



Universidade Federal da Paraíba – UFPB

Centro de Tecnologia – CT

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

**EFEITO DE FIBRAS DE SISAL EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS
IMPRESSOS EM 3D SUBMETIDOS A ELEVADAS TEMPERATURAS**

Por

Fernanda Karolline de Medeiros

Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba



Universidade Federal da Paraíba – UFPB

Centro de Tecnologia – CT

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

EFEITO DE FIBRAS DE SISAL EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS IMPRESSOS EM 3D SUBMETIDOS A ELEVADAS TEMPERATURAS

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutora.

Fernanda Karolline de Medeiros

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M488e Medeiros, Fernanda Karolline de.

Efeito de fibras de sisal em compósitos cimentícios impressos em 3D submetidos a elevadas temperaturas / Fernanda Karolline de Medeiros. - João Pessoa, 2025. 113 f. : il.

Orientação: Marcos Alyssandro Soares dos Anjos.
Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Engenharia de materiais. 2. Impressão em concreto. 3. Fibra de sisal. 4. Extrudabilidade. 5. Elevadas temperaturas. 6. Aderência entre camadas. I. Anjos, Marcos Alyssandro Soares dos. II. Título.

UFPB/BC


CDU 620.1(043)

FERNANDA KAROLLINE DE MEDEIROS

**EFEITO DE FIBRAS DE SISAL EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS
IMPRESSOS EM 3D SUBMETIDOS A ELEVADAS TEMPERATURAS**


Tese aprovada em 31/10 /2025 como requisito para a obtenção do título de Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 **MARCOS ALYSSANDRO SOARES DOS ANJOS**
Data: 09/11/2025 19:19:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof^o. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos – IFPB

(Orientador)

Documento assinado digitalmente
 **RICARDO PEIXOTO SUASSUNA DUTRA**
Data: 10/11/2025 11:30:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof^o. Dr. Ricardo Peixoto Suassuna Dutra

(Examinador interno)

Documento assinado digitalmente
 **LIZANDRA FERNANDA ARAÚJO CAMPOS**
Data: 10/11/2025 19:38:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof^a. Dr^a. Lizandra Fernanda Araújo Campos

(Examinadora interna)

Documento assinado digitalmente
 **ALINE FIGUEIREDO DA NOBREGA**
Data: 10/11/2025 11:49:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Aline Figueirêdo da Nóbrega – UFPB

(Examinadora externa ao Programa)

Documento assinado digitalmente
 **ULISSES TARGINO BEZERRA**
Data: 10/11/2025 13:58:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^o. Dr. Ulisses Targino Bezerra – IFPB

(Examinador externo à Instituição)

Dedico esta tese à memória dos meus avós, Silvino e Luiza, e à minha mãe, Lúcia, os quais, com amor, dedicação e incentivo constantes, tornaram possível minha trajetória acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que nos abençoa com a vida, com a luz do sonhar e nos dá amparo e força para realizar.

Sou profundamente grata à minha família, que é minha base, sustentação e força. À minha mãe, Lúcia (mainha), e, em memória, a Silvino e Luiza (meus avós e pais), que me ensinaram os valores da vida e foram fortaleza, amor e cuidado. Eu os amo e continuarei me dedicando para honrar o suor do trabalho duro que tiveram para que chegássemos até aqui.

À minha irmã Joyce, que transformou sua vida para estar comigo nessa etapa, sendo irmã verdadeiramente, tia amorosa e mãe de Luíza quando eu não pude estar. Sem você, nem consigo imaginar como teria sido esse percurso.

Ao meu companheiro de vida, Eudes, que durante esses anos viajou milhares de quilômetros entre Pombal e João Pessoa para estar presente conosco e me apoiar sempre que precisei. À minha filha, Luíza, meu amor e maior motivação.

Aos meus demais familiares, que também foram fundamentais para que eu chegasse até aqui e por quem tenho um carinho e admiração inestimáveis: Tia Heloísa, Gilson, Tio Luciano, Tio Vitório, meu irmão José Carlos, Hirdan, Elis, Tia Luciene e Elza Guedes.

Aos amigos e colegas da pós-graduação, que estiveram ao meu lado nessa caminhada. Agradeço especialmente a Leonardo, grande amigo e companheiro de luta em todos os momentos. Obrigada por ser amparo e por me ajudar tanto com seu conhecimento, você tornou essa experiência mais valiosa e leve. Agradeço também a José Anselmo, pela amizade, disponibilidade e apoio constante.

Agradeço aos meus demais companheiros de labuta: Alanielly e Leonel, minha equipe de fibras; Vinícius, apoio fundamental nas impressões e no artigo; e os bolsistas brilhantes Elias, Emile, Thiago e Gustavo, sempre dispostos a ajudar quando precisei. Tive a bênção de trabalhar com a melhor equipe de pesquisa da Paraíba. Não somos, nem fazemos, nada sozinhos.

Aos técnicos de laboratório, como Américo, Breno e Sebastião, que desempenham seu trabalho com responsabilidade e me apoiaram sempre que precisei.

Aos professores, que são agentes transformadores na jornada de seus alunos. Agradeço especialmente ao meu orientador, Dr. Marcos Alyssandro, que acreditou no meu trabalho e me deu o espaço necessário para o desenvolvimento deste estudo. O tenho como referência de pesquisador, pela capacidade de conduzir pesquisas de qualidade, pela dedicação ao estudo contínuo e pela busca por inovação, mesmo diante das dificuldades.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) pelo apoio à minha capacitação; ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPCEM-UFPB), pela oportunidade; e à CAPES, ao CNPq e à FAPESC, pelo apoio financeiro.

MUITO OBRIGADA!

RESUMO

Compósitos cimentícios impressos em 3D (3DP-CC) apresentam problemas de delaminação e aderência entre camadas quando submetidos à elevadas temperaturas. O objetivo deste estudo é desenvolver compósitos cimentícios para impressão 3D com fibras de sisal (3DP-SFCC) e avaliar experimentalmente o impacto de elevadas temperaturas no comportamento mecânico, físico e microestrutural de espécimes impressos e moldados. Foram, então, produzidos 3DP-SFCC com construtibilidade adequada ao sistema de impressão por extrusão, utilizando fibras de sisal com comprimentos de 6 e 12 mm, nas proporções volumétricas de 0,5 e 1,0 %, em composições contendo fíler calcário e metacaulim. A capacidade de extrusão, as propriedades reológicas e de resistência verde foram avaliadas e as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais foram investigadas antes e após a exposição a 200, 400, 600 e 800 °C. A propagação de calor através dos compósitos impressos foi avaliada por meio de termopares instalados em oito pontos distintos de blocos aquecidos a 400 e 600 °C. A incorporação das fibras de sisal aumentou a resistência verde e reduziu o desempenho mecânico do 3DP-SFCC não aquecido no estado endurecido. Entretanto, em elevadas temperaturas os testes mostraram que as fibras de sisal impedem a perda de aderência entre camadas até 400 °C, enquanto na mesma temperatura a aderência das misturas sem fibras diminuiu ≈ 37 %. As fibras de sisal reduziram significativamente as perdas de resistência à compressão com o aquecimento. Entre a temperatura ambiente e 600 °C, a resistência à compressão reduziu 34 % em REF-C e apenas 0,3 % em SF05%12 na direção Y. Os danos provocados pelo aquecimento foram mitigados, especialmente com a utilização de fibras de 12 mm, e o impacto do aquecimento na anisotropia gerada pelo processo de impressão 3D foi diminuído, reforçando que o 3DP-SFCC apresenta melhor comportamento em ambientes propensos a temperaturas elevadas. A incorporação das fibras de sisal alterou a propagação de calor através dos compósitos impressos, modificando a passagem preferencial do calor da região entre camadas para a região da camada, diminuindo o gradiente térmico através do material e minimizando seus impactos.

PALAVRAS-CHAVE: impressão em concreto; fibra de sisal; extrudabilidade; elevadas temperaturas; aderência entre camadas.

ABSTRACT

When exposed to high temperatures, 3D-printed cementitious composites (3DP-CC) often exhibit delamination and poor interlayer bonding. This study aims to develop a 3D-printable cementitious composite reinforced with sisal fibers (3DP-SFCC) and to experimentally evaluate the impact of elevated temperatures on the mechanical, physical, and microstructural behavior of both printed and cast specimens. The 3DP-SFCC mixtures were developed with appropriate buildability for extrusion-based printing systems, incorporating sisal fibers of 6 mm and 12 mm in length at volumetric contents of 0,5% and 1,0%. The mixes also included limestone filler and metakaolin. Extrudability, rheological properties, and green strength were evaluated, and physical, mechanical, and microstructural properties were assessed before and after exposure to 200, 400, 600, and 800 °C. The heat propagation through the printed composites was evaluated using thermocouples installed at eight different points of blocks heated to 400 and 600 °C. Incorporating sisal fibers improved green strength but reduced the mechanical performance of unheated 3DP-SFCC in the hardened state. However, at high temperatures, tests demonstrated that sisal fibers prevented interlayer adhesion loss up to 400 °C, while fiber-free mixtures showed a ~37% reduction in interlayer adhesion at the same temperature. Sisal fibers significantly reduced the losses in compressive strength with heating. Between room temperature and 600 °C, the compressive strength decreased by 34% in REF-C and by only 0.3% in SF05%12 in the Y direction. The damage caused by heating was mitigated, especially with the use of 12 mm fibers, and the impact of heating on the anisotropy induced by the 3D printing process was reduced, reinforcing that 3DP-SFCC exhibits improved performance in environments prone to elevated temperatures. The incorporation of sisal fibers altered the heat propagation through the printed composites, modifying the preferential heat transfer path from the interlayer region to the intralayer region, thereby reducing the thermal gradient across the material and minimizing its effects.

