aditivo superplastificante por 30 segundos em velocidade baixa; (2) acréscimo do 1/3 de água na mistura em velocidade baixa por 60 segundos; (3) repouso da matriz por 90 segundos para raspagem da superfície interna da cuba; (4) misturador em velocidade alta por 30 segundos; (5) incorporação das fibras em velocidade baixa por cinco minutos e (6) misturada em velocidade baixa por três minutos. O tempo total foi de 11 minutos e 30 segundos.

Após a mistura, foram realizados ensaios para determinação do índice de consistência (NBR 13276:2016), densidade e teor de ar incorporado (NBR 13278:2005). Os ensaios foram realizados em condições de temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar de $60 \pm 5\%$.

6.3 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

Para avaliação da resistência à compressão dos compósitos foram moldados corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm, conforme as recomendações da NBR 7215:2019. Para os ensaios de flexão e absorção de água por capilaridade foram moldados corpos prismáticos, com dimensões de 4 x 4 x 16 cm, seguindo especificações da NBR 13279:2005.

Os corpos de prova cilíndricos foram moldados em quatro camadas e adensados com trinta quedas em cada camada em mesa de adensamento, conforme a NBR 7215:2019. No caso dos prismáticos, a moldagem foi realizada em duas camadas, de acordo com a NBR 13279:2005, com adensamento equivalente ao dos corpos de prova cilíndricos.

Após moldagem, os corpos de provas foram armazenados em sacos plásticos com umidade relativa de 100% e temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 24 h. Após 24h, foram desmoldados e imersos em água saturada com cal até as idades de ensaio estabelecidas.

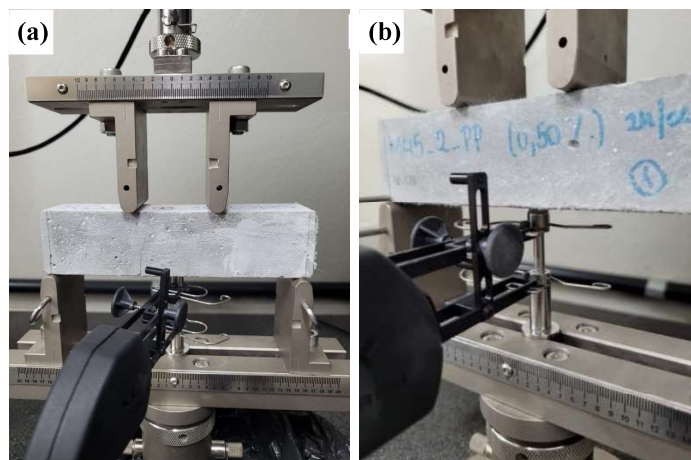
6.4 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

O ensaio de resistência à compressão foi realizado nos corpos de prova cilíndricos saturados. Para cada mistura foram moldados três corpos de prova. O ensaio foi realizado na máquina universal de ensaios (EMIC DL60000), disponível no Laboratório de Estruturas (FECIV/UFU), seguindo as recomendações da NBR 7215:2019.

A resistência à tração na flexão em três pontos foi determinada conforme estabelecido na NBR 13279:2005. Foi utilizada máquina universal de ensaio (*Instron*, modelo 5982), com célula de carga de 100 kN e velocidade de aplicação de carga de 50 ± 10 N/s até a ruptura do corpo de prova. Foram ensaiados três corpos de prova para cada mistura.

A capacidade de deformação e a ocorrência do *strain-hardening* nos compósitos cimentícios foram avaliadas por meio de ensaios de flexão em quatro pontos, seguindo a metodologia proposta por Zhang, Zhang e Deng (2022). O ensaio foi realizado em máquina universal de ensaios (*Instron*, modelo 5982), com célula de carga 100 kN e velocidade de aplicação de 0,20 mm/min. A distância entre apoios foi de 150 mm, e o vão interno igual a 50 mm. A deformação do prisma foi medida com *clip gauge*, com curso máximo de 25 mm. Os critérios de parada do ensaio consistiram na falha do material ou o alcance de uma extensão de 25 mm registrada pela máquina de ensaios. A configuração do ensaio é apresentada na Figura 32.

Figura 32 – Ensaio de resistência à tração na flexão em quatro pontos: (a) configuração do ensaio; (b) posicionamento do extensômetro (*clip gauge*) utilizado no ensaio

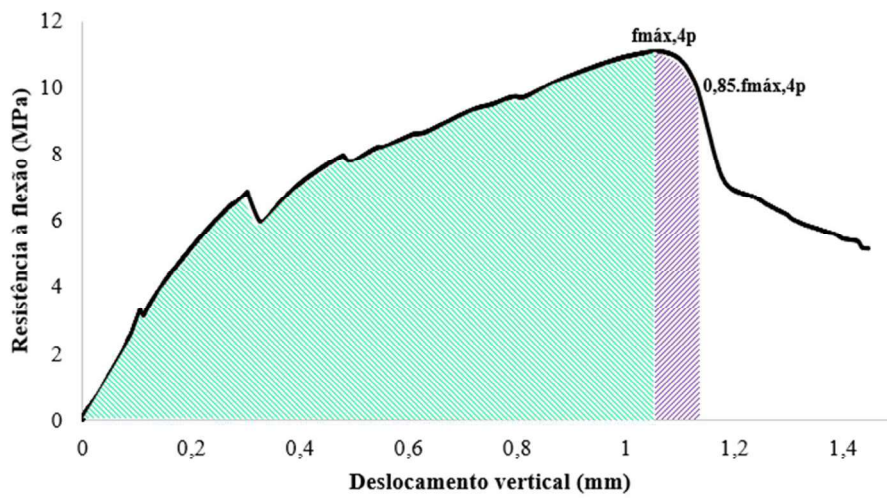


Fonte: Autora (2026).

A tenacidade à flexão dos compósitos foi determinada a partir das curvas tensão x deformação obtidas no ensaio de flexão em quatro pontos, seguindo a metodologia proposta por Zhang, Zhang e Deng (2022). Esse método, adaptado para compósitos cimentícios reforçado por fibras (CCRF), considera a elevada capacidade de deformação e o comportamento de strain-hardening típicos dos ECCs. A avaliação baseou-se em na determinação de três parâmetros: (1) a resistência equivalente inicial à flexão ($f_{e,m}$) proposta para calibrar o efeito do reforço de fibras (Equação 1); (2) o fator de energia inicial (E_m), que

quantifica a capacidade de dissipação de energia por unidade de volume até a carga de pico ($f_{m\acute{a}x,4p}$) determinada a partir da Equação 2; e (3) o índice de tenacidade à flexão pós-pico (I_{post}), que caracteriza a tenacidade residual do material após o início da fissuração até o ponto correspondente à 85% da resistência máxima (Equação 3). Na Figura 33, são apresentadas as áreas utilizadas para o cálculo da energia inicial (hachura em verde) e do índice pós-pico (hachura em roxo).

Figura 33 – Pontos característicos da curva tensão x deformação.



Fonte: Autora (2026).

$$f_{e,m} = \frac{\Omega_m L}{\delta_m b h^2} \quad (1)$$

$$E_m = f_{e,m} \times \frac{\delta_m}{L} = \frac{\Omega_m}{b h^2} \quad (2)$$

$$I_{post} = \frac{\Omega_{post}}{\Omega_m + \Omega_{post}} \quad (3)$$

em que: Ω_m corresponde à energia dissipada até a carga de pico (área sob a curva carga-deflexão), Ω_{post} é a energia a dissipação de energia no pós-pico, δ_m é deflexão no pico de carga e L , b e h são, respectivamente, o vão, a largura e altura do corpo de prova.

6.5 PERMEABILIDADE DOS COMPÓSITOS

A permeabilidade dos compósitos foi avaliada pelo ensaio de absorção de água por capilaridade, segundo metodologia proposta pela NBR 15259:2005. Para cada mistura, três corpos de prova, secos em estufa a 50°C até constância de massa, foram parcialmente imersos em água mantendo-se um nível de 5 ± 1 mm acima da face em contato com a água durante o ensaio. Para evitar a penetração de água nas laterais, essas foram impermeabilizadas com resina epóxi para garantir fluxo capilar unidimensional. A variação de massa foi determinada nos intervalos: de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30, 60, 90, 120, 240 e 1440 minutos. A partir dos dados obtidos, foi traçada uma curva de absorção de água (g/cm^2) em função da raiz quadrada do tempo ($\text{min}^{0,5}$).

6.6 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi empregada para investigar o comportamento das fibras na matriz e os modos de ruptura do compósito após o ensaio de compressão. Para essa análise, foram utilizados os fragmentos dos corpos de prova secos em estufa a 45°C até constância de massa. As amostras foram revestidas com uma camada de ouro de aproximadamente 10 nm de espessura no equipamento Leica EM SCD050. Os ensaios foram realizados em microscópio eletrônico de varredura (*Zeiss* – modelo EVO MA10; Tescan – modelo VEGA 3LMU) operando em condições de alto vácuo com tensão de aceleração de 5kV. Os equipamentos estão localizados nos Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura (LAMEV – Enga. Química/UFU) e no Laboratório de Caracterização de Materiais (RELAM – Química/UFU), respectivamente.

6.7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.7.1 Propriedades no estado fresco

As propriedades dos compósitos cimentícios no estado fresco são apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20 – Propriedades do ECC-M45 e do ECC-1M2C no estado fresco.

Formulação	PVA (%)	PP (%)	SP (%)	Espalhamento (mm)	Densidade (kg/m³)	Teor de ar (%)
M45_2,0A_0,0P	2,0	0,0	0,30	250	1910	3,1
M45_2,0A_0,0P	2,0	0,0	0,40	322	1910	3,2
M45_1,5A_0,5P	1,5	0,5	0,33	261	1895	3,9
M45_1,0A_1,0P	1,0	1,0	0,35	261	1890	4,1
M45_0,5A_1,5P	0,5	1,5	0,50	227	1890	3,9
M45_0,0A_2,0P	0,0	2,0	0,50	214	1880	4,3
M45_0,0A_2,0P	0,0	2,0	0,80	243	1950	0,6
1M2C_2,0A_0,0P	2,0	0,0	0,97	255	1940	8,6
1M2C_1,5A_0,5P	1,5	0,5	1,00	234	1920	10,0
1M2C_1,0A_1,0P	1,0	1,0	1,05	206	1920	10,4
1M2C_0,5A_1,5P	0,5	1,5	1,05	199	1940	10,1
1M2C_0,0A_2,0P	0,0	2,0	1,09	198	1970	8,2

Fonte: Autora (2026).

Os compósitos com maior teor de fibras de PVA (M45_2,0A_0,0P, M45_1,5A_0,5P e M45_1,0A_1,0P) apresentaram os maiores diâmetros de espalhamento, entre 250 mm e 261 mm (Figura 33). As formulações M45_1,5A_0,5P e M45_1,0A_1,0P demandaram incrementos mínimos no teor de superplastificante em relação à mistura contendo 2% de PVA. Em contrapartida, misturas com maior proporção de fibras de PP (M45_0,5A_1,5P e M45_0,0A_2,0P) prejudicaram a trabalhabilidade, resultando em menor espalhamento e maior demanda pelo superplastificante. Especificamente, a mistura M45_0,0A_2,0P não atingiu o espalhamento estabelecido. Quando submetida a teores elevados de SP para melhorar sua trabalhabilidade, exibiu exsudação e maior tendência de aglomeração de fibras.

Para a matriz 1M2C, apenas os compósitos 1M2C_2,0A_0,0P e 1M2C_1,5A_0,5P atingiram o espalhamento especificado, 255 mm e 234 mm (Figura 34). O compósito com 2% de fibra de PVA (1M2C_2,0A_0,0P) exibiu o maior valor, enquanto a formulação com 2% de PP (1M2C_0,0A_2,0P) apresentou o menor (198 mm). Em comparação com a matriz M45, a matriz 1M2C apresentou menor formação visível de aglomerados de fibras (Figura 30).

Figura 34 – Efeito da hibridização das fibras de PVA/PP no índice de consistência de compósitos cimentícios para as matrizes M45 e 1M2C.



Fonte: Autora (2026).

A perda de trabalhabilidade causada pelo acréscimo das fibras de PP nos compósitos pode ser atribuída a três fatores inerentes a esse material: sua natureza hidrofóbica, sua elevada relação comprimento/diâmetro e maior número de fibras por unidade de volume, quando comparadas às fibras de PVA.