KEYWORDS: concrete printing; sisal fiber; extrudability; high temperature; adhesion between layers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Microestrutura da célula da fibra de sisal: (a) vista em corte transversal mostrando as células da fibra, lúmens e lamelas médias; (b) ampliação do corte transversal e (c) desenho esquemático mostrando as diferentes camadas de uma célula da fibra individual.....	32
Figura 2 - Processos físico-químicos no concreto de cimento Portland durante o aquecimento.	40
Figura 3 - Etapas da fase experimental.....	42
Figura 4 – Padrões de DRX do cimento (a), metacaulim (b) e filer calcário (c).....	44
Figura 5 – Micrografias do filer calcário (a) e metacaulim (b).	45
Figura 6 - Distribuição granulométrica da areia, cimento Portland, metacaulim e filer calcário.	45
Figura 7 - Fibras de sisal natural e após tratamento alcalino: difração de raios-X (a) e TG/DTG (b).	47
Figura 8 - Fibra de sisal natural (a); micrografias das fibras de sisal: parede lateral da fibra natural (b) e (c); seção transversal da fibra de sisal (d); parede lateral da fibra após tratamento alcalino (e) e (f).	48
Figura 9 - Protocolo desenvolvido para definição e verificação dos requisitos de elementos de construção aditiva com fibras de sisal.	50
Figura 10 - Ilustração do processo de impressão e de retirada das amostras impressas.....	51
Figura 11 - Esquema do aparato para o teste de resistência verde (a) com detalhe da vista superior (b) e do modelo da amostra analisada (c).....	54
Figura 12 - Esquema ilustrando a sequência para análise em elevada temperatura.	55
Figura 13 - Esquema da montagem do ensaio de propagação de calor para blocos 3DP-CC..	58
Figura 14 - Misturas 3DP-SFCC: resultados de espalhamento na mesa de consistência (a) e de profundidade de penetração do cone (b).....	60
Figura 15 - Viscosidade das misturas 3DP-SFCC.....	61
Figura 16 - Capacidade de extrusão das misturas 3DP-SFCC.	62
Figura 17 - Filamentos impressos apresentando a respectiva largura para cada rotação durante o ensaio de avaliação da capacidade de extrusão das misturas 3DP-CC.....	62
Figura 18 - Aspecto visual dos filamentos impressos durante o ensaio de construtibilidade. .	64
Figura 19 - Diagrama tensão-deformação das misturas.	65
Figura 20 - Espécimes após ensaio de resistência à tração na flexão evidenciando o modo de ruptura (a) e o direcionamento das fibras na direção de impressão (b).....	66

Figura 21 - Resistência à flexão de espécimes moldados e impressos não aquecidos.	67
Figura 22 - Alterações observadas nos espécimes de diferentes composições após a exposição à elevadas temperaturas, com imagens de antes da entrada no forno para comparativo (a); Aparência da fibra nos espécimes após 200 °C e 400 °C (b); Indicação de danos nos espécimes da composição REF-C após submissão ao ciclo de 600 °C (c).	68
Figura 23 - Perda de massa de espécimes impressos (a) e moldados (b) expostos a elevadas temperaturas.....	70
Figura 24 - Resistência à compressão de espécimes com diferentes teores de fibras de sisal, expostos a elevadas temperaturas, impressos em 3D nas direções de carregamento X (a), Y (b) e Z (c) e moldados (d).	71
Figura 25 - Razão de anisotropia para resistência à compressão de espécimes impressos com fibras de sisal sob elevadas temperaturas.	74
Figura 26 - Adesão entre camadas: resultados de espécimes impressos em 3D, não aquecidos e submetidos a temperaturas alvo de 400 °C e 600 °C, com diferentes teores de fibras de sisal (a); espécime SF05%6 (b) e SF05%12 após ciclo de 600 °C (c).	76
Figura 27 - Padrões de DRX das matrizes impressas REF-C (a) e REF-LFMK (b) após exposição a diferentes temperaturas.	77
Figura 28 - Imagens de MEV do SF05%12: fibra de sisal na matriz em temperatura ambiente (a), fibra degradada (b) e vazio deixado pela fibra (c) após exposição a 400 °C de temperatura alvo.	78
Figura 29 - Perfis de temperatura nos diferentes pontos avaliados no bloco REF-LFMK durante o ciclo de 400 °C.	79
Figura 30 - Perfis de temperatura nos diferentes pontos avaliados no bloco SF05%12 durante o ciclo de 400 °C.	80
Figura 31 - Perfis de temperatura nos diferentes pontos avaliados no bloco REF-LFMK durante o ciclo de 600 °C.	80
Figura 32 - Perfis de temperatura nos diferentes pontos avaliados no bloco SF05%12 durante o ciclo de 600 °C.	81
Figura 33 - Danos superficiais nos blocos REF-LFMK (a) e SF05%12 (b) após exposição a 600 °C.	82
Figura 34 - Modo de ruptura dos blocos 3DP-CC REF-LFMK (a) e SF05%12 (b) não aquecidos.	83
Figura 35 - Modo de ruptura dos blocos 3DP-CC REF-LFMK (a) e SF05%12 (b) após 400 °C.	84

Figura 36 - Modo de ruptura dos blocos 3DP-CC REF-LFMK (a) e SF05%12 (b) após 600 °C.	84
Figura 37 - Padrão de DRX da amostra do bloco não aquecido SF05%12.....	85
Figura 38 - Padrões de DRX de amostras dos blocos após exposição a 400°C.....	85
Figura 39 - Padrões de DRX de amostras dos blocos após exposição a 600°C.....	86
Figura 40 – Micrografias eletrônicas de varredura do bloco SF05%12 não aquecido.....	87
Figura 41 – Micrografias eletrônicas de varredura do bloco SF05%12 após exposição a 400 °C: (a) ponto interno da parede do bloco e (b) ponto externo da parede do bloco.....	87
Figura 42 - Micrografias eletrônicas de varredura do bloco SF05%12 após exposição a 600 °C: (a) ponto interno e (b) ponto externo.....	88
Figura 43 - Curvas TG e DTA referentes à amostra do bloco não aquecido SF05%12.....	89
Figura 44 - Curvas TG e DTA referentes à amostra coletada no ponto interno do bloco REF- LFMK, após aquecimento a 400 °C.	110
Figura 45 - Curvas TG e DTA referentes à amostra coletada no meio da camada do bloco REF- LFMK, após aquecimento a 400 °C.	110
Figura 46 - Curvas TG e DTA referentes à amostra coletada no ponto externo do bloco REF- LFMK, após aquecimento a 400 °C.	111
Figura 47 - Curvas TG e DTA referentes à amostra coletada no ponto interno do bloco SF05%12, após aquecimento a 400 °C.....	111
Figura 48 - Curvas TG e DTA referentes à amostra coletada no meio da camada do bloco SF05%12, após aquecimento a 400 °C.....	112
Figura 49 - Curvas TG e DTA referentes à amostra coletada no ponto externo do bloco SF05%12, após aquecimento a 400 °C.....	112
Figura 50 - Curvas TG e DTA referentes à amostra coletada no ponto interno do bloco REF- LFMK, após aquecimento a 600 °C.	113
Figura 51 - Curvas TG e DTA referentes à amostra coletada no meio da camada do bloco REF- LFMK, após aquecimento a 600 °C.	113
Figura 52 - Curvas TG e DTA referentes à amostra coletada no ponto externo do bloco REF- LFMK, após aquecimento a 600 °C.	114
Figura 53 - Curvas TG e DTA referentes à amostra coletada no ponto interno do bloco SF05%12, após aquecimento a 600 °C.....	114
Figura 54 - Curvas TG e DTA referentes à amostra coletada no meio da camada do bloco SF05%12, após aquecimento a 600 °C.....	115

Figura 55 - Curvas TG e DTA referentes à amostra coletada no ponto externo do bloco SF05%12, após aquecimento a 600 °C..... 115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais de partida.	42
Tabela 2 - Composição química do pó de cimento Portland, filer calcário e metacaulim.	43
Tabela 3 - Composição das misturas 3DP-SFCC.....	49
Tabela 4 – Quantidade de amostras produzidas para os ensaios no estado endurecido e de propagação de calor.	52
Tabela 5 - Perda de massa dos blocos após elevada temperatura.....	82
Tabela 6 - Resistência à compressão dos blocos após elevada temperatura.	82
Tabela 7 - Temperaturas de ocorrência dos eventos térmicos, perdas de massa associadas e estimativa da fração de portlandita nos blocos REF-LFMK e SF05%12.	90