Por serem hidrofóbicas, essas fibras não apresentam afinidade físico-química com a pasta cimentícia, dificultando a dispersão homogênea (Li, 2019; Hou e Li, 2023). Embora uma elevada razão de aspecto (667 para as fibras de PP versus 205 para as de PVA) seja benéfica para atuar na costura de microfissuras em ECC, especialmente em fibras com baixa aderência interfacial (Felekoglu *et al.*, 2014), no estado fresco essa característica favorece a aglomeração das fibras de PP. Esse fenômeno, que compromete a homogeneidade da mistura, foi confirmado visualmente (Figura 30) e é reportado na literatura (Felekoglu *et al.*, 2014, Hou e Li, 2023).

Adicionalmente, para uma mesma fração volumétrica, a quantidade de fibras de PP é cerca de sete vezes maior que a de fibras de PVA, devido às suas dimensões reduzidas (diâmetro de 18 µm e comprimento de 12 mm) em comparação às fibras de PVA (diâmetro de 40 µm e comprimento de 8 mm) (Hou e Li, 2023). A maior concentração de fibras aumenta a superfície de contato e o atrito interno, prejudicando ainda mais a trabalhabilidade e a dispersão.

A substituição da cinza volante por metacaulim e fíler calcário, combinada ao aumento do teor de fibras de PP, resultou na redução da trabalhabilidade do ECC. Como discutido anteriormente, além das características das fibras de PP, a redução da trabalhabilidade das misturas 1M2C ocorre devido à elevada área superficial do metacaulim e ao aumento das

partículas finas no sistema, o que reduz a fluidez da mistura e aumenta a demanda por superplastificante para manter a consistência desejada.

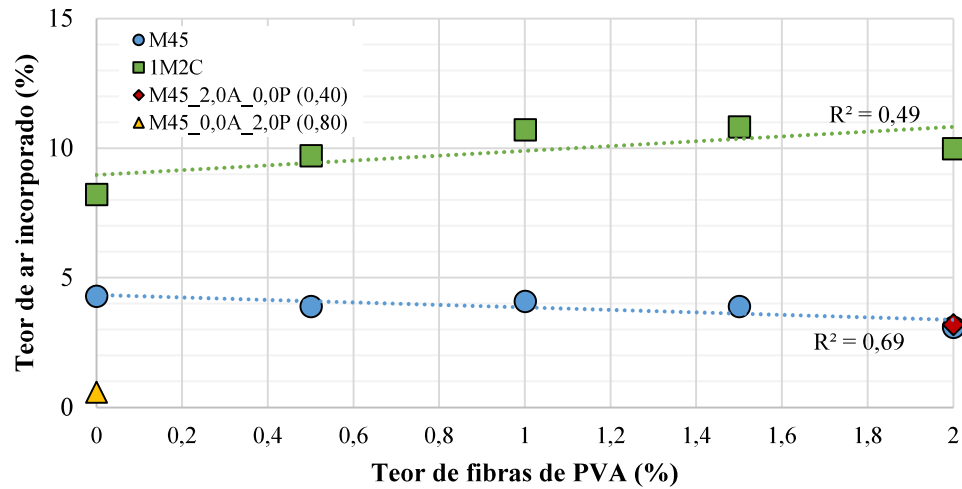
A densidade de massa e o teor de ar incorporado das misturas são apresentados na Tabela 20. Para o ECC com matriz M45, não houve tendência clara da densidade em função da hibridização das fibras. Os valores de teor de ar incorporado com a adição de fibras de PP (Figura 34) do ECC-M45 não indicaram diferença estatisticamente significativa entre eles.

A mistura M45_2,0A_0,0P apresentou a maior densidade (1910 kg/m^3) e o menor teor de ar (3,1%), enquanto a mistura M45_0,0A_2,0P registrou o maior teor de ar (4,3%). No entanto, quando o teor de aditivo superplastificante foi aumentado nessa última formulação, observou-se uma redução significativa do ar incorporado. Segundo Hou, Zhang e Li (2022), o aumento do teor de superplastificante reduz a viscosidade, diminuindo o atrito durante a mistura. A maior fluidez facilita o movimento coeso da matriz, o que melhora a dispersão geral das fibras e, conseqüentemente, reduz a retenção de ar no sistema.

No ECC com a matriz 1M2C, as densidades de massa foram superiores, variando entre 1940 kg/m^3 e 1970 kg/m^3 , o que pode ser atribuído à maior quantidade de partículas finas no sistema. Em contrapartida, o teor de ar incorporado foi significativamente mais elevado, com valores entre 8,2% a 10,8%. Pelo teste de Tukey, foram formados dois grupos homogêneos para o teor de ar incorporado do ECC-1M2C, sendo o grupo 1 composto pelas misturas 1M2C_2,0A_0,0P e 1M2C_0,0A_2,0P) e o grupo 2 composto pelas misturas 1M2C_1,5A_0,5P, 1M2C_1,0A_1,0P e 1M2C_0,0A_1,5P).

Segundo Hou, Zhang e Li (2022), a presença de fibras de PP, devido à sua natureza hidrofóbica, geralmente reduz a densidade e aumenta o ar aprisionado. Por meio de microtomografia computadorizada, Hou e Li (2023) observaram um aumento na quantidade de vazios de ar e no volume total de poros com o aumento do teor de fibras de PP em compósitos.

Figura 35 – Teor de ar incorporado em função do teor de fibras de PVA no ECC-M45 e ECC-1M2C híbridos.



Fonte: Autora (2026).

6.7.2 Propriedades no estado endurecido

A Tabela 21 apresenta os resultados médios das propriedades mecânicas dos ECCs com as matrizes M45 e 1M2C, incluindo a densidade aparente, resistência à compressão (f_c), resistência à tração na flexão pelo ensaio em três pontos ($f_{m,3p}$) e em quatro pontos: máxima resistência à tração na flexão ($f_{máx,4p}$) e a deflexão correspondente a carga máxima ($\delta_{máx,4p}$).

Tabela 21 – Propriedades mecânicas dos compósitos híbridos (M45 e 1M2C) aos 56 dias.

Descrição da mistura	SP (%)	Densidade aparente (kg/m³)	Resistência à compressão f_c (MPa)	Flexão à 3 pontos $f_{m,3p}$ (MPa)	Flexão à 4 pontos	
					$f_{máx,4p}$ (MPa)	$\delta_{máx,4p}$ (mm)
M45_2,0A_0,0P	0,30	1940	68,4 ± 2,7	15,6 ± 1,3	10,3 ± 0,6	1,14 ± 0,16
M45_2,0A_0,0P	0,40	1950	61,9 ± 2,2	17,5 ± 1,5	7,9 ± 0,7	1,81 ± 1,31
M45_1,5A_0,5P	0,33	1930	62,8 ± 2,3	15,8 ± 1,2	10,6 ± 0,8	1,56 ± 0,33
M45_1,0A_1,0P	0,35	1930	61,3 ± 3,1	11,8 ± 0,9	7,1 ± 0,3	0,76 ± 0,13
M45_0,5A_1,5P	0,50	1910	58,3 ± 1,1	10,9 ± 1,8	7,1 ± 0,6	1,13 ± 0,13
M45_0,0A_2,0P	0,50	1900	53,4 ± 1,6	11,1 ± 0,9	7,6 ± 1,7	1,72 ± 0,12
M45_0,0A_2,0P	0,80	2010	48,6 ± 1,4	8,9 ± 0,8	6,5 ± 0,6	1,45 ± 0,30
1M2C_2,0A_0,0P	0,97	1960	66,0 ± 1,5	18,6 ± 0,4	10,8 ± 0,5	1,77 ± 0,25
1M2C_1,5A_0,5P	1,00	1960	67,9 ± 2,5	15,2 ± 1,0	10,3 ± 1,2	1,42 ± 0,09
1M2C_1,0A_1,0P	1,05	1950	65,5 ± 3,4	10,3 ± 1,3	8,7 ± 0,6	1,61 ± 0,38
1M2C_0,5A_1,5P	1,05	1970	63,0 ± 1,3	9,4 ± 1,0	7,1 ± 0,4	1,24 ± 0,21
1M2C_0,0A_2,0P	1,09	1950	64,0 ± 2,1	10,1 ± 1,1	8,3 ± 1,0	1,95 ± 0,44

Fonte: Autora (2026).

A resistência à compressão dos compósitos cimentícios foi inferior à das respectivas matrizes (M45 e 1M2C), indicando que a incorporação das fibras (PVA ou PP) interferiu nesta propriedade. As matrizes M45 e 1M2C atingiram 73,6 MPa e 82,31 MPa, respectivamente. Com a adição de 2% de fibras de PVA, as formulações M45_2,0A_0,0P e 1M2C_2,0A_0,0P apresentaram resistências de 68,4 MPa e 66,0 MPa, respectivamente, correspondendo a reduções de aproximadamente 7,1% e 19,8%. A redução mais acentuada no compósito 1M2C_2,0A_0,0P pode ser atribuída ao maior teor de ar incorporado (Tabela 20).

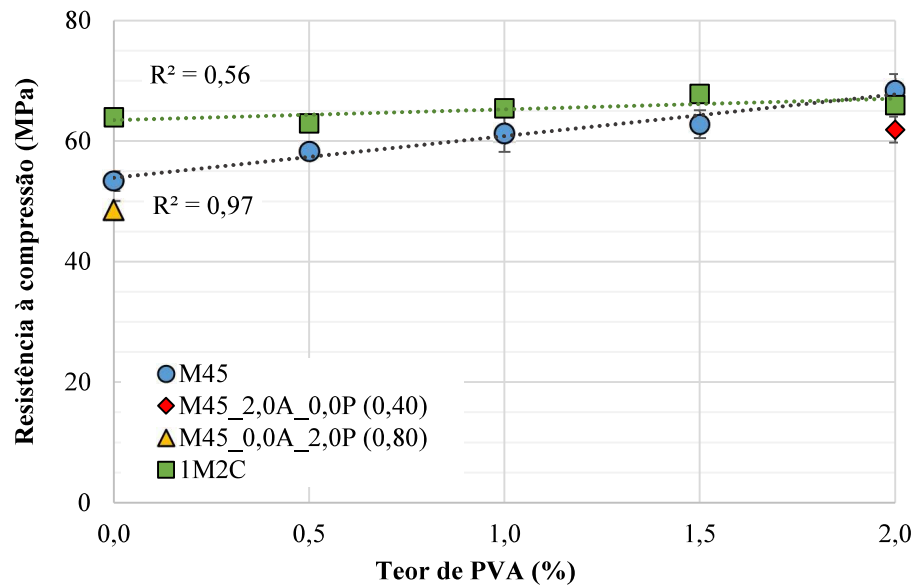
Para o ECC-M45, verificou-se dependência do tipo de fibra e do teor de superplastificante na resistência à compressão. Mantendo-se o volume total de fibras constante, observou-se uma tendência linear de aumento da resistência com o acréscimo do teor de fibras de PVA (Figura 36). A substituição total das fibras de PVA por PP resultou em uma redução de 29% na resistência, atribuída ao aprisionamento de ar e à formação de imperfeições na matriz causadas pelas fibras de PP (Hou, Zhang e Li, 2022; Liu *et al.*, 2021; Hou e Li, 2023).

A análise estatística mostrou diferença significativa nos resultados de resistência à compressão do ECC com matriz M45. Houve a formação de três grupos homogêneos: A (M45_2,0A_0,0P); B (M45_1,5A_0,5P; M45_1,0A_1,0P e M45_0,5A_1,5P); e C (M45_0,0A_2,0P), indicando que não há diferença significativa nos resultados de resistência em compósitos com fibras combinadas.

Embora o aumento do teor de SP tenha melhorado a fluidez das misturas de ECC com um único tipo de fibra, ele comprometeu a resistência à compressão. Para a mistura com PVA (M45_2,0A_0,0P), o aumento do teor de SP de 0,3% para 0,4% reduziu a resistência à compressão em 9,5%. Resultado semelhante foi observado para a mistura com PP (M45_0,0A_2,0P), na qual a dosagem (0,8%) resultou em uma redução de 9,1% comparada à 0,5% de SP.

Por outro lado, as misturas híbridas do ECC-1M2C não apresentaram diferença significativa em termos de resistência à compressão com a substituição de fibras de PVA por PP. A substituição total de fibras de PVA por PP na mistura (1M2C_0,0A_2,0P) resultou em uma redução de apenas 3,0%, muito inferior à redução de 28,9% observada na mistura M45 equivalente (M45_0,0A_2,0P). Portanto, apesar da matriz 1M2C apresentar maior redução de resistência à compressão com a incorporação de fibras, sua resistência à compressão mostrou-se menos influenciada pela hibridização das fibras.