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
	1.2 OBJETIVOS.....	20
	1.2.1 Objetivo geral.....	20
	1.2.2 Objetivos específicos.....	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
	2.1 IMPRESSÃO 3D DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS	22
	2.2 COMPORTAMENTO DO 3DP-CC NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO	23
	2.2.1 Impacto dos materiais utilizados nas propriedades do 3DP-CC	26
	2.2.2 Incorporação de fibras no 3DP-CC	29
	2.3 3DP-CC SOB ELEVADAS TEMPERATURAS.....	35
	2.3.1 Surgimento e evolução de danos no concreto convencional e no 3DP-CC durante o aquecimento	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
	3.1 MATERIAIS DE PARTIDA.....	42
	3.2 PLANEJAMENTO E PREPARAÇÃO DAS MISTURAS	49
	3.3 PROCEDIMENTO DE IMPRESSÃO E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	50
	3.4 ENSAIOS DAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO.....	52
	3.4.1 Consistência, capacidade de extrusão de construção das misturas 3DP-CC	52
	3.4.2 Resistência verde.....	53
	3.5 ENSAIOS DAS PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO.....	54
	3.5.1 Aquecimento das amostras para avaliação.....	54
	3.5.2 Resistência à tração na flexão e à compressão	55
	3.5.3 Aderência entre camadas.....	56
	3.5.4 DRX e MEV das amostras submetidas ao aquecimento	57
	3.6 TESTE DE AVALIAÇÃO DE PROPAGAÇÃO DE CALOR NO 3DP-CC.....	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
	4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES FORMULADAS	60
	4.1.1 Análise de consistência, extrudabilidade e construtibilidade.....	60
	4.1.2 Resistência verde.....	65

4.2 CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO E SOB ELEVADAS TEMPERATURAS	66
4.2.1 Resistência à tração na flexão	66
4.2.2 Danos superficiais e perda de massa do 3DP-CC após aquecimento	67
4.2.3 Resistência à compressão	70
4.2.4 Aderência entre camadas.....	75
4.2.5 DRX e MEV das amostras submetidas ao aquecimento.....	77
4.3 ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DE CALOR E SEUS IMPACTOS NO 3DP-CC	79
4.3.1 Evolução temporal de perfis de temperatura detalhados.....	79
4.3.2 Modos de falha e perda de massa do 3DP-CC	81
4.3.3 Resistência à compressão	82
4.3.4 DRX e MEV dos blocos após a propagação de calor	84
4.3.5 Análise térmica das amostras	88
5 CONCLUSÕES	92
REFERÊNCIAS	94
APÊNDICE	110

1 INTRODUÇÃO

O concreto de impressão 3D (3DCP) é produzido através de uma técnica de fabricação automatizada que produz estruturas camada por camada usando materiais cimentícios (Alchaar; Al-Tamimi, 2021; Sun *et al.*, 2023). Em comparação com o concreto convencional, o 3DCP traz benefícios para o trabalhador, como maior segurança e a diminuição de tarefas fisicamente desgastantes (Mechtcherine *et al.*, 2019), e benefícios para o setor da construção, como a redução do consumo de materiais e a construção de estruturas de concreto complexas e delgadas, sem o uso de fôrmas convencionais (Cicione *et al.*, 2021; De Schutter *et al.*, 2018), além da diminuição da poluição ambiental (Sun *et al.*, 2023) e do tempo de construção (Ahmed; Askandar; Jumaa, 2022).

Diferentemente dos concretos tradicionais, em que o material fresco é lançado em uma fôrma e assume a forma do molde sob efeito da gravidade, o material utilizado para impressão 3D de concreto deve possuir características reológicas específicas para permitir a construção sem fôrmas. Para tanto, é necessário que o material atinja um equilíbrio entre a fluidez exigida durante a extrusão e a capacidade de estruturação imediatamente após a deposição, possibilitando que as camadas suportem tanto seu próprio peso quanto o de camadas subsequentes (Le *et al.*, 2012; Luo; Li; Wang, 2024; Marchon *et al.*, 2018; Roussel, 2018).

É importante observar que o concreto impresso em 3D se comporta de forma diferente do concreto convencional moldado, devido às diferenças inerentes em seus respectivos processos construtivos, de modo que são necessários cuidados especiais, como manter filamentos impressos com superfície livre de defeitos, mistura com extrudabilidade e tempo em aberto adequados (Alchaar; Al-Tamimi, 2021; Hou *et al.*, 2021). Os procedimentos atuais de projeto estrutural e de durabilidade consideram o concreto como um material homogêneo (De Schutter *et al.*, 2018) e o concreto impresso possui comportamento anisotrópico (Sun *et al.*, 2023), com interfaces entre as camadas, que são mais fracas e porosas que os filamentos (Arunothayan; Sanjayan, 2023; Ma *et al.*, 2024). É importante, assim, que sejam realizados estudos aprofundados de suas propriedades mecânicas, inclusive quando submetidos a alta temperatura.

É sabido que o concreto tem bom desempenho sob alta temperatura, pois é incombustível e tem baixa condutividade térmica em relação a outros materiais de construção como a madeira e o aço (Arunothayan; Sanjayan, 2023; Khoury, 2000). Seu comportamento sob elevadas temperaturas já foi amplamente avaliado em pesquisas anteriores (Ma *et al.*, 2015;

Malik; Bhattacharyya; Barai, 2021; Novak; Kohoutkova, 2018; Schneider, 1988; Vafaei *et al.*, 2022). Ao ser aquecido a temperaturas superiores a 800 °C, o concreto de cimento Portland sofre várias transformações físico-químicas: liberação de água livre e quimicamente combinada, decomposição dos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), desidratação da portlandita e decomposição das fases carbonatadas. Como resultado, pode acontecer redução da resistência à tração e à compressão, fissuração, perda da ligação entre os agregados e a pasta de cimento, deterioração da pasta de cimento endurecido e, em alguns casos, fragmentação (Ma *et al.*, 2015; Malik; Bhattacharyya; Barai, 2021).

Já o desempenho do compósito cimentício impresso em 3D (3DP-CC) em condições de elevada temperatura (normalmente avaliado de 200 a 800 °C) tem sido explorado mais recentemente (Alchaar; Al-Tamimi, 2021; Arunothayan; Sanjayan, 2023; Dong *et al.*, 2024; Şahin *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2022; Xiao *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2025) e os resultados indicam que a formação de camadas distintas durante o processo de impressão resulta em propriedades mecânicas mais complexas e em características mecanicamente anisotrópicas, que modificam o comportamento termomecânico do 3DP-CC quando comparado com concreto convencional (Xiao *et al.*, 2021a).

Além das alterações físicas e químicas sofridas pelo concreto convencional, a elevação da temperatura no 3DP-CC aumenta a quantidade e o tamanho dos poros, principalmente na região entre camadas, o que leva ao enfraquecimento estrutural, pois cria caminhos para a iniciação e propagação de trincas. Há, então, redução na resistência à compressão e à flexão, além do comprometimento significativo da aderência entre as camadas (Zhou *et al.*, 2025). Conseqüentemente, o 3DP-CC sofre delaminação em alta temperatura em vez da falha de fragmentação sofrida pelo concreto convencional (Arunothayan; Sanjayan, 2023; Xiao *et al.*, 2021).

Ainda é necessário entender como o processo de impressão 3D influencia a resistência de amostras 3DP-CC, com preocupação especial no comportamento da ligação intercamada durante o aquecimento (Cicione *et al.*, 2021). Para Dong *et al.* (2024), investigar o comportamento de concretos impressos em 3D após a exposição a temperaturas elevadas é de grande importância no projeto de estruturas de edifícios mais seguras e confiáveis, além de garantir a operação segura de edifícios em situações extremas, como incêndios.

Sabe-se que a elevação da temperatura do concreto tende a causar a evaporação da água dos poros e que a água aprisionada no poro fechado pode ocasionar aumento de pressão e resultar em fragmentação quando a pressão interna excede a resistência à tração do concreto (Xiao *et al.*, 2021a). Muitas vezes, o aumento da capacidade estrutural do concreto é alcançado reduzindo a porosidade e melhorando o empacotamento de partículas entre os componentes do concreto, o que pode levar a um comportamento de alta transferência de calor, causando o baixo desempenho térmico dos edifícios (Ramakrishnan *et al.*, 2021). Adicionalmente, no 3DP-CC, regiões aderentes inadequadas têm grande efeito na durabilidade do concreto e o auto-equilíbrio de "tensões térmicas" através da sua estrutura lamelar pode aumentar a possibilidade de delaminação da camada durante a exposição ao fogo ou altas temperaturas (Cicione *et al.*, 2021).

Estudos (Cicione *et al.*, 2021; Kruger *et al.*, 2020; Xiao *et al.*, 2021a) indicam que o desempenho estrutural ao fogo do 3DP-CC diminui devido a defeitos intercamadas, enquanto os efeitos de tração do estresse térmico causam delaminação das camadas em altas temperaturas. Cicione *et al.* (2021) produziram amostras de 3DP-CC e concreto moldado convencionalmente e realizaram testes expondo as amostras a um alto fluxo de calor incidente por meio de painéis radiantes. Todas as amostras 3DP-CC racharam ao longo das camadas intermediárias e delaminaram entre as camadas quando uma força leve foi aplicada manualmente. Os resultados de tomografia computadorizada mostraram que as amostras 3DP-CC têm maior porosidade, que potencializa o enfraquecimento entre as camadas quando em conjunto com as tensões internas devido ao gradiente térmico. Zhou *et al.* (2025) investigaram as mudanças mecânicas e microestruturais que ocorrem nas camadas intermediárias do 3DP-CC quando submetidas a altas temperaturas, que variaram de 200 a 800 °C. Quando as temperaturas excedem 400 °C, a expansão térmica diferencial e a quebra progressiva de Ca(OH)_2 causaram um crescimento substancial de trincas, com um aumento acentuado nas microfissuras. Acima de 600 °C, a decomposição completa de Ca(OH)_2 e CaCO_3 resultou em grandes fissuras interconectadas, deixando o material altamente poroso. Com o aumento da temperatura e da duração da exposição, a resistência de união entre as camadas intermediárias do 3DP-CC diminuiu drasticamente, apresentando queda de mais de 90 % a 800 °C, que indica uma perda substancial na integridade estrutural do 3DP-CC e quando sob ação do fogo. Desse modo, há evidências de que os efeitos da alta temperatura no 3DP-CC são prejudiciais, principalmente devido ao enfraquecimento da união entre as camadas. A fragilidade nessa

região, associada ao aumento da porosidade, pode ser intensificada pelas tensões internas geradas quando exposto a gradientes térmicos.

Desse modo, o presente estudo utiliza fibras de sisal (FS) com base na hipótese de que elas podem mitigar o impacto da elevada temperatura nas propriedades mecânicas e microestruturais do 3DP-CC. Além de apresentar excelentes propriedades mecânicas, ao se decompor em temperaturas relativamente baixas, as fibras de sisal possuem comportamento semelhante ao das fibras sintéticas poliméricas, podendo influenciar na redução dos danos causados pela exposição a altas temperaturas no 3DP-CC. Além disso, o uso de FS está alinhado com a economia circular do Brasil, um dos principais produtores mundiais desse material (Ferraz-Almeida *et al.*, 2025), com preços competitivos (0,62 – 0,82 USD/kg) (CONAB, 2025), em comparação às fibras de polipropileno (1,00 – 2,00 USD/kg) e de aço (0,80 – 1,50 USD/kg) (Jabbour; Assaad; Hamad, 2021).

O objetivo e novidade deste estudo é, então, desenvolver compósitos cimentícios para impressão 3D com fibras de sisal (3DP-SFCC) e avaliar experimentalmente o impacto de elevadas temperaturas em seu comportamento mecânico, físico e microestrutural.

Portanto, diante do crescimento da tecnologia de impressão 3D na indústria da construção, compreender o comportamento das fibras de sisal em misturas cimentícias para impressão 3D, especialmente quando submetidas a altas temperaturas, preenche uma lacuna importante de pesquisa e pode estimular o uso de fibras naturais no setor. Além disso, a redução do consumo de cimento através de sua substituição parcial por fíler e metacaulim pode melhorar as propriedades das misturas para impressão e contribuir com a sustentabilidade da indústria de construção aditiva.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver compósitos cimentícios para impressão 3D com fibras de sisal e avaliar o impacto de elevadas temperaturas em seu comportamento mecânico, físico e microestrutural.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- (i) Analisar os parâmetros reológicos, a extrudabilidade, a construtibilidade e a resistência verde de misturas com baixo teor de cimento e incorporação de fibras de sisal;
- (ii) Avaliar o desempenho da incorporação das fibras de sisal na redução de danos em peças de compósitos cimentícios impressos em 3D expostas a altas temperaturas (200 a 800 °C);
- (iii) Avaliar o impacto do teor de incorporação de fibras de sisal e da temperatura na resistência à compressão simples e na aderência entre camadas das amostras de 3DP-CC;
- (iv) Analisar as alterações microestruturais no compósito impresso em 3D em resposta à exposição térmica; e
- (v) Avaliar a transferência de calor através da parede de blocos cimentícios impressos em 3D.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 IMPRESSÃO 3D DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

No século XXI, o advento da denominada Indústria 4.0 permitiu avanços científicos e tecnológicos significativos ao combinar tecnologias físicas e digitais, como robótica, manufatura aditiva, inteligência artificial, materiais avançados, computação de alto desempenho, tecnologias cognitivas e realidade aumentada para criar sistemas inteligentes de manufatura (Haleem; Javaid, 2019). Esta iniciativa também foi adaptada à indústria da construção e chama-se Construção 4.0. Um pilar fundamental da Construção 4.0 é a manufatura aditiva, definida pela ISO/ASTM 52939 (2023) como o "processo de unir materiais para formar elementos/componentes e sistemas estruturais e não estruturais a partir de dados de modelos 3D, geralmente por meio da deposição de material camada por camada, em contraste com as metodologias de manufatura subtrativa e formativa".

Dentro da manufatura aditiva, a impressão 3D de compósitos cimentícios (3DP-CC) tem mostrado seu potencial como uma tecnologia inovadora na indústria da construção e vem modificando a forma como as construções são executadas, permitindo a produção de geometrias complexas e estruturas personalizadas e avançando na realização de vários projetos inovadores em áreas-chave como habitação a preços acessíveis, edifícios, pontes, elementos de infraestrutura, mobiliário urbano e recifes de corais artificiais (Dilawar Riaz *et al.*, 2023; Zat *et al.*, 2025; Pham; Huang, 2024).

A terminologia utilizada na literatura da impressão 3D de materiais cimentícios revela uma clara inconsistência que dificulta a comparação sistemática entre estudos. Muitos autores utilizam o termo 3D printed concrete (3DPC) (Muhammad Salman *et al.*, 2021; Ahmed *et al.* 2022; Dilawar Riaz *et al.*, 2023) para designar misturas que, na prática, têm características de argamassa. Outros trabalhos preferem termos como “cement-based materials for 3D printing” (Zhang *et al.*, 2025; Luo; Li; Wang, 2024) ou “3D printable mortar” (Pradeep; Ramaswamy, 2025), reconhecendo que a mistura é fundamentalmente diferente de um concreto convencional. Essa falta de padronização dificulta a comparabilidade entre estudos e o avanço consistente dos resultados. O presente estudo priorizou utilizar o termo “compósitos cimentícios para impressão 3D”, entendendo que reflete melhor o material avaliado.

A tecnologia de impressão 3D de concreto produz estruturas de concreto por meio de um processo de manufatura aditiva, em que um *software* controla uma cabeça de impressão que extruda o material e se movimenta de forma determinada para construir o projeto final por

deposição de material (Liu *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2023). O processo apresenta alta precisão e consegue aumentar a liberdade de projeto, dispensar o uso de fôrmas, reduzir o desperdício de material, o tempo e o custo das construções e minimizar a pegada de carbono associada aos métodos tradicionais de construção, o que evidencia seu potencial significativo para aumentar a sustentabilidade na indústria da construção (Dilawar Riaz *et al.*, 2023; Hou *et al.*, 2021; Siddika *et al.*, 2020).

Para De Schutter *et al.* (2018), a redução do tempo e a melhoria da qualidade e do custo de construção pela integração de atividades digitais de projeto e construção podem aumentar significativamente a produtividade do setor, principalmente na construção de estruturas complexas. Adicionalmente, a dispensa do uso de fôrmas pode levar a uma redução substancial de custos do 3DP-CC, uma vez que o uso de fôrmas eleva o tempo de construção e leva a altos custos de material, mão de obra e maquinário, principalmente no caso de construção de peças únicas ou estruturas complexas. O material usado no 3DP-CC também deve modificar os custos da construção, pois ao mesmo tempo em que há necessidade de adições e aditivos de maior custo, há redução na produção de resíduos em relação ao processo de construção convencional.

Há, portanto, um potencial para transformar o setor da construção civil, ao viabilizar o desenvolvimento flexível de estruturas complexas em prazos reduzidos, contribuindo para a otimização dos custos totais do projeto (Ahmed; Askandar; Jumaa, 2022; Dilawar Riaz *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2019).

2.2 COMPORTAMENTO DO 3DP-CC NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

Um dos maiores desafios na criação de materiais à base de cimento imprimíveis em 3D é projetá-los para que tenham as propriedades no estado fresco corretas para impressão por extrusão. Ao contrário do concreto moldado, em que a fôrma fornece estabilidade dimensional durante o processo de impressão, a ausência de fôrma na impressão 3D exige projetos de mistura para concreto imprimível avaliados e desenvolvidos criteriosamente (Thajeel; Balázs, 2025; Zhang *et al.*, 2021). As misturas para impressão 3D devem atender a requisitos mais rigorosos para alcançar bombeamento, extrudabilidade e capacidade de construção (Mohamed; Mishra; Isam, 2025).

O sucesso da impressão de concreto depende do bom equilíbrio entre extrudabilidade, capacidade de impressão, ligação entre camadas, tixotropia e capacidade de construção, propriedades que determinam o fluxo e a forma do concreto, a estabilidade da estrutura e a facilidade de construção (Dilawar Riaz *et al.*, 2023; Hou *et al.*, 2021). A capacidade de

impressão do concreto é determinada por parâmetros como abatimento, espalhamento e resistência à penetração. Esses parâmetros estão relacionados ao desempenho reológico do concreto fresco, especificamente à viscosidade plástica, à tensão de escoamento, à tixotropia e ao tempo aberto (Paritala *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2021).

Segundo Bao *et al.* (2024), para avaliar com precisão as propriedades no estado fresco de compósitos cimentícios destinados à impressão 3D e compreender parâmetros como extrudabilidade, bombeamento e capacidade de construção, é imprescindível a realização de medições reológicas precisas, em especial de viscosidade.

A redução da viscosidade, resultante da ruptura da estrutura interna sob cisalhamento, favorece o bombeamento e a extrusão, enquanto o aumento da viscosidade em repouso, decorrente da reorganização estrutural interna, é essencial para a capacidade de construção e a estabilidade das camadas depositadas. Para ajustar esse equilíbrio reológico, modificadores de viscosidade, como a hidroxipropilmetilcelulose (HPMC), são amplamente utilizados em compósitos cimentícios impressos em 3D, pois intensificam esse comportamento tixotrópico (Zhang *et al.*, 2024).