Figura 36 – Resistência à compressão dos compósitos híbridos em função do teor de fibra de PVA para matrizes M45 e 1M2C. (Nota: O teor de fibras de PP varia inversamente).



Fonte: Autora (2026).

Os resultados de resistência à tração na flexão em três pontos (Tabela 21) mostram que as formulações com as maiores proporções de fibra de PVA (2,0A_0,0P e 1,5A_0,5P) apresentaram os maiores valores para ambas as matrizes. Para a matriz M45, as resistências foram de 15,6 MPa (2,0A_0,0P) e 15,8 MPa (1,5A_0,5P). Na matriz 1M2C, os valores foram de 18,6 MPa (1M2C_2,0A_0,0P) e 15,2MPa (1M2C_1,5A_0,5P).

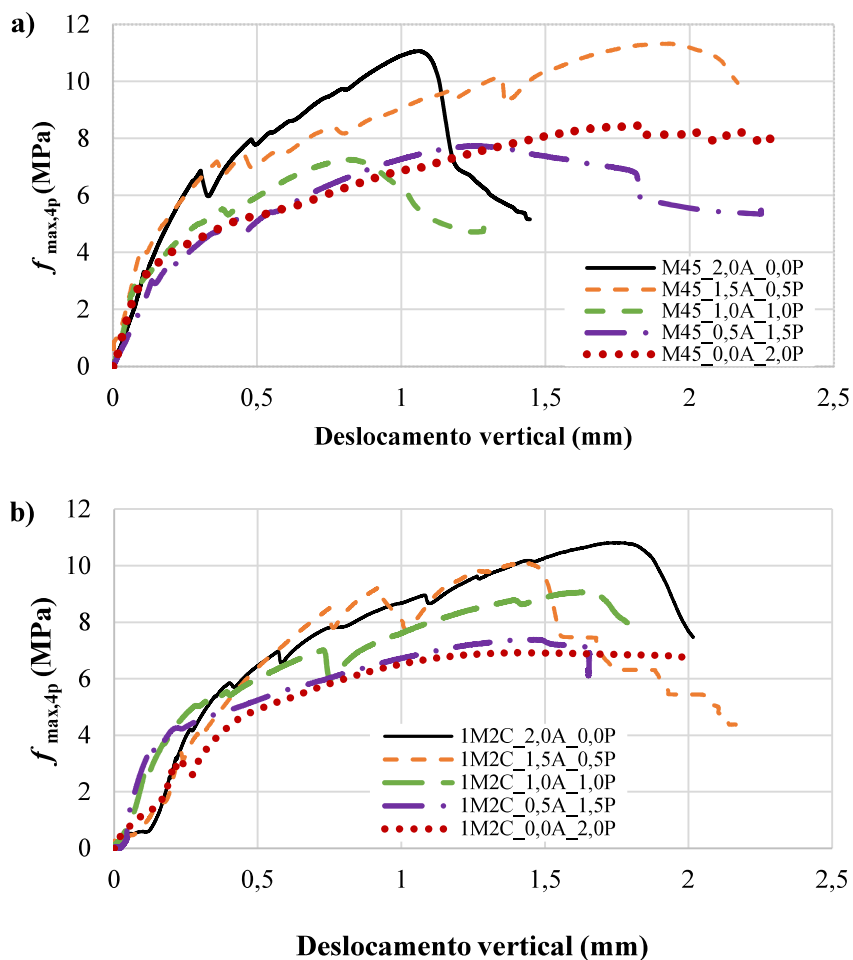
A análise estatística por meio do teste de Tukey (95% de confiança) agrupou os compósitos ECC-M45 em dois grupos homogêneos quanto à resistência à tração na flexão: A (M45_0,0A_2,0P e M45_1,5A_0,5P); e B (M45_1,0A_1,0P; M45_0,5A_1,5P; e M45_0,0A_2,0P). Para o ECC-1M2C foram formados três grupos: A (1M2C_2,0A_0,0P); B (1M2C_0,5A_1,5P; 1M2C_1,0A_1,0P; e 1M2C_0,0A_2,0P).

Esse desempenho superior das fibras de PVA na resistência à tração na flexão, dos compósitos também foi observado por Li (2009); Tonsun-Felekoglu e Felekoglu (2013); Pakravan, Jamshidi e Latifi (2016); e Hou e Li (2023). Tal comportamento justifica-se pela maior resistência à tração das fibras de PVA (1500 MPa) em comparação às fibras de PP (300 MPa), associada à sua ligação interfacial mais forte com a matriz cimentícia (Bentur e Mindess, 2007). Por outro lado, a resistência à tração na flexão diminuiu consideravelmente quando o teor de fibras de PP foi igual ou superior a 1,0%. As misturas com 50% de cada fibra (1,0A_1,0P) atingiram 11,8 MPa (M45) e 10,3 MPa (1M2C).

Quanto ao efeito do aditivo superplastificante, observou-se um comportamento divergente entre as propriedades do compósito M45_0,0A_2,0P. Nele, o aumento da dosagem do superplastificante elevou a resistência à flexão em 12%, mas reduziu a resistência à compressão em 29%. Por outro lado, para o compósito 1M2C_0,0A_2,0P, o acréscimo do aditivo reduziu ambas as resistências, sendo a redução mais acentuada na resistência à tração na flexão (46%).

A Figura 37 mostra o efeito da hibridização de fibras PVA/PP na curva tensão x deformação dos compósitos com as matrizes M45 e 1M2C. Cada curva corresponde ao corpo de prova com maior resistência dentre as três amostras ensaiadas. O carregamento foi mantido até a ruptura ou o limite de deslocamento pré-definido (2,5 mm) do extensômetro. Os compósitos apresentaram capacidade de suporte de carga pós-fissuração, característico ao comportamento de enrijecimento por deformação (*strain-hardening*).

Figura 37 – Curva tensão x deformação dos compósitos híbridos com a matriz: (a) M45 e (b) 1M2C.



Fonte: Autora (2026).

Para a matriz M45 (Figura 37a), a substituição das fibras de PVA por PP em teores superiores reduziu a resistência máxima à flexão. Não houve diferença estatisticamente significativa na resistência à flexão dos compósitos M45_2,0A_0,0P e M45_1,5A_0,5P. Embora a resistência não tenha sido afetada, o uso de 0,5% de fibras de PP aumentou a capacidade de deformação no pico de carga em aproximadamente 37%, indicando maior ductilidade. Esse comportamento corrobora o observado por Pakravan, Lafiti e Jamshidi (2016).

Para a matriz 1M2C (Figura 36b), os compósitos 1M2C_2,0A_0,0P e 1M2C_1,5A_0,5P também não apresentaram diferenças significativas nas resistências máximas à flexão. Contudo, diferentemente do observado para a matriz M45, essa substituição de 0,5% da fibra de PVA por PP reduziu a capacidade de deformação em 20%. Apesar dessa redução, a deformação no pico de resistência do compósito 1M2C com 100% de PVA (1,77 mm) foi superior à do compósito M45 equivalente com 0,3% de SP (1,14 mm).

Nos compósitos com teores de PP igual ou superior a 50%, observou-se uma redução na resistência à flexão para ambas as matrizes. Para a matriz M45, teores de fibras de PP iguais ou superiores à 1,0% compõem um grupo homogêneo em termos de resistência máxima à flexão à quatro pontos. O compósito M45_1,0A_1,0P apresentou uma redução de cerca de 30% na resistência máxima em comparação com o compósito com 100% PVA (M45_2,0A_0,0P_0,3 SP). Adicionalmente, sua capacidade de deformação foi 34% menor que a do compósito M45_1,5A_0,5P. Os compósitos com matriz 1M2C não apresentaram diferenças significativas na deformação em máxima tensão.

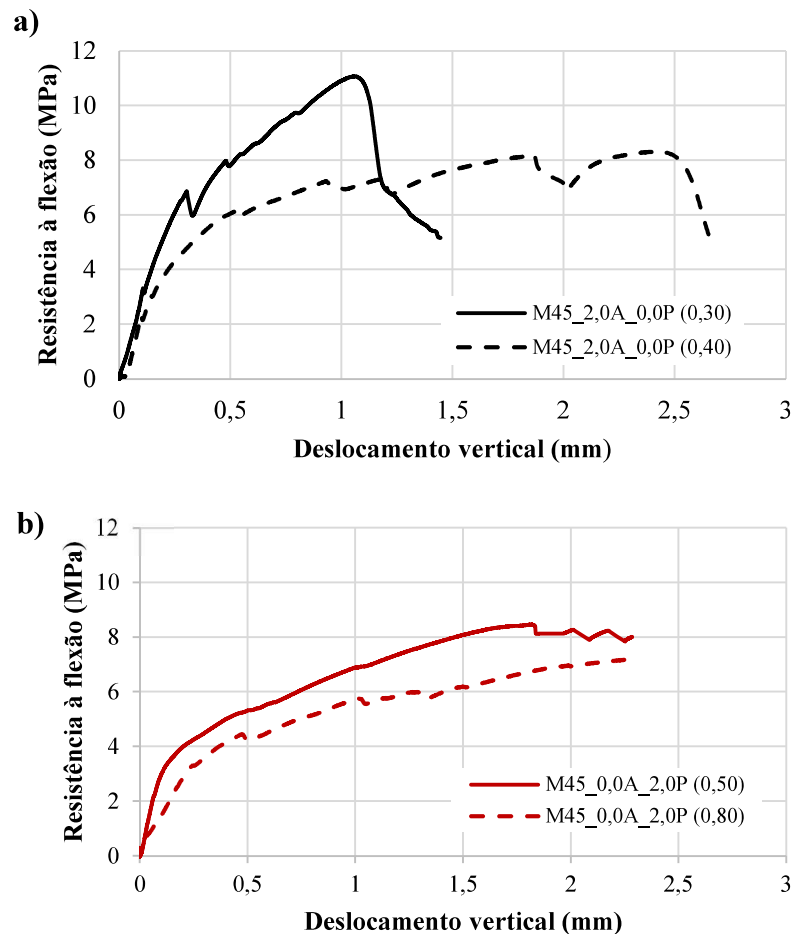
Os compósitos com 2% de fibras de PP (M45_0,0A_2,0P e 1M2C_0,0A_2,0P) apresentara redução de 26% e 23%, respectivamente, na resistência à flexão em relação aos seus correspondentes com 2% de PVA. Entretanto, o elevado teor de fibras de PP aumentou a capacidade de deformação em cerca de 51% (1,76 mm) na mistura M45 e em 10% (1,95 mm) na mistura 1M2C. Esse comportamento pode ser atribuído à natureza hidrofóbica das fibras de PP e sua menor aderência interfacial com a matriz cimentícia, o que favorece o mecanismo de arrancamento das fibras (*pull-out*) (Li, 2019; Hou e Li, 2023). Consequentemente, o compósito apresenta maior capacidade de deformação antes da ruptura, resultando em maior ductilidade.

A substituição da cinza volante por metacaulim e fíler calcário resultou em resistências máximas à flexão e capacidade de deformação no pico de carga estatisticamente equivalentes às do ECC-M45. Esse comportamento pode estar relacionado a uma maior concentração de defeitos na matriz, como os vazios de ar incorporado. Embora esses vazios reduzam a

resistência à compressão, eles podem melhorar a ductilidade à tração do material (Hou, Zhang e Li, 2022; Zhang et al., 2024 e Li, Li e Zhang, 2025).

A Figura 38 apresenta a influência do teor de superplastificante na curva tensão x deformação do ECC-M45 reforçado com fibras isoladas de PVA ou PP.

Figura 38 – Curva tensão x deformação para o ECC-M45 com fibras isoladas: (a) PVA e (b) PP, sob diferentes teores de superplastificante.