A extrudabilidade pode ser relacionada ao consumo de energia da extrusora (Nerella *et al.*, 2019) ou à qualidade da impressão e continuidade do filamento (Chen *et al.*, 2022), sendo esta uma abordagem que torna a extrusão do concreto uma propriedade mais ampla. Kazemian *et al.* (2017) avaliaram a qualidade da impressão a partir da ausência de defeitos de superfície, visibilidade da borda da camada impressa e conformidade dimensional.

Andrew Ting *et al.* (2022) consideraram que a extrudabilidade é baseada na capacidade do material de ser extrudado do bico sem apresentar rachaduras e defeitos. Neste caso, os autores determinaram a extrudabilidade pelo número médio de defeitos presentes na superfície dos filamentos impressos, de modo que quanto maior a intensidade dos defeitos superficiais, menor será a extrudabilidade da mistura. Desse modo, defeitos na superfície de um objeto de concreto impresso em 3D podem indicar problemas com o processo de extrusão e a qualidade do produto acabado.

A capacidade de construção é a propriedade do material depositado de manter sua forma sob carga subsequente. É uma característica que depende das propriedades individuais do material e dos parâmetros de construção (Dilawar Riaz *et al.*, 2023). A dependência das propriedades do material está relacionada à sua capacidade de ao sair do bico, recuperar sua tensão de escoamento e viscosidade inicial quando a camada subsequente está prestes a ser

retida sobre ele (Zhang *et al.*, 2021). Já os parâmetros de impressão, ou seja, a geometria e o comprimento do caminho de impressão/bico (forma do objeto projetado para impressão), variáveis do bico (forma, dimensão e direção do fluxo), os intervalos de tempo entre duas camadas subsequentes, distâncias de afastamento do bico e velocidades de impressão, podem influenciar significativamente a avaliação da capacidade de construção (Chen *et al.*, 2022).

Assim, a extrudabilidade se refere à capacidade de extrusão do material moldado como filamento, enquanto a capacidade de construção diz respeito à sua habilidade de manter uma forma estável e resistência suficiente para garantir a integridade de toda a estrutura (Wang *et al.*, 2024). Portanto, para alcançar ambas as propriedades, é necessário obter um material que tenha flexibilidade suficiente para ser extrudado e, simultaneamente, rigidez adequada para suportar as cargas durante a aplicação. Desse modo, para viabilizar a construção de estruturas por meio de impressão 3D sem colapso das camadas e alterações no fluxo durante o processo, é imprescindível caracterizar detalhadamente as misturas no estado fresco (Chang *et al.*, 2023).

Assim como no concreto convencional, as características do concreto fresco no 3DP-CC têm grande efeito no desempenho mecânico das peças. Desse modo, o material, os caminhos e os parâmetros de impressão também podem interferir nas propriedades do 3DP-CC no estado endurecido.

A integridade estrutural e a durabilidade dos componentes impressos em 3D apresentam desafios. O processo de impressão em camadas pode causar pontos fracos e inconsistências no material, indicando a necessidade de pesquisas adicionais para aprimorar o desempenho desses componentes (Tabassum; Ahmad Mir, 2023).

A microestrutura formada entre camadas ou tiras, juntamente com os parâmetros da impressão 3D — como o tempo de intervalo entre camadas, a altura e a velocidade de deslocamento do cabeçote — influenciam de maneira distinta as resistências à compressão e à tração do concreto impresso em 3D, dependendo da direção do carregamento. Essa variação de comportamento, conforme mudança de direção, é conhecida como anisotropia (Hou *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2023). A anisotropia nos sistemas 3DCP surge dos vazios entre os filamentos em camadas e da qualidade de ligação entre camadas. Como o processo de impressão 3D não envolve vibração para expelir vazios indesejáveis, há a formação de uma microestrutura complexa com várias formas, tamanhos e distribuição de vazios intercamadas (Mohamed; Mishra; Isam, 2025).

A presença de interfaces entre as camadas influencia a resistência à compressão não apenas devido à resistência da matriz, mas também pela aderência entre as camadas (Zhang *et al.*, 2021). A estrutura em lâminas do 3DP-CC favorece a formação de defeitos nessas interfaces, reduzindo a resistência de ligação e, conseqüentemente, comprometendo as propriedades mecânicas e a durabilidade do material (Hou *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2023). De acordo com Ahmed, Askandar e Jumaa (2022), esses são desafios que representam questões significativas a serem superadas.

Uma solução que vem sendo utilizada para melhorar as propriedades mecânicas e a durabilidade dos elementos impressos é a incorporação de fibras de reforço nas misturas de impressão 3D (Mohamed; Mishra; Isam, 2025). Nesse caso, a incorporação de fibras pode ajudar a resolver o desafio de incorporar reforços convencionais no processo de impressão camada por camada. Esses desafios ressaltam a necessidade de desenvolver misturas de concreto otimizadas e novas técnicas de reforço que conduzam às características únicas da impressão 3D para garantir a integridade estrutural e a viabilidade das estruturas impressas em 3D (Xiao *et al.*, 2021b). Por isso, é essencial avaliar tanto os parâmetros de impressão quanto os materiais das misturas e seu impacto nas propriedades do 3DP-CC.

2.2.1 Impacto dos materiais utilizados nas propriedades do 3DP-CC

Dada a crescente ênfase no desenvolvimento sustentável e na proteção ambiental de baixo carbono na indústria global da construção, a pesquisa contemporânea tem focado no desenvolvimento de novos materiais de construção ecológicos (Shehata *et al.*, 2022).

Dentre os diversos materiais empregados na impressão 3D, os materiais cimentícios têm se destacado por suas elevadas propriedades mecânicas e durabilidade (Zat *et al.*, 2025). O teor de cimento utilizado na impressão 3D de concreto é maior do que na construção convencional de concreto, o que pode comprometer a redução do impacto ambiental causado pela redução de desperdício de materiais e pela eliminação das fôrmas (Bhattacharjee *et al.*, 2021; Dilawar Riaz *et al.*, 2023).

Habibi *et al.* (2024) identificaram quatro abordagens aplicadas para mitigar as preocupações com a sustentabilidade no 3DP-CC: reduzir o carbono incorporado, reduzir o consumo de matéria-prima, aumentar a durabilidade e otimizar o desempenho térmico e energético.

Como o cimento é o componente com os maiores impactos ambientais utilizado no 3DP-CC, uma das estratégias utilizadas para redução do seu consumo é a utilização de materiais

cimentícios suplementares (MCSs) nas misturas. O uso dos MCSs não apenas pode reduzir o impacto ambiental do 3DP-CC, mas também pode modificar as propriedades do concreto fresco para atender aos requisitos de impressão (Wang *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2023).

Combinações otimizadas de argilas calcinadas com calcário moído têm sido utilizadas como alternativas para diminuir o teor de CO₂ emitido na produção de cimento. Tais combinações representam uma fonte de MCS relativamente barata, amplamente disponível e capazes de evitar até 400 milhões de toneladas de emissões anuais de CO₂ quando utilizado um nível de substituição de 40 % do clínquer, por exemplo (Scrivener; John; Gartner, 2018).

Para Chen *et al.* (2022), a ideia inicial de usar esses MCSs em misturas imprimíveis é melhorar a densidade de empacotamento, a coesão e a consistência do fluxo. Dentro desse contexto, os ligantes de argila calcinada, como o metacaulim (MK), são uma alternativa sustentável promissora devido à sua disponibilidade e contribuição na elevação da viscosidade plástica, tensão de escoamento e aprimoramento da taxa de estruturação (Chen *et al.*, 2022; Paritala *et al.*, 2023; Rocha; Toledo Filho, 2024).

O metacaulim é um material pozolânico composto por um aluminossilicato anidro pouco cristalizado produzido pela calcinação do caulim, uma argila natural que contém basicamente caulinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄) e, dependendo do depósito, outros minerais como quartzo, rutilo etc. (Moulin; Blanc; Sorrentino, 2001). A calcinação ocorre em temperaturas moderadas (650–800 °C). O metacaulim produzido tem um tamanho de partícula geralmente inferior a 5 µm e é composto, principalmente, por SiO₂ e Al₂O₃ em uma forma ativa que reagirá com o hidróxido de cálcio (CH) (Li; Sun; Li, 2010; Sabir; Wild; Bai, 2001).

Os resultados obtidos por Moulin, Blanc e Sorrentino (2001) evidenciaram que a presença de MK aumenta significativamente a tensão de escoamento quando comparado aos cimentos de referência puros, o que confirmou que cimentos misturados com MK têm alta demanda de água e comportamento tixotrópico. O efeito do MK nas propriedades reológicas das pastas pode ser atribuído principalmente à elevada área superficial do MK e à sua atividade pozolânica, que aumenta a demanda de água e diminui a trabalhabilidade das pastas (Rocha; Toledo Filho, 2024; Sabir; Wild; Bai, 2001).

O metacaulim influencia muito a estrutura dos poros em pastas e argamassas, e produz um refinamento substancial dos poros. Isso provoca redução significativa da permeabilidade e difusão de íons nocivos que levam à degradação da matriz. Para os autores, a principal reação

cimentícia é facilitada pela dissolução da sílica vítrea/amorfa, produzindo sílica em solução na água dos poros que, então, reage com o CH para formar o C-S-H gel. A alumina também se dissolve no ambiente de alto pH. Uma pequena quantidade é incorporada ao C-S-H gel, mas a maior parte reage para formar fases de aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) e silicoaluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H), que também podem auxiliar no processo de cimentação e contribuir para a resistência mecânica.

Já a adição de calcário pode contribuir com a fluidez da mistura, auxiliando na extrudabilidade e bombeabilidade e pode influenciar no efeito filler à medida que ajuda na diluição do cimento e no aumento dos sítios de nucleação proporcionados pela superfície do calcário (Chen *et al.*, 2022).

Jia *et al.* (2024a) avaliaram diferentes teores e finuras de filler calcário (LF) como substituição parcial do cimento para produzir concreto de ultra-alto desempenho impresso em 3D. O aumento do teor de LF resultou na diminuição da tensão de escoamento estática/dinâmica do concreto produzido, o que provocou um aumento na extrudabilidade das misturas. O aumento do teor de LF contribuiu para a melhoria da compactação das partículas e a incorporação de 10% aumentou ligeiramente a resistência à flexão das peças impressas. Entretanto, com incorporação acima de 20%, houve um declínio significativo na capacidade de construção das misturas, o que provocou um aumento de poros e defeitos nas amostras impressas e consequente queda nas propriedades mecânicas dos concretos impressos de ultra-alto desempenho produzidos.

Além das adições de MCSs, diferentes aditivos são necessários para melhorar as propriedades do 3DP-CC durante diferentes processos de impressão. O superplastificante é quase aplicado em todas as misturas de 3DCP por melhorar a capacidade de extrusão através da redução da tensão de escoamento e da viscosidade plástica do concreto devido ao efeito de dispersão das partículas do aglutinante (Hou *et al.*, 2021).

O agente modificador de viscosidade é frequentemente usado no 3DP-CC para aumentar a viscosidade e a coesão da mistura e melhorar a capacidade de retenção de forma após a extrusão. Agentes espessantes, como hidroxipropilmetilcelulose (HPMC), aumentam a tensão de escoamento e a consistência de fluxo (Hou *et al.*, 2021; Paritala *et al.*, 2023).

Xiao *et al.* (2023) utilizaram HPMC no processo de mistura e obtiveram um ajuste reológico significativo, transformando um material inicialmente com baixa tensão de escoamento e baixa viscosidade plástica em outro com alta tensão de escoamento e viscosidade

plástica moderada. Os autores atribuíram esse comportamento à capacidade do HPMC de absorver parte da água livre presente na argamassa fresca, o que aumenta o atrito entre as partículas e, conseqüentemente, eleva a tensão de escoamento. Paralelamente, o efeito espessante do HPMC eleva a viscosidade da água livre, contribuindo diretamente para o aumento da viscosidade global da mistura.

Zhu *et al.* (2025) avaliaram a influência do teor de HPMC nas propriedades reológicas e na printabilidade do concreto de areia manufaturada para impressão 3D. Os resultados indicaram que a adição de HPMC elevou a tensão de escoamento estática, a viscosidade plástica e a tixotropia. Esse comportamento foi atribuído ao fortalecimento da rede de partículas, favorecendo a recuperação estrutural interna da pasta e, conseqüentemente, melhorando a capacidade de construção do material.

O uso de fibras também pode fornecer resistência adicional à deformação no estado fresco e contribuir para a melhoria da capacidade de construção do material. Por isso, as fibras também tem sido utilizadas com frequência nas misturas cimentícias para impressão 3D (Alves Fidelis *et al.*, 2013; Boddepalli; Gandhi; Panda, 2024; Ding *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2022; Ma *et al.*, 2022a, 2024; Şahin *et al.*, 2025; Teixeira *et al.*, 2019; Tran; Cu; Le, 2021; Xiao *et al.*, 2021a; Zhou; Zhang; Ma, 2024). Dilawar Riaz *et al.* (2023) destacam que a combinação de cimento, materiais cimentícios suplementares e fibras no projeto de mistura do concreto pode aprimorar significativamente sua extrudabilidade, bombeabilidade e capacidade de edificação. Segundo os autores, o cimento confere a resistência necessária para suportar as pressões e temperaturas geradas durante a impressão 3D, enquanto os materiais cimentícios suplementares melhoram a trabalhabilidade e a bombeabilidade e as fibras contribuem com o aumento da capacidade de construção das misturas.

2.2.2 Incorporação de fibras no 3DP-CC

Considerando que o concreto impresso em 3D apresenta modos de falha frágeis, a incorporação de armaduras surge como uma estratégia eficiente para aprimorar seu desempenho estrutural. Além disso, a inserção contínua de reforço no 3DCP é dificultada pelo próprio processo construtivo em camadas (Hou *et al.*, 2021; Warsi; Panda; Biswas, 2023). Nesse contexto, o uso de fibras tem se destacado como uma alternativa promissora para o avanço da tecnologia de impressão 3D de concreto. Além da possibilidade de redução da necessidade de armaduras convencionais de aço, o reforço por fibras pode contribuir para mitigar fissuras de retração e aumentar a capacidade de carga e a deformabilidade das estruturas impressas (Xia *et al.*, 2025).

Geralmente, as fibras são incorporadas ao concreto durante a etapa de preparação do material imprimível, na fase de mistura das matérias-primas, garantindo sua dispersão homogênea em arranjo tridimensional ao longo de todo o volume do material (Warsi; Panda; Biswas, 2023). Entretanto, alguns estudos (Hambach; Volkmer, 2017; Luo; Li; Wang, 2024; Ma *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2023) evidenciam que durante o processo de extrusão, a passagem do compósito pelo bico de extrusão provoca um alinhamento das fibras ao longo do caminho de impressão. Esse direcionamento pode contribuir significativamente para a resistência quando expostas a tensões de tração paralelas aos filamentos (Ma *et al.*, 2019). Luo, Li e Wang (2024) detectaram que a fibra limita a propagação de trincas e a deformação da amostra e que seu arranjo direcional pode melhorar o desempenho de flexão. Por outro lado, o alinhamento das fibras pode, também, aumentar a anisotropia das amostras impressas (Luo; Li; Wang, 2024; Ma *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2023), o que não é um resultado desejado.

A incorporação de fibras também influencia significativamente as propriedades do 3DP-CC no estado fresco. Há evidências de redução da fluidez do concreto e da extrudabilidade, aumento das tensões de escoamento e da capacidade de construção de materiais à base de cimento imprimíveis em 3D (Ma *et al.*, 2024; Xia *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2023).

Desse modo, é fundamental ajustar as propriedades do concreto para impressão 3D reforçado com fibras para permitir a impressão e obter peças com as propriedades desejadas no estado endurecido. Para Zat *et al.* (2025), correlacionar as propriedades do concreto no estado fresco com os parâmetros de impressão continua sendo um desafio, de modo que as propriedades da fibra influenciam o comportamento reológico, o suporte da camada e o tempo aberto de misturas, afetando diretamente a qualidade de impressão.

No geral, a influência de diferentes tipos de fibras no desempenho do 3DP-CC mostra semelhanças e diferenças, determinadas pelas propriedades inerentes das fibras, bem como pela composição das matérias-primas e processos de impressão do 3DP-CC. Para garantir uma impressão suave e produtos de alta qualidade, os pesquisadores normalmente optam por fibras curtas (1 a 15 mm) para seus estudos. As fibras longas podem causar entupimento dos bicos e aglomeração de fibras, o que atrapalha a suavidade da impressão e compromete a qualidade do produto (Xia *et al.*, 2025).

Ma *et al.* (2024) examinaram sistematicamente a influência do comprimento (6 e 12 mm) e dosagem da fibra poliácridonitrila na extrudabilidade, construtibilidade, propriedades mecânicas e anisotropia do concreto impresso em 3D. Os resultados indicaram uma redução significativa da fluidez com a adição das fibras e uma redução da extrudabilidade com o

aumento do comprimento da fibra. A redução da extrudabilidade causou irregularidades na superfície, quebra e arrasto da tira. A presença de fibras poliacrilonitrila, especialmente de 12 mm, intensificou as características anisotrópicas e aumentou significativamente a resistência à flexão.

Xia *et al.* (2025) analisaram os efeitos das fibras de polipropileno, basalto e aço na trabalhabilidade, capacidade de impressão, propriedades reológicas e mecânicas do 3DP-CC com diferentes teores e comprimentos de fibra. Todas as fibras aumentaram a tensão de escoamento, com redução do fluxo causada pelo consumo de pasta de cimento (polipropileno), absorção de água (basalto) e densidade/intertravamento (aço). A resistência à flexão apresentou aumento até o limite de incorporação das fibras: 0,7 % para polipropileno (12 e 18 mm), 0,5 % para basalto (18 mm) e 0,7 % para aço (12 mm). As fibras de aço mostraram-se as mais eficazes na melhoria da resistência, devido à sua rigidez e ao intertravamento com a matriz, além da alta resistência à tração do material.

Considerando a sustentabilidade, a utilização de fibra natural pode diminuir significativamente os impactos ambientais dos materiais de construção, tornando-se um elemento importante em práticas de construção mais ecológicas. Warsi, Panda e Biswas (2023) enfatizam que, nesse caso, é necessário fazer uma seleção cuidadosa das fibras, entendendo seu efeito, ao mesmo tempo em que otimiza a reologia do concreto para melhor dispersão das fibras e adesão fibra-matriz.