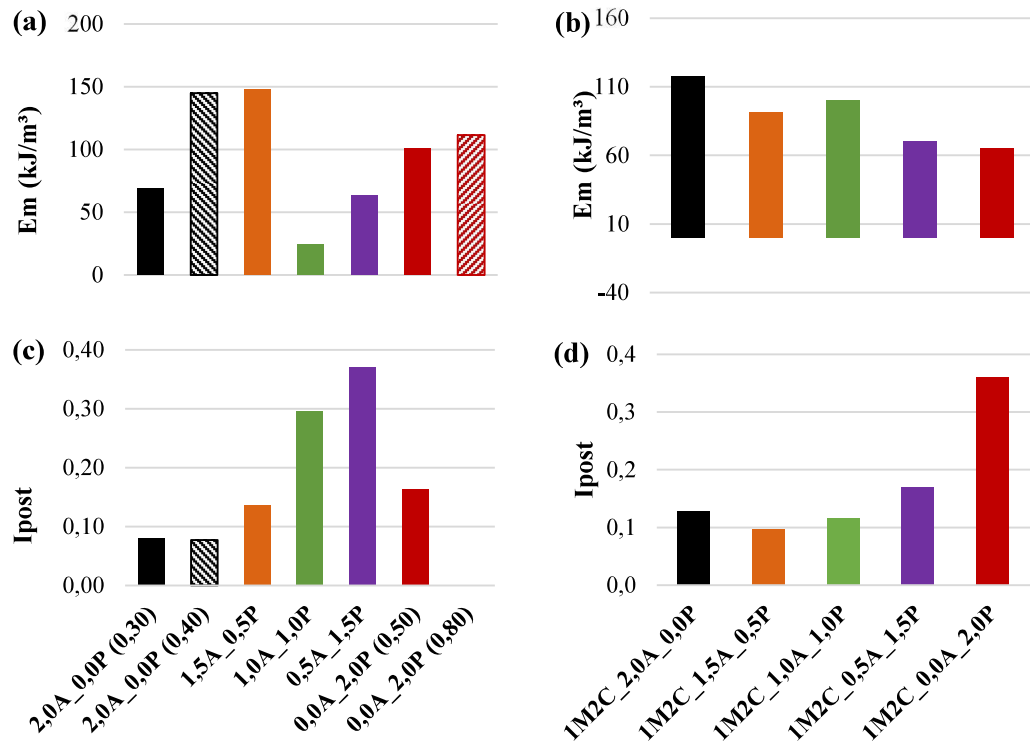
Fonte: Autora (2026).

Conforme observado nos ensaios em três pontos, a resistência à tração na flexão diminuiu com o aumento do teor de superplastificante. Os compósitos com fibras de PVA (Figura 38a), a capacidade de suporte de carga pós-fissuração, associada ao comportamento de *strain-hardening*, aumentou com teores mais elevados de superplastificante. Já os compósitos com fibras de PP apresentaram respostas de deformação semelhantes, independente da dosagem.

Esse efeito de redução na resistência máxima e aumento na capacidade de enrijecimento por deformação pelo acréscimo do superplastificante pode estar relacionado à dispersão das fibras. O aumento do teor de superplastificante melhorou a fluidez da matriz, o que provavelmente favoreceu uma distribuição mais homogênea das fibras. No entanto, sob carregamento, aglomerações localizadas de fibras (efeito *balling*) podem concentrar tensões. Embora esses aglomerados possam aumentar a resistência localmente, em geral, eles reduzem a eficiência global da rede de fibras, comprometendo o enrijecimento por deformação e a ductilidade do compósito. Esse comportamento está em consonância com os resultados de Chen *et al.* (2025), que verificaram que o teor de superplastificante influencia significativamente o desempenho mecânico do ECC com fibras, mas não da matriz sem fibras. Os autores atribuíram esse efeito ao papel crucial do aditivo na dispersão das fibras no estado fresco, destacando que uma viscosidade ótima da matriz é necessária para promover uma distribuição uniforme das fibras.

A Figura 39 apresenta o fator de energia inicial (E_m) e o índice de tenacidade à flexão pós-pico (I_{post}) dos corpos de prova ensaiados com matriz M45 e 1M2C, respectivamente.

Figura 39 – Fator de energia inicial (E_m) e índice de tenacidade à flexão pós-pico (I_{post}) dos compósitos (a; b) ECC-M45 e (c, d) ECC-1M2C.



Fonte: Autora (2026).

Os compósitos M45_2,0A_0,0P (0,40 SP) e M45_1,5A_0,5P apresentaram maiores valores de E_m (145 kJ/m³ e 147 kJ/m³, respectivamente), indicando uma capacidade de absorção de energia superior durante a microfissuração e a fase de enrijecimento por deformação. Essas mesmas misturas apresentaram os menores valores de I_{post} (0,08 e 0,14). Segundo Zhang, Zhang e Deng (2022), valores baixos de I_{post} indicam que o mecanismo dominante de falha das fibras é a ruptura.

Os compósitos M45_1,0A_1,0P e M45_0,5A_1,5P (0,80 SP) apresentaram valores elevados de I_{post} (0,30 e 0,38), consistentes com um comportamento dominado pelo arrancamento das fibras. A mistura M45_1,0A_0,0P apresentou desempenho inicial mais fraco, com E_m de apenas 24,0 kJ/m³, refletindo sua capacidade limitada de absorver energia durante o início e a propagação das fissuras. O compósito M45_0,0A_2,0P (0,80) apresentou ruptura imediata após atingir a resistência máxima à flexão, sem desenvolvimento de tenacidade residual.

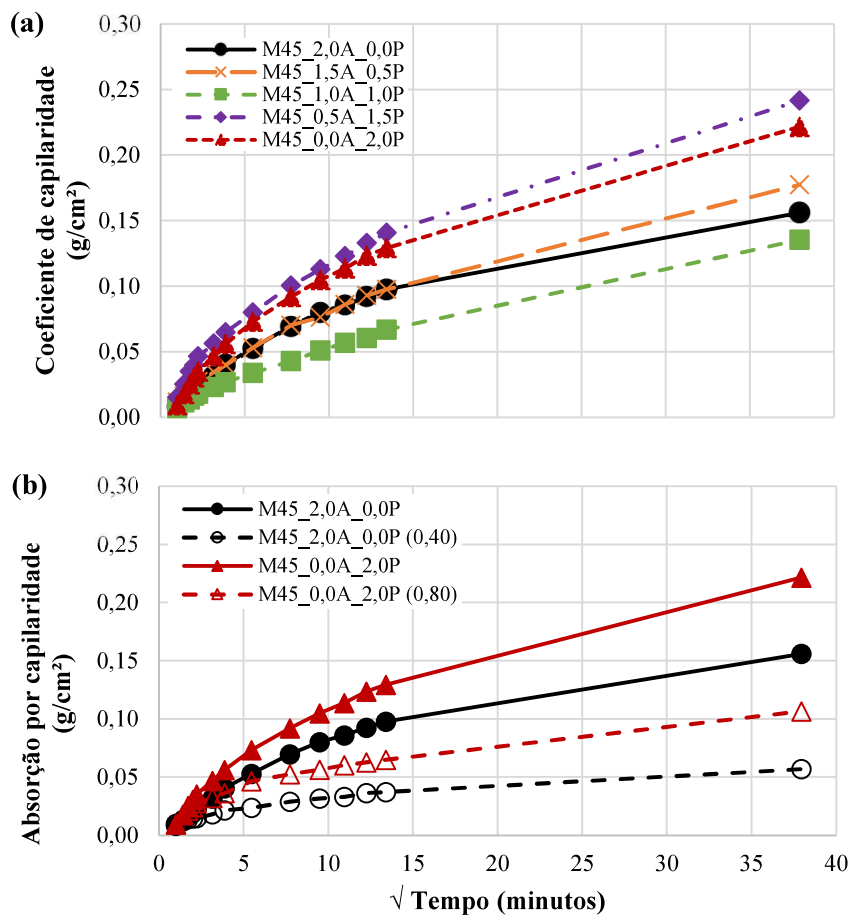
O compósito 1M2C_2,0A_0,0P apresentou o maior valor de E_m (117,3 kJ/m³) entre as formulações com matriz de metacaulim e calcário, sendo superior à M45_2,0A_0,0P com 0,30% de SP e inferior à mesma composição com 0,4% de aditivo. Para a formulação 1M2C_1,5A_0,5P, o valor de E_m foi inferior ao da M45_1,5A_0,5P, entretanto, o I_{post} (0,10) indica uma tenacidade residual reduzida após o pico de carga, devido à perda da capacidade de carga pós-pico.

De modo geral, o aumento do teor de PP resultou na redução do E_m e no aumento da tenacidade residual nos compósitos com matriz 1M2C, com efeito mais pronunciado nas misturas com menores teores de PVA, como 1M2C_0,5A_1,5P (70,1 kJ/m³) e 1M2C_0,0A_2,0P (65,0 kJ/m³). Em contraste com a formulação M45_1,0A_1,0P, o compósito 1M2C_1,0A_1,0P apresentou uma elevada capacidade de absorção de energia pré-pico (100,1 kJ/m³). Esse resultado evidencia o efeito positivo dessa proporção de fibras PVA/PP no desempenho à flexão quando aplicada à matriz 1M2C. Embora tenha apresentado um E_m mais baixo, o 1M2C_0,0A_2,0P (65,0 kJ/m³) manteve níveis de carga próximos ao máximo à medida que a deformação aumentava, o que refletiu no maior valor de I_{post} (0,54) para esta formulação.

6.7.3 Permeabilidade

A Figura 40 mostra a cinética de absorção de água das misturas híbridas de ECC para as matrizes M45 e 1M2C. As curvas representam a quantidade de água adsorvida por unidade de área em função da raiz quadrada do tempo.

Figura 40 – Cinética de absorção de água dos compósitos híbridos para as matrizes (a) M45 e (b) M45 com fibras isoladas sob diferentes teores de superplastificante.



Fonte: Autora (2026).

Para os compósitos com matriz M45 (Figura 40a), observou-se que maiores teores de fibras de PVA resultaram em menor absorção de água por capilaridade. Durante o período inicial de quatro horas, as misturas M45_2,0A_0,0P e M45_1,5A_0,5P exibiram taxas de absorção semelhantes. Após esse período, a mistura M45_1,5A_0,5P apresentou um aumento na taxa de absorção em relação à M45_2,0A_0,0P. Esse resultado é consistente com os obtidos por Hou

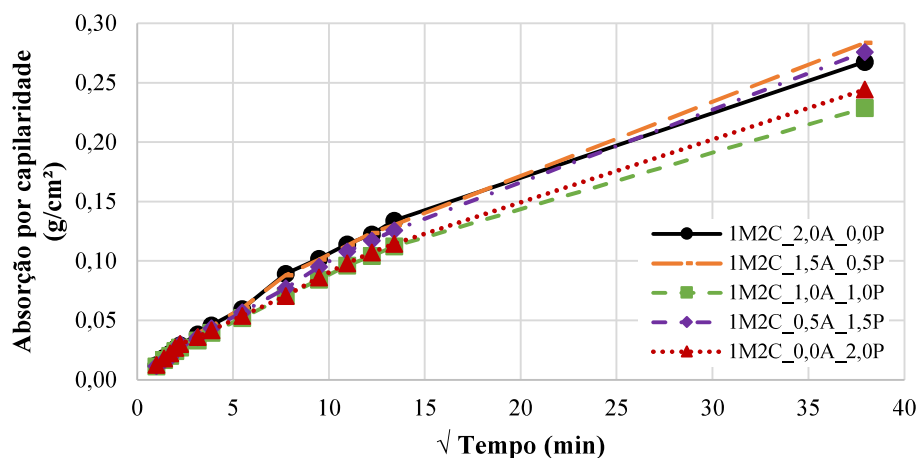
e Li (2023), que relataram que o aumento do teor de fibras de PP aumenta a porosidade e a interconectividade dos poros, o que favorece o transporte capilar.

A Figura 39.b mostra a influência do teor de superplastificante na absorção capilar de ECCs com fibra isolada (PVA ou PP). Para os compósitos com ambas as fibras, o aumento da dosagem do superplastificante reduziu a absorção de água por capilaridade. Essa tendência pode ser atribuída a uma maior densificação da microestrutura, resultante da melhor dispersão da matriz e de uma distribuição mais homogênea das fibras.

O compósito M45_1,0A_1,0P apresentou a menor absorção de água por capilaridade entre as formulações avaliadas. Esse comportamento pode ser atribuído a uma interação entre as fibras de PVA e PP: suas diferenças em diâmetro, comprimento e propriedades superficiais podem interromper a continuidade da rede de poros, reduzindo a permeabilidade do sistema. Contudo, o mecanismo exato desse efeito das fibras combinadas sobre a permeabilidade ainda requer investigação mais aprofundada.

Os resultados de absorção de água por capilaridade do ECC híbrido com matriz 1M2C, (Figura 40), indicaram maior taxa de absorção de água em comparação com os compósitos de matriz M45. Esse comportamento provavelmente decorre do elevado teor de ar incorporado verificado nesses compósitos (Figura 35), que aumenta a interconectividade dos poros, e consequentemente, a absorção de água. Assim como observado para a resistência à compressão, o teor de ar e a densidade, a hibridização das fibras exerceu pouca influência sobre a absorção capilar neste compósito.