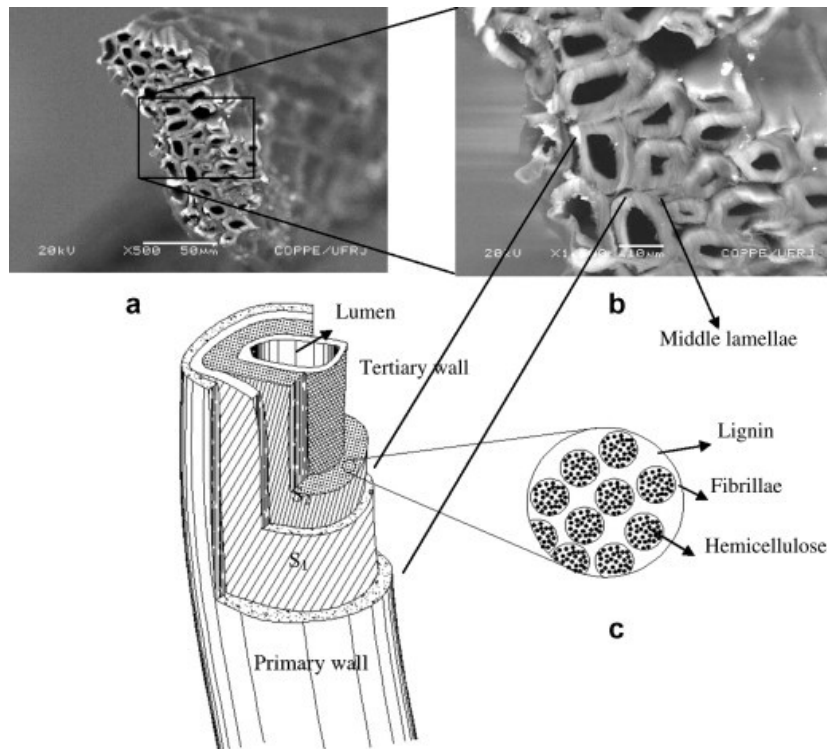
À medida que a indústria da construção muda para práticas sustentáveis e ecologicamente corretas, o uso de fibras vegetais (tais como: coco, bambu e sisal) na tecnologia de concreto atraiu um interesse significativo (Lu; Xiao; Li, 2024; Warsi; Panda; Biswas, 2023). Como recurso renovável, a fibra vegetal, em comparação com a fibra sintética tem uma fonte de matéria-prima mais ampla, menor custo de produção, menor consumo de energia e emissões de carbono (Lyu *et al.*, 2025).

Recentemente, a aplicação de fibras naturais em matrizes poliméricas de compósitos para impressão 3D tem ganhado popularidade. Para Siddiqui *et al.* (2024), elas fornecem um imenso potencial em engenharia biomédica, engenharia de tecidos, processamento de alimentos e fabricação sustentável. Para Jubinville *et al.* (2023), o processo de impressão 3D requer maior otimização de parâmetros para eliminar possíveis lacunas entre as camadas de impressão e melhorar as propriedades mecânicas. Considerando a utilização de matriz cimentícia, poucos trabalhos avaliaram o efeito das fibras naturais em compósitos para impressão 3D, carecendo de mais avaliações e aprofundamento sobre seu comportamento no estado fresco e endurecido.

Lu, Xiao, Li (2024) exploraram a integração da impressão 3D de concreto com concreto agregado reciclado e fibras vegetais e indicaram que integrar fibras vegetais no 3DP-CC oferece uma maneira de combater o alto impacto ambiental do cimento, mas que há uma necessidade urgente de uma investigação mais abrangente sobre seu desempenho. Ao avaliar compósitos à base de cimento imprimíveis em 3D reforçados com fibras de sisal, Varela *et al.* (2024) concluíram que há bom potencial para utilização de fibras de sisal em 3DP-CC, embora mais estudos sejam necessários para verificar a aplicabilidade e utilidade.

As fibras de sisal são fibras vegetais obtidas da planta *Agave Sisalana*, também conhecida como *henequen*, nativa do México (García *et al.*, 2024). Uma boa planta de sisal produz cerca de 205 folhas, com cada folha apresentando uma composição de apenas 4% de fibra (Mukherjee; Satyanarayana, 1984). A microestrutura da fibra é apresentada na Figura 1.

Figura 1 - Microestrutura da célula da fibra de sisal: (a) vista em corte transversal mostrando as células da fibra, lúmens e lamelas médias; (b) ampliação do corte transversal e (c) desenho esquemático mostrando as diferentes camadas de uma célula da fibra individual.



Fonte: Toledo Filho *et al.*, 2009

Cada fibra é formada por numerosas fibras individuais (células de fibra) com cerca de 6 a 30 µm de diâmetro equivalente. As fibras individuais são conectadas por meio da lamela média, composta por hemicelulose e lignina. O tamanho do lúmen pode variar, mas geralmente é bem definido (Figura 1b). Cada célula de fibra é constituída por quatro partes principais: a

parede primária, a parede secundária espessa, a parede terciária e o lúmen (Figura 1c) (Silva *et al.*, 2010; Toledo Filho *et al.*, 2009). A presença dos lúmens na fibra gera uma estrutura porosa que permite alta e rápida absorção de água, com capacidade de absorção de 246% (Moreira *et al.*, 2022).

A geometria da seção transversal das fibras de sisal não é regular, apresentando diferentes formas geométricas, ondulações e/ou variações aleatórias ao longo da fibra, o que auxilia no processo de ancoragem da fibra na matriz (Silva *et al.*, 2011). Essas mudanças de forma e geometria podem resultar em variações significativas nos parâmetros de ligação mecânica medidos.

As fibras naturais são caracterizadas por um alto teor de α -celulose (30 a 70 %), bem como alta absorção (de 28 a 350 %), que depende de cada tipo de fibra (García *et al.*, 2024). A composição química da fibra de sisal compreende aproximadamente 54 a 66% de celulose, 12 a 17 % de hemicelulose, 7 a 14 % de lignina, 1% de pectina e 1 a 7 % de cinzas, o que lhe confere características importantes para aplicações de engenharia, como notável rigidez, resistência à tração, resistência à compressão, resistência à flexão e resistência ao impacto (Rafi *et al.*, 2025; Silva *et al.*, 2010).

Devido à incompatibilidade química entre a fibra e a matriz cimentícia das misturas, a ligação entre ambos ocorre predominantemente por forças de Van der Waals e pelas interações entre os grupos hidroxila (-OH) da celulose e o hidróxido de cálcio. Além da fraca ligação química, a elevada capacidade de absorção de água das fibras de sisal provoca sua expansão volumétrica quando inseridas na matriz cimentícia fresca e posterior contração durante o processo de secagem. Essa variação volumétrica pode ocasionar uma perda parcial do contato físico entre a fibra e a matriz (Ferreira *et al.*, 2015).

O tratamento alcalino contribui para a melhoria dessa interface ao aumentar a disponibilidade de grupos hidroxila e a rugosidade superficial das fibras, favorecendo o intertravamento mecânico. Como resultado, observa-se um aumento da adesão entre a fibra e a matriz, bem como uma melhoria no desempenho global do compósito (Rafi *et al.*, 2025).

A principal limitação do uso de fibras naturais em compósitos cimentícios está relacionada à sua suscetibilidade à mineralização em ambientes alcalinos, provocada pela migração dos produtos de hidratação — especialmente o hidróxido de cálcio — para o lúmen, as paredes celulares e os vazios das fibras. Esse processo pode levar à degradação da lignina e de outros componentes, enfraquecendo as fibras e comprometendo a tenacidade e a resistência

do compósito. No entanto, protocolos específicos de pré-tratamento têm se mostrado eficazes na mitigação desses efeitos negativos, por meio da redução da hidrofiliidade, remoção de constituintes amorfos e fortalecimento da resistência da interface fibra-matriz (Dilawar Riaz *et al.*, 2023; Ferreira *et al.*, 2015, 2017; García *et al.*, 2024; Lu; Xiao; Li, 2024; Muhammad Salman *et al.*, 2021; Tolêdo Filho *et al.*, 2000).

Ferreira *et al.* (2015) investigaram o efeito de diferentes tratamentos nas propriedades físicas e mecânicas da fibra de sisal e no comportamento da interface fibra-matriz com uma matriz à base de cimento. Os resultados indicaram que os tratamentos de superfície podem reduzir os compostos químicos das fibras de sisal, como hemiceluloses e lignina, resultando em aumento da cristalinidade da celulose, redução do material amorfo e enrijecimento. Essas alterações levaram à redução na capacidade de absorção de água da fibra, aumento da sua resistência à tração e melhora significativa na interface fibra-matriz. O tratamento alcalino com $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aumentou a resistência à tração da fibra de sisal em 32% e resultou em melhoria no comportamento de arrancamento com um mecanismo de interação química entre o hidróxido de cálcio remanescente e o carbonato de cálcio aderido à superfície das fibras de sisal.

Uma outra estratégia eficaz para mitigar os danos causados pela alta alcalinidade é a redução do pH elevado da matriz através da produção de cimentos Portland combinados com materiais pozolânicos. Esta matriz reduz a produção de hidróxido de cálcio, resultando em maior durabilidade contra a degradação da fibra e pode fornecer ganhos na reologia para as frações de volume de fibra propostas (Silva *et al.*, 2011). Desse modo, a substituição de parte do cimento das misturas por adições minerais, como o metacaulim, tem sido utilizada para reduzir a degradação das fibras naturais nos compósitos cimentícios, aumentando, assim, a durabilidade do mesmo (Muhammad Salman *et al.*, 2021).