Figura 41 – Cinética de absorção de água dos ECC-1M2C.

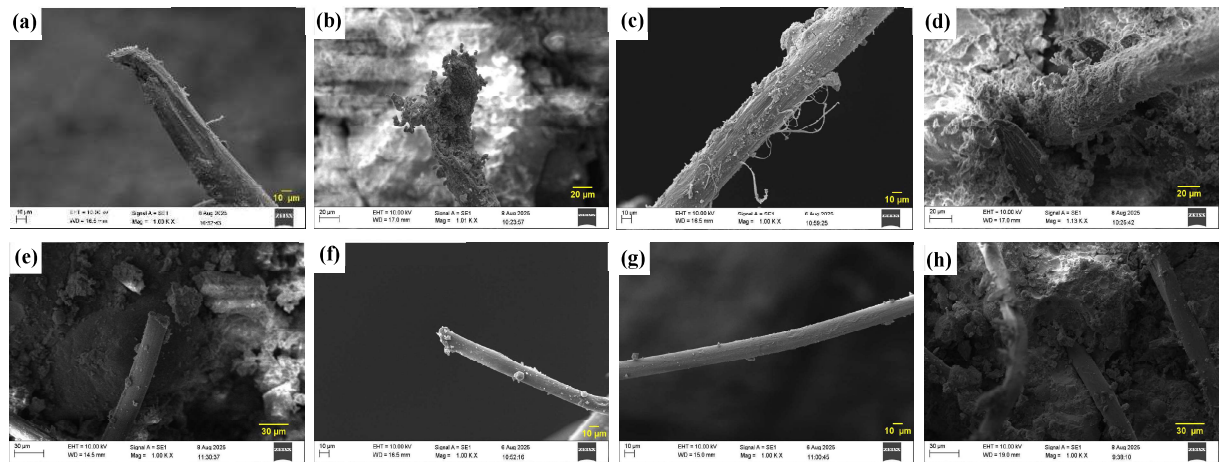


Fonte: Autora (2026).

6.7.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

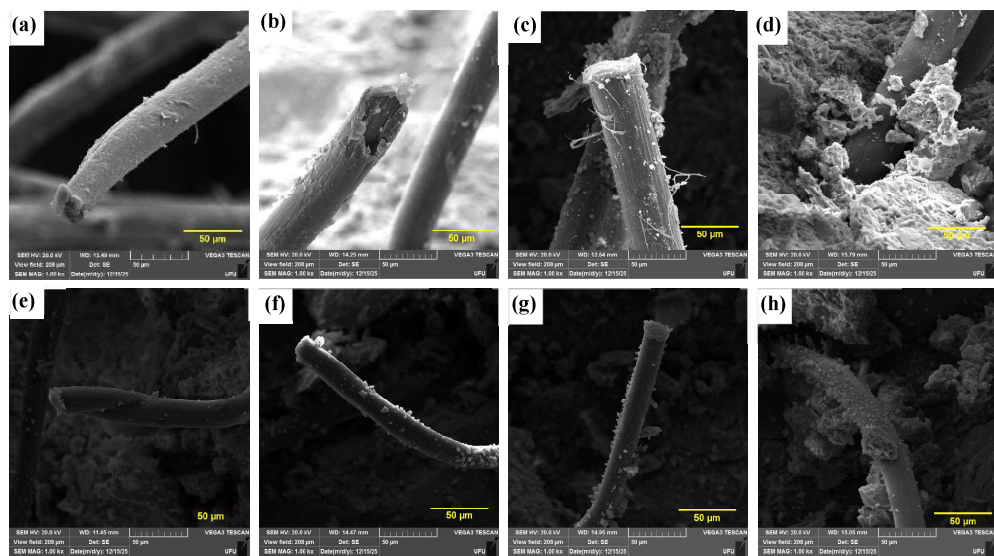
As Figuras 42 e 43 apresentam as micrografias dos compósitos de fibras de PVA e PP para as matrizes M45 e 1M2C, respectivamente.

Figura 42 – Imagens MEV do ECC com matriz M45 e fibras de PVA: (a, b) superfície de fratura; (c) dano no filamento; (d) ligação interfacial fibra/matriz; e fibras PP (e, f) superfície de arrancamento (*pull-out*); (g) superfície da fibra; e (h) ligação interfacial fibra/matriz.



Fonte: Autora (2026).

Figura 43 – Imagens MEV do ECC com matriz 1M2C e fibras de PVA: (a, b) superfície de fratura; (c) dano no filamento; (d) ligação interfacial fibra/matriz; e fibras de PP: (e, f, g) superfície de arrancamento (*pull-out*); e (h) ligação interfacial fibra/matriz.



Fonte: Autora (2026).

Nota-se nas imagens que as fibras de PVA falharam por ruptura, comportamento também relatado por Zhang *et al.* (2018). As superfícies de fratura irregulares das fibras de PVA são atribuídas à sua forte ligação interfacial com a matriz cimentícia, conforme observado por Yan *et al.* (2023). Além disso, foi observado dano filamentar nas fibras de PVA, conforme descrito anteriormente por Lu *et al.* (2023).

Devido à sua natureza hidrofílica, as fibras de PVA também apresentaram produtos de hidratação aderidos à superfície, indicando uma interação química com a matriz. As fibras de PP exibiram padrões de ruptura regulares, típicos do mecanismo de arrancamento. A quantidade de produtos de hidratação observada em sua superfície foi inferior àquela verificada nas fibras de PVA, em função da natureza hidrofóbica do material.

As respostas distintas macromecânicas dos compósitos de ECC são fundamentalmente governadas pelas características interfaciais em microescala e pelos modos de falha. As maiores resistências à compressão e à flexão observadas nas misturas com predominância de PVA se originam da forte ligação interfacial fibra-matriz, evidenciada pelas imagens de MEV que mostram superfícies de ruptura irregulares. Essa ligação, reforçada pela natureza hidrofílica das fibras de PVA, possibilita uma transferência eficiente de tensões, aumentando a capacidade de carga, porém reduz a sua ductilidade.

As fibras de PP apresentam superfícies hidrofóbicas com poucos produtos de hidratação, resultando em uma zona de transição interfacial mais fraca e em um mecanismo de falha dominado pelo arrancamento das fibras (*pull-out*). Consequentemente, a substituição total das fibras de PVA por fibras de PP acarreta reduções significativas na resistência, de até 29% à compressão e 42% à flexão, devido ao deslizamento interfacial em vez da ruptura das fibras. Essa mesma interface mais fraca, entretanto, favorece maior dissipação de energia por meio do arrancamento das fibras, melhorando a ductilidade (Figura 36) e aumentando a tenacidade pós-fissuração (Figuras 38) dos compósitos com elevado teor de fibras de PP.

6.8 CONCLUSÕES PARCIAIS

Este capítulo investigou o efeito da hibridização de fibras de PVA e PP nas propriedades do ECC com duas matrizes distintas: uma com cinza volante (M45) e outra com metacaulim e calcário (1M2C). Paralelamente, avaliou-se também o efeito do teor de aditivo superplastificante em formulações com a matriz M45 reforçadas com fibras isoladas de PVA ou de PP.

Os resultados no estado fresco evidenciaram a perda de trabalhabilidade com o aumento da substituição de fibras de PVA por fibras de PP, refletida na redução do espalhamento do ECC-M45 (de 250 mm para 214 mm) e do ECC-1M2C (de 255 mm para 198 mm). Misturas com maiores teores de PP apresentaram maior tendência à exsudação e à formação de aglomerados de fibras, especialmente quando utilizados teores elevados de superplastificante.

A matriz 1M2C demandou teores mais elevados de SP (0,9% - 1,1%) em comparação à M45 (0,3% - 0,5%) para atingir o índice de consistência estabelecido. Ainda assim, apenas as misturas 1M2C_2,0A_0,0P e 1M2C_1,5A_0,5P atingiram o espalhamento de referência, indicando maior sensibilidade dessa matriz à incorporação de fibras.

O teor de ar incorporado apresentou comportamentos distintos entre o ECC com matriz M45 e matriz 1M2C. No ECC-M45, observou-se aumento do teor de ar com a substituição de PVA por PP, coerente com o caráter hidrofóbico dessas fibras. Para uma mesma relação PVA/PP, as misturas com matriz 1M2C apresentaram maiores densidades em relação à M45. De forma semelhante ao ECC-M45, o ECC-1M2C apresentou aumento do teor de ar incorporado com o aumento do teor de fibras de PP, porém esse comportamento foi observado apenas nas misturas 1M2C_2,0A_0,0P, 1M2C_1,5A_0,5P e 1M2C_1,0A_1,0P. Para teores de fibras de PP superiores a 1,0%, verificou-se redução do teor de ar incorporado acompanhada por aumento da densidade das misturas.

A incorporação de 2% de fibras de PVA promoveu redução da resistência à compressão em ambas as matrizes, sendo mais acentuada no ECC-1M2C (19,8%) do que no ECC-M45 (7,1%). Esse comportamento está associado ao maior teor de ar incorporado observado nas formulações com metacaulim e fíler calcário.

Na matriz M45, a resistência à compressão apresentou redução aproximadamente linear ($R^2 = 0,97$) com o aumento da substituição de PVA por PP, atingindo uma queda de 28,9% com a substituição total. Nas misturas com fibras isoladas, o teor de superplastificante também exerceu influência negativa na resistência à compressão.

Apesar da redução mais significativa da resistência à compressão após a incorporação de fibras, a substituição de PVA por PP teve impacto limitado no ECC-1M2C, indicando que, nessa matriz mais viscosa, o efeito do tipo de fibra é atenuado pelos mecanismos de incorporação de ar e pela microestrutura da pasta.

A resistência à tração na flexão das misturas M45 e 1M2C foi influenciada pelo tipo e teor de fibras, com maiores valores associados a maiores proporções de PVA, em função da maior resistência das fibras e de sua ligação interfacial mais eficiente com a matriz. Teores de

fibras de PP superiores a 1,0% resultaram em reduções mais acentuadas da resistência à tração na flexão em ambas as matrizes.

Os ensaios de flexão a quatro pontos confirmaram o comportamento de enrijecimento por deformação das misturas. As formulações com 0,5% de fibras de PP apresentaram níveis de resistência semelhantes às misturas com 2,0% de PVA, destacando-se M45_1,5A_0,5P (10,6 MPa) e 1M2C_1,5A_0,5P (10,3 MPa). No ECC-M45, essa substituição resultou em um aumento de 37% no deslocamento vertical no pico de carga, enquanto, na matriz 1M2C, observou-se redução de 20% no deslocamento vertical.

O efeito do teor de aditivo superplastificante foi observado na mistura M45_2,0A_0,0P. O aumento do teor de 0,3% para 0,4% reduziu a resistência à flexão, mas aumentou a capacidade de deformação pós-fissuração. O aumento da dosagem de SP melhorou a fluidez e favoreceu uma distribuição mais uniforme das fibras.

Na análise da tenacidade à flexão, as misturas com maiores teores de fibras de PVA apresentaram valores mais elevados de E_m , associados predominantemente à ruptura das fibras, enquanto aquelas com maior teor de fibras de PP exibiram maiores valores de I_{post} , característicos de um mecanismo de arrancamento das fibras. As imagens obtidas por MEV corroboram esses resultados, evidenciando os diferentes mecanismos de interação fibra/matriz observados nos ensaios mecânicos.

A absorção de água por capilaridade foi influenciada tanto pelo tipo de fibra quanto pela matriz cimentícia. Na matriz M45, o aumento do teor de fibras de PP resultou em maior absorção capilar, comportamento atribuído à formação de vazios e à maior interconectividade dos poros na interface fibra/matriz. A mistura híbrida M45_1,0A_1,0P apresentou comportamento atípico, com a menor absorção capilar entre as formulações avaliadas, apesar do elevado teor de ar incorporado, indicando um possível efeito sinérgico da hibridização na descontinuidade da rede de poros.

Os compósitos com matriz 1M2C apresentaram taxa de absorção capilar superiores às da matriz M45, resultado coerente com o maior teor de ar incorporado no estado fresco e com a maior interconectividade dos poros observada nessas formulações.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou a influência da substituição total da cinza volante por uma combinação de metacaulim e filer calcário em matrizes de ECC, investigando os efeitos da hibridização de fibras de PVA e PP na trabalhabilidade, propriedades mecânicas, permeabilidade e microestrutura dos compósitos.

No estudo em matriz (Etapa 1), a trabalhabilidade das pastas foi influenciada pelo tipo de adição mineral e pela proporção entre metacaulim e filer calcário. A matriz M45 demandou menos superplastificante, o que se associa à morfologia da cinza volante. As misturas com metacaulim e filer calcário (1M1C e 1M2C) exigiram maiores teores de SP para atingir a fluidez estabelecida, devido à maior área específica do metacaulim e à elevada finura das partículas no sistema. No estado endurecido, essas mesmas características conferiram às matrizes 1M1C e 1M2C maiores resistências iniciais. A matriz 1M2C apresentou maior trabalhabilidade e resistência similar às matrizes M45, tornando-a viável em substituição ao uso de cinza volante. Além disso, com menor consumo de metacaulim e superplastificante, o que contribui para redução de custos.

A hibridização das fibras (PVA/PP) afetou diretamente a trabalhabilidade dos compósitos (Etapa 2). O aumento no teor de fibras de PP reduziu a fluidez e aumentou a tendência à exsudação e aglomeração de fibras, efeito que se intensificou em teores mais elevados de superplastificante. O compósito ECC-1M2C apresentou maior sensibilidade à incorporação de fibras, exigindo maiores teores de aditivo.

A incorporação de fibras reduziu a resistência à compressão em ambas as matrizes. No ECC-M45, verificou-se uma tendência linear entre o teor de fibra de PP e a resistência à compressão. No ECC-1M2C, o efeito da hibridização foi menos pronunciado, sugerindo que a viscosidade da matriz e os mecanismos de incorporação de ar atenuaram a influência do tipo de fibra. Todos os compósitos estudados apresentaram comportamento de enrijecimento por deformação, típicos do ECC. O compósito 1,5A_0,5P se destacou por oferecer equilíbrio entre resistência e ductilidade, principalmente no ECC-M45. Teores de PP iguais ou superiores a 1,0% resultaram em queda da resistência, porém com aumento da capacidade de deformação do compósito.

O aumento do teor de superplastificante no compósito M45_2,0A_0,0P reduziu a resistência à flexão, porém aumentou a capacidade de deformação pós-fissuração, indicando que a trabalhabilidade e a dispersão das fibras influenciam na resposta mecânica do compósito.

O superplastificante desempenhou um papel fundamental no comportamento dos compósitos. Foi essencial para garantir a trabalhabilidade, especialmente nas matrizes com metacaulim e calcário (1M2C/1M1C) e em misturas com fibras de PP, que demandaram dosagens significativamente maiores. No estado endurecido, o SP melhorou a ductilidade pela dispersão de fibras, mas reduziu a resistência à compressão ao incorporar ar.

A análise de tenacidade revelou mecanismos distintos de falha: maiores teores de PVA levaram predominantemente à ruptura das fibras, enquanto teores elevados de PP favoreceram o arrancamento (*pull-out*), conforme corroborado pela análise microestrutural via MEV.

Quanto à permeabilidade, o aumento do teor de fibras de PP resultou em maior absorção de água por capilaridade, atribuída à maior formação e interconectividade de vazios na interface. Os compósitos com matriz 1M2C, devido ao maior teor de ar incorporado, apresentou taxas de absorção superiores às da M45 em todas as formulações.

Em suma, conclui-se que a substituição total da cinza volante por metacaulim e fíler calcário é tecnicamente viável em ECC. A estratégia de hibridização de fibras (PVA e PP) mostrou-se promissora, para obtenção de compósitos de maior ductilidade sem perda de resistência mecânica. A proporção ideal de fibras pode ser definida em função da aplicação do ECC.

7.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

São apresentadas as seguintes sugestões para pesquisas futuras:

- Avaliação da influência de diferentes teores de aditivo superplastificante no comportamento reológico e mecânico dos compósitos cimentícios engenheirados.
- Análise do uso combinado de superplastificantes e modificadores de viscosidade no ECC com matriz composta por metacaulim e fíler calcário, especialmente em fibras de PP.
- Avaliação da natureza superficial das fibras combinadas na permeabilidade dos compósitos cimentícios engenheirados.
- Avaliação da permeabilidade em compósitos híbridos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15839: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método squeeze-flow. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NM18: Cimento Portland – Análise Química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: Materiais Pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15894-1: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15895: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15839: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método *squeeze-flow*. Rio de Janeiro, 2010.

ASTM. C618-22: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

Al-Gemeel, A., Zhuge, Y. e Youssf, O. Experimental Investigation of Basalt Textile Reinforced Engineered Cementitious Composite Under Apparent Hoop Tensile Loading. *Journal and Building Materials*, v. 23, p. 270-279, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.01.037>.

Al-Fakih, A. et al. Mechanical, environmental, and economic performance of engineered cementitious composite incorporated limestone calcined clay cement: A review. *Journal of Building Engineering*, v. 79, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107901>.

Avet, F. et al. Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. *Cement and Concrete Research*, v. 85, p. 1-11, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.015>.

Abdallah, A. et al. Strengthening of RC beams with inadequate lap splice length using cast-in-situ and anchored precast ECC ferrocement layers mitigating construction failure risk. *Case Studies in Construction Materials*, v. 20, e02747, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02747>.

Aydın e Baradan. The effect of fiber properties on high performance alkaliactivated slag/silica fume mortars. *Composites Part B: Engineering*, v. 45, n. 1, p. 63-69, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.080>.

ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). Roadmap brasileiro para redução da emissão de carbono na indústria do cimento, 2021.

Bandala, E. et al. Corrosion Behavior of AISI 1018 Carbon Steel in Localized Repairs of Mortars with Alkaline Cements and Engineered Cementitious Composites. *Materials*, v. 13, n. 15, 3327, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13153327>.

Brykov, T., Krasnobaeva, S. e Mookey, M. Hydration of Portland cement in the presence of highly reactive metakaolin. *Materials Sciences and Application*, v. 6, p. 391-400, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4236/msa.2015.65044>.

Bentur A. e Mindess S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. 2. ed. Londres, 2014.

Borodier, E. Impact of the Supplementary Cementitious Materials on the kinetics and microstructural development of cement hydration. EPFL, 2015.

Bonavetti, V., Rahhal, V. e Irassar, E. Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements. *Cement and Concrete Research*, v. 31, p. 853-859, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00491-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00491-4).

Burgos-Montes, O., Alonso, M. e Puertas, F. Viscosity and water demand of limestone- and fly ash-blended cement pastes in the presence of superplasticizers. *Construction and Building Materials*, v. 48, p. 417-423, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.008>.

Cai, R. et al. The early hydration of metakaolin blended cements by non-contact impedance measurement. *Cement and Concrete Research*, v. 92, p. 70-81, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.06.001>.

Chen, W. et al. Effect of shape memory alloy fiber content and preloading level on the self-healing properties of smart cementitious composite (SMA-ECC). *Construction and Building Materials*, v. 341, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127797>.

Cheng, L. et al. Research progress and performance of polyvinyl alcohol fiber engineered cementitious composites. *Sustainability*, v. 15, 10991, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151410991>.

Chen, W. et al. Engineered cementitious composites using blend limestone calcined clay and fly ash: mechanical properties and drying shrinkage modeling. *Case Studies in Construction Materials*, v. 20, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02960>.

Chilvers, J. et al. Experimental and numerical investigations of hybrid-fibre engineered cementitious composite panels under contact explosions. *Engineering Structures*, v. 266, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114582>.

Ding, Y. et al. Structural behaviors of ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) beams subjected to bending-experimental study. *Construction and Building Materials*, v. 177, p. 102-115, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.122>.

Diaz-Loya, I. et al. Extending supplementary cementitious material resources: Reclaimed and remediated fly ash and natural pozzolans. *Cement and Concrete Composites*, v. 101, p. 44-51, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.06.011>.

Deng, Y. et al. Preparation and mechanical characterization of engineered cementitious composites with high-volume fly ash and waste glass powder. *Journal of Cleaner Production*, v. 333, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130222>.

Deng, B. et al. Flexural behavior of precast ultra-lightweight ECC-concrete composite slab with lattice girders. *Engineering Structures*, v. 279, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115553>.

Dong, Z. et al. Using special coarse aggregate to enhance the tensile strain capacity of engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, v. 145, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105347>.

Dhandapani, Y. et al. Towards ternary binders involving limestone additions — A review. *Cement and Concrete Research*, v. 143, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106396>.

Fahad, A. *et al.*, Study on PVA fiber surface modification for strain-hardening cementitious composites (PVA-SHCC), *Construction and Building Materials*, v. 197, 107-116, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.072>.

Fernandez, R., Martirena, F. e Scriviner, K. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. *Cement and Concrete Research*, v. 41, p. 113-122, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.013>.

Fukuyama, H. e Suwada, H. Experimental Response of HPFRCC Dampers for Structural Control. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 1, p. 317-326, 2003. DOI: <https://doi.org/10.3151/jact.1.317>.

Ghahsareh, F. et al. Review on material specification, characterization, and quality control of engineered cementitious composite (ECC). *Construction and Building Materials*, v. 442, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137699>.

Gou, H. et al. Matrix design and performance development of eco-friendly high-strength, lightweight engineered cementitious composites. *Journal of Building Engineering*, v. 77, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107254>.

Guan, Y. et al. Preparation of low-cost green engineered cementitious composites (ECC) using gold tailings and uncoiled PVA fiber. *Journal of Building Engineering*, v. 78, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107455>.

Hammond, G. e Jones, C. *Inventory of carbon and energy*. University of Bath, 2008.

Halvaei et al. Interfacial bonding of fine aggregate concrete to low modulus fibers. *Construction Building Materials*, v. 95, p. 117–123, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.024>.

Heede, P. et al. Cradle-to-gate life cycle assessment of self-healing engineered cementitious composite with in-house developed (semi-)synthetic superabsorbent polymers. *Cement and Concrete Composites*, v. 94, p. 166-180, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.08.017>.

Helal, K. et al. Performance of eco-friendly ECC made of pre-treated crumb rubber and waste quarry dust. *Journal of Building Engineering*, v. 37, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.08.017>.

Hoppe Filho, J. *Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto*. 2008. 247 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

Hou, W. et al. Compressive behavior of steel spiral confined engineered cementitious composites in circular columns. *Advances in Structural Engineering*, v. 26, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1177/1369433220928528>.

Hou, M., Zhang, D. e Li, V. Material processing, microstructure, and composite properties of low carbon Engineered Cementitious Composites (ECC). *Cement and Concrete Composites*, v. 134, 104790, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104790>.

Hou, M. e Li, V. Tailoring crack width control of LC3-based engineered cementitious composites (ECC) via fiber hybridization: From micromechanics design to macro investigation. *Materials & Design*, v. 235, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112433>.

Hou, M., Li, Z. e Li, V. Green and durable engineered cementitious composites (GD-ECC) with recycled PE fiber, desert sand, and carbonation curing: Mixture design, durability performance, and life-cycle analysis. *Construction and Building Materials*, v. 414, 134984, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134984>.

Hou, M. et al. Experimental study on ultra-high ductility cementitious composites applied to link slabs for jointless bridge decks. *Composites Structures*, v. 205, p. 167-177, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.067>.

Huang, X. et al. Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 44, p. 757-764, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.088>.

Hu, S. et al. Experimental study on mechanical properties of sprayed ECC under quasi-static and cyclic loading. *Construction and Building Materials*, v. 414, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134964>.

Hu, S. et al. Performance comparison test of new sprayed engineered cementitious composites and C25 sprayed concrete. *Case Studies in Construction Materials*, v. 16, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01139>.

Hunger, M. e Brouwers, H. Flow analysis of water–powder mixtures: Application to specific surface area and shape factor. *Cement and Concrete Composites*, v. 31, p. 39-59, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.09.010>.

IBRACON. *Concreto: Ciência e Tecnologia* – 2 volumes. 3 ed, vol 1. São Paulo: IBRACON, 2022.

Kantro, D. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – a miniature slump test. *Cement, Concrete and Aggregates*, v. 2, n. 2, p. 95-102, 1980. DOI: <https://doi.org/10.1520/CCA10190J>.

Khan, S. et al. Performance evaluation of the fresh and hardened properties of different PVA-ECC mixes: an experimental approach. *Case Studies in Construction Materials*, v. 18, e01764, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01764>.

Kumar, H. e Saini, B. Behaviour of engineered cementitious composite (ECC) with utilization of waste materials: A review. *Materials Today: Proceedings*, v. 93, p. 310-314, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01764>.

Lepech, M. e Li, V. Water permeability of engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, v. 31, p. 744-53, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.07.002>.

Lei, D. et al. The connection between microscopic and macroscopic properties of ultra-high strength and ultra-high ductility cementitious composites (UHS-UHDCC). *Composites Part B: Engineering*, v. 164, p. 144-157, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.062>.

Li e Leung. Theory of Steady State and Multiple Cracking of Random Discontinuous Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 118, p. 2246-2264, 1992. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1992\)118:11\(2246\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1992)118:11(2246)).

Li, V., Stang, H. e Krenchel, H. Micromechanics of Crack Bridging in Fiber Reinforced Concrete. *Materials and Structures*, v. 26, p. 486-494, 1993. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02472808>

Li, V. Engineered Cementitious Composites (ECC) Material, Structural, and Durability Performance. *Concrete Construction Engineering Handbook*, capítulo 24, 2008.

Li, V. Engineered Cementitious Composites (ECC): Bendable Concrete for Sustainable and Resilient Infrastructure. Springer, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58438-5>.

Li, V., Wang, S. e Wu, C. Tensile Strain-Hardening Behavior of Polyvinyl Alcohol Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC). *Materials Journal*, v. 98, p. 483-492, 2001. DOI: <https://doi.org/10.14359/10851>.

Li, V. e Kanda, T. Structural Applications of Engineered Cementitious Composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 10, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1998\)10:2\(66\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1998)10:2(66)).

Li, V. e Kanda, T. Material Design and Development of High-Ductility Composite Reinforced with Short Random Polyvinyl Alcohol Fiber.

Li, V. On Engineered Cementitious Composites (ECC): A Review of the Material and Its Applications, *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 1, n. 3, p. 215-230, 2003. DOI: <https://doi.org/10.3151/jact.1.215>.

Li, J., Li, V. e Zhang, D. Inert particles enhanced strength-ductility relationship for Engineered Cementitious Composites based on PVA fibers. *Construction and Building Materials*, v. 495, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143600>.

Li, V. et al. Interface Tailoring for Strain-Hardening Polyvynil Alcohol-Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC). *Materials Journal*, v. 99, n. 5, p. 463-472, 2002. DOI: <https://doi.org/10.14359/12325>.

Li, Y. et al. Multiple cracking and strain-hardening criteria of Engineered Cementitious Composites (ECC) with river sand. *Cement and Concrete Research*, v. 180, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107511>.

Li, V., Wang, S. e Wu, C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC). *Materials Journal*, v. 98, n. 6, p. 483-483, 2001. DOI: <https://doi.org/10.14359/10851>.

Li, V. e Wang, S. Microstructure variability and microscopic composite properties of high-performance fiber reinforced cementitious composites. *J. Probabilistic Engineering Mechanics*, v. 21, n. 3, p. 201-206, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pro bengmech.2005.10.008>.

Li, V. Tailoring ECC for special attributes: A review. *Journal of Concrete Structures and Materials*, v. 6, n. 3, p. 135-144, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40069-012-0018-8>.

Li, V. Engineered Cementitious Composites (ECC) – Material, Structural, and Durability Performance. *Concrete Construction Engineering Handbook*, in *Concrete Construction Engineering Handbook*. Capítulo 24, Ed. E, 2008.

Lin, J-X. et al. Static and dynamic mechanical behavior of engineered cementitious composites with PP and PVA fibers. *Journal of Building Engineering*, v. 29, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job e.2019.101097>.

Lin, C. et al. Experimental study on the mechanical properties of different fiber-reinforced seawater sea-sand engineered cementitious composites. *Construction and Building Materials*, v. 304, 124562, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124562>.

Liu, J. et al. Investigation of using limestone calcined clay cement (LC3) in engineered cementitious composites: The effect of propylene fibers and the curing system. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 15, p. 2117-2144, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.023>.

Lu, C. et al. Investigation on performance of engineered cementitious composites (ECC) based on surface modification of PET fibers using graphene oxide (GO) and polydopamine (PDA). *Construction and Building Materials*, v. 368, 130343, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130343>.

Long, X. *et al.*, Effect of freeze-thaw cycles and chloride salt erosion coupling conditions on fatigue properties of PE-ECC, *Case Studies in Construction Materials*, e02726, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02726>.

Lothenbach, B. et al. Thermodynamic modelling of the effect of temperature on the hydration and porosity of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, v. 38, p. 1-18, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.017>.

Lothenbach, B. et al. Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research*, v. 38, p. 848-860, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.01.002>.

Lothenbach, B., Scriviner, K. e Hooton, R. Supplementary Cementitious Materials. *Cement and Concrete Research*, v. 41, p. 1244-1256, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>.

Ma, H., Yi, C. e Wu, C. Review and outlook on durability of engineered cementitious composite (ECC). *Construction and Building Materials*, v. 287, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122719>.

Maciel., M. et al. Monitoring of Portland cement chemical reaction and quantification of the hydrated products by XRD and TG in function of the stoppage hydration technique. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 136, p. 1269-1284, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7734-5>.

Magalhães, M., Cezar, B. e Lustosa, P. Influence of Brazilian fly ash fineness on the cementing efficiency factor, compressive strength and Young's modulus of concrete. *Developments in the Built Environment*, v. 14, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100147>.

Markovic, I. High-performance Hybrid-fibre Concrete: Development and Utilisation. 2006.

Matschei, T., Lothenbach, B. e Glasser, F. The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cement and Concrete Research*, v. 37, p. 551-558, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.013>.

Maleej, M., Quek, S. e Zhang, J. Behavior of hybrid-fiber engineered cementitious composites subjected to dynamic tensile loading and projectile impact. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 17, 2005. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2005\)17:2\(143\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:2(143)).

Mehta, P. e Monteiro, P. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

Melo, M., Tofeti, T. e Costa, E. Uso de Fibras em compósitos cimentícios engenheirados: levantamento bibliográfico (2018 – 2024). 64º Congresso Brasileiro de Concreto – IBRACON, 2024, Saulo.

Medina, E. Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio. 2011. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

Mohammed, B., Khed, V. e Liew, M. Optimization of hybrid fibers in engineered cementitious composites. *Construction and Building Materials*, v. 190, p. 24-37, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.188>.

Muller, S. e Mechtcherine, V. Use of Strain-Hardening Cement-Based Composites (SHCC) in Real Scale Applications. *Rilem Bookseries*, p. 690-700, 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-024-1194-2_79.

Nicolaidis, D. et al. Development of a new Ultra High-Performance Fibre Reinforced Cementitious Composite (UHPFRCC) for impact and blast protection of structures. *Construction and Building Materials*, v. 95, p. 667-674, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.136>.

Noushini, A., Samali, B. e Vessalas, K. Effect of polyvinyl alcohol (PVA) fibre on dynamic and material properties of fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, v. 49, p. 374-383, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.035>.

Özkan, S. e Demir, F. The hybrid effects of PVA fiber and basalt fiber on mechanical performance of cost-effective hybrid cementitious composites. *Construction and Building Materials*, v. 263, 120564, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120564>.

Pakravan, H., Latifi, M. e Jamshidi, M. Ductility improvement of cementitious composites reinforced with polyvinyl alcohol-polypropylene hybrids fibers. *Journal of Industrial Textiles*, v. 45, p. 637-651, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1177/1528083714534712>.

Pakravan, H., Jamshidi, M. e Latifi, M. Study of fiber hybridization effect of engineered cementitious composites with low- and high-modulus polymeric fibers. *Construction and Building Materials*, v. 112, p. 739-746, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.112>.

Pan, Z. et al. Study on mechanical properties of cost-effective polyvinyl alcohol engineered cementitious composites (PVA-ECC). *Construction and Building Materials*, v. 78, 379-404, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.071>.

Parente, I. Parâmetros de durabilidade de compósitos sisal-cimento para uso como fôrmas permanentes de vigas de concreto armado. 2020. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Bahia, 2020.

Qi, X. et al. Engineered cementitious composites with limestone calcined clay cement (LC³-ECC): Effects of clinker content and fly ash. *Journal of Building Engineering*, v. 105, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112828>.

Qian, X. et al. Sustainable cementitious material with ultra-high content partially calcined limestone-calcined clay. *Construction and Building Materials*, v. 373, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130891>.

Rokugo, K. et al. Applications and recommendations of high-performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracking (HPFRCC) in Japan. *Materials and Structures*, v. 42, p. 1197-1208, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9541-8>.

Sabir, B., Wild, S. e Bai, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, v. 23, p. 441-454, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5).

Shanour, A. et al. Flexural performance of concrete beams containing engineered cementitious composites. *Construction and Building Materials*, v. 180, p. 23-34, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.238>.

Scrivener, K. et al. Calcined clay limestone cements (LC3). *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 49-56, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>.

Scrivener, K. Options of the future of cement. *Indian Concrete Journal*, v. 88, p. 11-21, 2014.

Shoji, D. et al. The greening of engineered cementitious composites (ECC): A review. *Construction and Building Materials*, v. 327, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126701>.

Singh, S. e Munjal, P. Engineered cementitious composite and its applications. *Materials Today: Proceedings*, v. 32, p. 797-802, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.743>.

Sun, D. et al. Optimization of mechanical and impact resistance of LC3-based low-carbon cement composites under the control of fly ash and PP fiber. *Journal of Building Engineering*, v. 112, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113920>.

Trauchessec, R. et al. Hydration of ordinary Portland cement and calcium sulfoaluminate cement blends. *Cement and Concrete Composites*, v. 56, p. 106-114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.005>.

Tosun-Felekoglu, K. e Felekoglu, B. Effects of fibre hybridization on multiple cracking potential of cement-based composites under flexural loading. *Construction and Building Materials*, v. 41, p. 15-20, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.115>.

Vance, K. et al. The rheological properties of ternary binders containing Portland cement, limestone, and metakaolin or fly ash. *Cement and Concrete Research*, v. 52, p. 196-207, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.07.007>.

Van den Heede, P. et al. Cradle-to-gate life cycle assessment of self-healing engineered cementitious composite with in-house developed (semi-)synthetic superabsorbent polymers. *Cement and Concrete Composites*, v. 94, p. 166-180, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.08.017>.

Vandewalle, L. et al. Postcracking behaviour of hybrid steel fiber reinforced concrete, 2004.

Wang, Y. et al. Influence of limestone calcined clay on the mechanical behaviour of 3D printed engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, v. 166, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.106366>.

Wang, L. et al. On the use of limestone calcined clay cement (LC³) in high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC). *Cement and Concrete Research*, v. 144, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106421>.

Wang, S. e Li, V. Engineered Cementitious Composites with High-Volume Fly Ash. *ACI Materials Journal*, v. 104, 2007. DOI: <https://doi.org/10.14359/18668>.

Wang, Z., Wang, P. e Zhu, F. Synergy effect of hybrid steel-polyvinyl alcohol fibers in engineered cementitious composites: fiber distribution and mechanical performance. *Journal of Building Engineering*, v. 62, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105348>.

Wang, Q. et al. Cracking load of high strength ECC-steel composite bridge deck with impact of shrinkage stress—Test and simulation. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 202, p. 174-201, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.09.018>.

Weerdt, K. et al. Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. *Cement and Concrete Research*, v. 41, p. 279-291, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.014>.

Wons, W. et al. Thermal studies of fly ash expansion. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 143, p. 2883-2891, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09566-2>.

Xie, L. et al. Fracture mechanical properties and interfacial characteristics of engineered cementitious composites containing coarse aggregate. *Engineering Fracture Materials*, v. 307, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.110271>.

Yang, E., Yang, Y. e Li, V. Use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness. *ACI Materials Journal*, 2007.

Yang, E. e Li, V. Tailoring engineered cementitious composites for impact resistance. *Cement and Concrete Research*, v. 42, p. 1066-1071, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.04.006>.

Yang, X., Xu, L. e Pan, J. Mechanical behavior of full-scale composite steel plate shear wall restrained by ECC panels. *Journal of Building Engineering*, v. 44, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102864>.

Yang, E. e Li, V. Strain-hardening fiber cement optimization and component tailoring by means of a micromechanical model. *Construction and Building Materials*, v. 24, p. 130-139, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.05.014>.

Yıldırım, G. *et al.* Self-healing performance of aged cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, v. 87, p. 172-186, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.01.004>.

Yuan, F. et al. A comparison of engineered cementitious composites versus normal concrete in beam-column joints under reversed cyclic loading. *Materials and Structures*, v. 46, p. 145-159, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9890-6>.

Yuan, F. et al. Behaviors of steel-reinforced ECC columns under eccentric compression. *Construction and Building Materials*, v. 185, p. 402-413, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.100>.

Yu, K. et al. Energy dissipation characteristics of all-grade polyethylene fiber-reinforced engineered cementitious composites (PE-ECC). *Cement and Concrete Composites*, v. 106, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103459>.

Yu, Wu e Leung. Feasibility of using ultrahigh-volume limestone-calcined clay blend to develop sustainable medium-strength engineered cementitious composites (ECC). *Journal of Cleaner Production*, v. 262, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121343>.

Yu, J., Li, G. e Leung, C. Hydration and physical characteristics of ultra high-volume fly ash-cement systems with low water/binder ratio. *Construction and Building Materials*, v. 161, p. 509-518, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.104>.

Zajac, M. et al. Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Composites*, v. 46, p. 99-108, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.11.007>.

Zhang, Z. et al. Expanded vermiculite acting as artificial flaws to enhance the tensile properties of high-strength engineered cementitious composites. *Construction and Building Materials*, v. 447, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138081>.

Zhang, Y., Zhang, S. e Deng, M. Four-point bending tests of ECC: Mechanical response and toughness evaluation. *Case Studies in Construction Materials*, v. 17, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01573>.

Zhang, D. et al. Engineered cementitious composites (ECC) with limestone calcined clay cement (LC³). *Cement and Concrete Composites*, v. 114, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103766>.

Zhang, D. et al. Discontinuous micro-fibers as intrinsic reinforcement for ductile Engineered Cementitious Composites (ECC). *Composites Part B*, v. 184, 107741, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107741>.

Zhang, Z. et al. Micromechanics-based analysis of PVA–ECC after thermal exposure. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, v. 23, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43452-023-00736-1>.

Zhang, X. et al. Effect of high temperature on mechanical properties of polyethylene fibre-calcium carbonate whisker engineered cementitious composites. *Developments in the Built Environment*, v.18, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100462>.

Zhang, Z. et al. Development of high-strength engineered cementitious composites using iron sand: Mechanical and shrinkage properties. *Journal of Building Engineering*, v. 95, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110272>.

Zhang, Z. et al. Seismic performance and shear strength of coupling beams using engineered cementitious composites with different reinforcement layouts. *Engineering Structures*, v. 219, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110895>.

Zhang, Y., Li, T. e Deng, M. Effect of splitting bond on shear response of reinforced engineered cementitious composite short columns under cyclic loading. *Engineering Structures*, v. 251, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113474>.

Zhang, L. et al. Structural performance evaluation of ECC link slabs reinforced with FRP bars for jointless bridge decks. *Construction and Building Materials*, v. 304, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124462>.

Zhang, Z., Hu, J. e Ma, H. Feasibility study of ECC with self-healing capacity applied on the long-span steel bridge deck overlay. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 20, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1356173>.

Zhang, H. et al. Design, production, and properties of high-strength high-ductility cementitious composite (HSHDCC): A review. *Composites Part B: Engineering*, v. 247, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110258>.

Zhao, J. *et al.* Effect of expansive agent and curing condition on the properties of low-cost polyvinyl alcohol engineered cementitious composites. *Construction and Building Materials*, v. 268, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121169>.

Zhou, Y. et al. Sustainable lightweight engineered cementitious composites using limestone calcined clay cement (LC³). *Composites Part B Engineering*, v. 243, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110183>.

Zhu, H. et al. Mechanical and self-healing behavior of low carbon engineered cementitious composites reinforced with PP-fibers. *Construction and Building Materials*, v. 259, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119805>.

Zhu, Y. et al. Autogenous self-healing of engineered cementitious composites under freeze–thaw cycles. *Construction and Building Materials*, v. 34, p. 522-530, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.03.001>.

Zhu, H. et al. Low carbon and high efficiency limestone-calcined clay as supplementary cementitious materials (SCMs): Multi-indicator comparison with conventional SCMs. *Construction and Building Materials*, v. 341, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127748>.

Zukowski, B. et al. Effect of moisture movement on the tensile stress–strain behavior of SHCC with alkali treated curauá fiber. *Materials and Structures*, v. 53, n. 49, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01486-9>.

APÊNDICE A

Tabela A1 – Perda de massa na base de não voláteis das matrizes M45, 1M1C e 1M2C nas idades de 7, 28, 56 e 91 dias.

Matriz	Idade	Massa residual (%)	Fc	AQC (%)	Hidróxido de cálcio (%)		Carbonato de cálcio (%)	
					H ₂ O	Ca(OH) ₂	CO ₂	CaCO ₃
M45	7	86,431	1,157	4,626	1,446	6,879	3,925	10,411
	28	86,806	1,152	4,730	1,391	6,588	3,117	8,232
	56	86,896	1,1508	4,708	1,127	5,332	3,215	8,482
	91	85,842	1,1649	5,615	1,203	5,762	3,123	8,341
1M1C	7	79,769	1,2536	6,689	0,851	4,386	12,993	37,344
	28	77,976	1,2824	6,138	0,755	3,981	12,499	36,750
	56	79,495	1,2579	6,531	0,735	3,801	11,564	33,351
	91	79,184	1,2629	6,516	0,651	3,380	11,569	33,496
1M2C	7	72,965	1,3705	6,764	0,794	4,474	17,574	55,220
	28	72,519	1,3789	6,528	0,839	4,757	17,460	55,199
	56	72,654	1,3764	7,145	0,778	4,403	17,112	53,998
	91	72,654	1,3764	7,321	0,841	4,759	17,378	54,838

Fonte: Autora (2026).

APÊNDICE B

Tabela B.1 – Análise de variância do efeito do tipo de matriz e idade na resistência à compressão.

Efeito	SQ	GL	MQ	F	p	Resultado
Tipo de matriz	2170,73	2	1085,36	99,79	< 0,000001	S
Idade	725,31	2	362,65	33,34	0,000001	S
Tipo de matriz x Idade	1242,57	4	310,64	28,56	< 0,000001	S
Erro	195,78	18	10,88			
Total	4334,39	26				

SQ: soma dos quadrados; GL: grau de liberdade; MQ: média dos quadrados; F: parâmetro de Fischer; P: nível de significância; S: significativo.

Fonte: Autora (2026).

Tabela B.2 – Grupos homogêneos para a resistência à compressão das matrizes.

Matriz	Idade	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6	Grupo 7
M45	91 dias	x						
1M1C	91 dias	x						
1M2C	91 dias	x						
1M1C	7 dias		x					
1M2C	7 dias		x					
1M1C	28 dias			x				
1M2C	56 dias			x				
M45	56 dias			x				
M45	28 dias				x			
M45	7 dias					x		
1M1C	56 dias						x	
1M2C	28 dias							x

Fonte: Autora (2026).

Tabela B.3 – Análise de variância do efeito do tipo de matriz e do teor de fibras de PP nas propriedades dos compósitos cimentícios engenheirados.

Propriedade	Efeito	SQ	GL	MQ	F	p-valor	Resultado
Teor de ar incorporado	Matriz	184,82	1	184,82	644,17	< 0,000001	S
	Teor PP	3,35	3	1,11	3,87	0,029104	S
	Matriz x Teor PP	6,32	3	2,11	7,35	0,002589	S
	Erro	4,59	16	0,29			
	Total	199,07	23				
Resistência à compressão	Matriz	148,12	1	148,12	29,64	0,000025	S
	Teor PP	260,79	4	65,20	13,05	0,000022	S
	Matriz x Teor PP	112,79	4	28,20	5,64	0,003303	S
	Erro	99,95	20	5,00			
	Total	621,65	29				
Resistência à tração na flexão (3 pontos)	Matriz	0,92	1	0,92	0,69	0,415671	NS
	Teor PP	242,42	4	60,60	45,40	< 0,000001	S
	Matriz x Teor PP	21,42	4	5,35	4,01	0,015079	S
	Erro	26,70	20	1,33			
	Total	291,46	29				
Resistência à tração na flexão (4 pontos)	Matriz	128,13	1,00	128,13	167,26	< 0,000001	S
	Teor PP	191,49	4,00	47,87	62,49	< 0,000001	S
	Matriz x Teor PP	38,13	4,00	9,53	12,44	0,000030	S
	Erro	15,32	20,00	0,77			
	Total	373,08	29				
Deformação	Matriz	1,01	1,00	1,01	16,18	0,000668	S
	Teor PP	1,72	4,00	0,43	6,86	0,001204	S
	Matriz x Teor PP	1,10	4,00	0,28	4,40	0,010294	S
	Erro	1,25	20,00	0,06			
	Total	5,08	29				

SQ: soma dos quadrados; GL: grau de liberdade; MQ: média dos quadrados; F: parâmetro de Fischer; P: nível de significância; S: significativo.

Fonte: Autora (2026).

Tabela B.4 – Grupos homogêneos para o teor de ar incorporado dos compósitos.

Mistura	Teor de PP	Tipo de matriz	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
M45_2,0A_0,0P	0,0	M45	x		
M45_1,5A_0,5P	0,5	M45	x		
M45_1,0A_1,0P	1,0	M45	x		
M45_0,5A_1,5P	1,5	M45	x		
M45_0,0A_2,0P	2,0	M45	x		
1M2C_2,0A_0,0P	0,0	1M2C		x	
1M2C_0,0A_2,0P	2,0	1M2C		x	
1M2C_1,5A_0,5P	0,5	1M2C			x
1M2C_1,0A_1,0P	1,0	1M2C			x
1M2C_0,5A_1,5P	1,5	1M2C			x

Fonte: Autora (2026).

Tabela B.5 – Grupos homogêneos para a resistência à compressão dos compósitos.

Mistura	Teor de PP	Tipo de matriz	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
M45_1,5A_0,5P	0,5	M45	x		
M45_1,0A_1,0P	1,0	M45	x		
M45_0,5A_1,5P	1,5	M45	x		
1M2C_1,0A_1,0P	1,0	1M2C	x		
M45_0,0A_2,0P	2,0	M45		x	
M45_2,0A_0,0P	0,0	M45			x
1M2C_2,0A_0,0P	0,0	1M2C			x
1M2C_1,5A_0,5P	0,5	1M2C			x
1M2C_1,0A_1,0P	1,0	1M2C			x
1M2C_0,5A_1,5P	1,5	1M2C			x
1M2C_0,0A_2,0P	2,0	1M2C			x

Tabela: Autora (2026).

Tabela B.6 – Grupos homogêneos para a resistência à tração na flexão à três pontos dos compósitos.

Mistura	Teor de PP	Tipo de matriz	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
M45_1,0A_1,0P	1,0	M45	x		
M45_0,5A_1,5P	1,5	M45	x		
M45_0,0A_2,0P	2,0	M45	x		
1M2C_1,0A_1,0P	1,0	1M2C	x		
1M2C_0,5A_1,5P	1,5	1M2C	x		
1M2C_0,0A_2,0P	2,0	1M2C	x		
M45_2,0A_0,0P	0,0	M45		x	
M45_1,5A_0,5P	0,5	M45		x	
1M2C_2,0A_0,0P	0,0	1M2C		x	
M45_1,5A_0,5P	0,5	1M2C			x
M45_1,5A_0,5P	0,5	M45			x

Fonte: Autora (2026).

Figura B.7 – Grupos homogêneos para a resistência à tração na flexão à quatro pontos dos compósitos.

Mistura	Teor de PP	Tipo de matriz	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
M45_2,0A_0,0P	0	M45	x		
M45_1,5A_0,5P	0,5	M45	x		
1M2C_2,0A_0,0P	0	1M2C	x		
1M2C_1,5A_0,5P	0,5	1M2C	x		
M45_1,0A_1,0P	1,0	M45		x	
M45_0,5A_1,5P	1,5	M45		x	
M45_0,0A_2,0P	2	M45		x	
1M2C_1,0A_1,0P	1,0	1M2C		x	
1M2C_0,0A_2,0P	2	1M2C		x	
1M2C_0,5A_1,5P	1,5	1M2C			x
M45_0,5A_1,5P	1,5	M45			x

Fonte: Autora (2026).

Figura B.8 – Grupos homogêneos para a deformação dos compósitos.

Mistura	Teor de PP	Tipo de matriz	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
M45_2,0A_0,0P	0	M45	x		
M45_1,5A_0,5P	0,5	M45	x		
M45_1,0A_1,0P	1	M45	x		
M45_0,5A_1,5P	1,5	M45	x		
M45_0,0A_2,0P	2	M45	x		
1M2C_1,5A_0,5P	0,5	1M2C	x		
1M2C_1,0A_1,0P	1	1M2C	x		
1M2C_0,5A_1,5P	1,5	1M2C	x		
1M2C_2,0A_0,0P	0	1M2C		x	
1M2C_0,0A_2,0P	2	1M2C			x

Fonte: Autora (2026).