Toledo Filho *et al.* (2009) substituíram o cimento Portland por metacaulim e argila de tijolo residual calcinado para produzir um compósito com matriz completamente desprovida de hidróxido de cálcio. Os corpos de prova desse compósito, quando submetidos a até 100 ciclos de umedecimento e secagem, apresentaram resistência pós-fissuração e tenacidade à flexão tão altas quanto as dos corpos de prova de referência, indicando que a matriz livre de hidróxido de cálcio previne efetivamente o processo de fragilização das fibras e pode manter sua integridade estrutural nessas condições.

Varela *et al.* (2024) avaliaram compósitos à base de cimento imprimíveis em 3D reforçados com FS e concluíram que o reforço apresentou um bom potencial para 3DP-CC após

revelarem que a presença da FS aumenta a resistência à flexão e o índice de tenacidade das argamassas imprimíveis, mesmo reduzindo a fluidez da argamassa.

2.3 3DP-CC SOB ELEVADAS TEMPERATURAS

A exposição de materiais cimentícios a temperaturas elevadas provoca uma série de alterações físicas e químicas que afetam seu desempenho estrutural. Entre essas alterações, destacam-se a evaporação da água, a decomposição dos produtos de hidratação e o aumento da porosidade, fatores que contribuem significativamente para a degradação das propriedades mecânicas (Ma *et al.*, 2015; Malik; Bhattacharyya; Barai, 2021). O aumento da temperatura eleva a pressão de vapor nos poros, podendo ocasionar danos como fragmentação e lascamento explosivo (*spalling*) (Novak; Kohoutkova, 2018).

Devido ao seu processo construtivo em camadas, o concreto impresso em 3D apresenta comportamento termomecânico distinto do concreto convencional (Xiao *et al.*, 2021a). Estudos recentes (Alchaar; Al-Tamimi, 2021; Arunothayan; Sanjayan, 2023; Dong *et al.*, 2024; Şahin *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2022; Xiao *et al.*, 2021a; Zhou *et al.*, 2025) indicam que a elevação da temperatura acelera a perda de massa do 3DP-CC, aumenta a quantidade e o tamanho dos poros, reduz as resistências à compressão e à flexão e enfraquece a adesão entre camadas. Diferentemente do concreto moldado, o concreto impresso em 3D tende a apresentar delaminação em altas temperaturas, em vez de fragmentação explosiva (Arunothayan; Sanjayan, 2023; Xiao *et al.*, 2021a).

As altas temperaturas não apenas ampliam o número e o tamanho dos poros, mas também alteram significativamente sua distribuição e volume, aumentando a ocorrência de microporos. Esse efeito está associado à liberação de água e à decomposição das fases hidratadas (Zhou *et al.*, 2025). A perda de água livre inicia já nas primeiras etapas de aquecimento, devido ao aumento da energia cinética das moléculas, o que intensifica a difusão e provoca expansão volumétrica. Entre 250 °C e 400 °C ocorre a perda de água fisicamente adsorvida e intercalares do C-S-H gel, bem como de grande parte dos sulfoaluminatos (Şahin *et al.*, 2025). A decomposição do hidróxido de cálcio inicia em torno de 500 °C (Mehta; Monteiro, 2014), enquanto o C-S-H gel sofre decomposição perceptível a partir de 560 °C, tornando-se intensa acima de 600 °C (Peng; Huang, 2008). Nessas faixas, a porosidade do 3DP-CC aumenta de forma acentuada, especialmente nas regiões intercamadas, favorecendo a formação e propagação de trincas. Acima de 600 °C, a decomposição completa de Ca(OH)_2 e

CaCO₃ leva à formação de fissuras interconectadas, resultando em um material altamente poroso e estruturalmente fragilizado (Zhou *et al.*, 2025).

A anisotropia intrínseca do 3DP-CC gera variações significativas nas propriedades mecânicas conforme a direção de aplicação da carga, e tais diferenças tornam-se mais evidentes em altas temperaturas (Zhou *et al.*, 2025). Quando exposto acima de 400 °C, o concreto impresso apresenta crescimento expressivo de microfissuras, sobretudo na interface areia-cimento, devido à expansão térmica diferencial e à decomposição progressiva do Ca(OH)₂.

Para Dong *et al.* (2024), o risco de rachaduras no concreto durante o aquecimento poderia ser mitigado adicionando fibras à mistura. As fibras poliméricas são frequentemente utilizadas para reduzir fissuração e fragmentação de concretos sob temperaturas elevadas, pois à medida que as fibras de polipropileno, por exemplo, derretem a uma temperatura de 300 °C, caminhos vazios antes ocupados pelas fibras são deixados, facilitando a liberação da pressão dos poros por meio do aumento da permeabilidade (Malik; Bhattacharyya; Barai, 2021). Porém, a adição de fibras em compósito para impressão 3D pode reter água na mistura e levar à diminuição dos valores de abatimento, aumentando a demanda de água para obter a trabalhabilidade e a capacidade de impressão (Ma *et al.*, 2019), além de modificar o aspecto do filamento impresso (Liu *et al.*, 2022), necessitando assim de estudo e planejamento específico.

Pesquisas recentes em 3DP-CC têm utilizado diferentes tipos de fibra, como fibras de polipropileno (Arunothayan; Sanjayan, 2023; Dong *et al.*, 2024; Ma *et al.*, 2022a; Tran; Cu; Le, 2021), fibras de aço (Arunothayan; Sanjayan, 2023; Dong *et al.*, 2022, 2024), fibras de álcool polivinílico (Arunothayan; Sanjayan, 2023; Liu *et al.*, 2022; Weng *et al.*, 2019), fibras de vidro (Panda; Chandra Paul; Jen Tan, 2017) e fibras vegetais de sisal (M. Sonebi S. Amziane A. Abdalqader e A. Perrot, 2021; Varela *et al.*, 2024). As fibras são comumente utilizadas em materiais a base de cimento e contribuem para o desempenho em altas temperaturas ao reduzir a fragmentação e estilhaçamento do concreto (microfibras sintéticas e fibras vegetais) e retardar a perda das propriedades mecânicas residuais (macrofibras), preservando a capacidade de carga da estrutura (Poon; Shui; Lam, 2004; Yermak *et al.*, 2017). Para Teixeira *et al.* (2012), as fibras vegetais são uma alternativa de reforço de matrizes frágeis à base de materiais cimentícios, o que tem motivado pesquisas em países em desenvolvimento devido ao seu baixo custo, disponibilidade, caráter renovável e economia de energia. Adicionalmente, resultam em impactos positivos tanto no âmbito social quanto econômico (Netinger Grubeša *et al.*, 2018). Para Lu, Xiao, Li (2024), a inserção de fibras vegetais, juntamente com a diminuição das proporções de cimento utilizadas, oferece uma maneira de aumentar a sustentabilidade e

combater o alto impacto ambiental dos altos teores de cimento utilizados no 3DP-CC, e pode também trazer propriedades mecânicas aprimoradas, representando um campo nascente de exploração.

O uso de fibras curtas dispersas — metálicas ou poliméricas — no 3DP-CC atua como armadura secundária, reduz a retração e aumenta a resistência inicial (De Schutter *et al.*, 2018). Fibras poliméricas, em especial, são empregadas para mitigar o *spalling* térmico, atribuído ao aumento da pressão dos poros em temperaturas elevadas (Malik; Bhattacharyya; Barai, 2021). Sua fusão gera uma rede de microcanais que facilita a saída do vapor, reduzindo a pressão interna e os riscos de lascamento explosivo (Xiao *et al.*, 2021a). Entretanto, a incorporação de fibras também pode enfraquecer a interface entre camadas (Dong *et al.*, 2024).

Ren, Gao e Zhang (2022) utilizaram FS e de aço em concretos de ultra-alto desempenho e verificaram que as fibras de sisal podem mitigar o estilhaçamento das amostras quando sob elevadas temperaturas e que isso ocorre pela liberação de vapor através dos vazios formados pela presença de lúmens ociosos, pelo encolhimento radial e carbonização das fibras durante o aquecimento. Resultados obtidos por Ferreira *et al.* (2021) evidenciaram que os principais componentes das fibras sisal (hemicelulose, lignina e celulose) se degradaram entre 250 e 400 °C, e, que, a partir de 250 °C, as fibras apresentam comportamento frágil e quebradiço.

Xiao *et al.* (2021a) avaliaram o comportamento do 3DP-CC com 50 % de areia reciclada e fibras de polietileno exposto a temperaturas entre 20 °C e 800 °C. Eles observaram redução das resistências mecânicas com o aumento da temperatura e delaminação das interfaces a 600 °C, atribuída à baixa adesão entre camadas. Embora as fibras tenham melhorado a resistência em temperatura ambiente, perderam efeito em altas temperaturas devido ao baixo ponto de fusão. Por outro lado, seu derretimento favoreceu a formação de microcanais para liberação de vapor, reduzindo a delaminação e o *spalling* explosivo.

Cicione *et al.* (2021) produziram amostras de 3DP-CC e concreto convencionalmente moldado, que foram expostas a um alto fluxo de calor incidente através de painéis radiantes. Verificou-se que o 3DP-CC é menos suscetível ao *spalling* explosivo, como resultado de sua maior permeabilidade e porosidade, que permite o movimento do vapor através da amostra, reduzindo o acúmulo de pressão dos poros. Entretanto, os autores manifestaram grande preocupação em relação à tendência das ligações intercamadas das amostras de 3DP-CC se romperem em temperaturas elevadas. Devido o reduzido teor de ar, os resultados mostraram maior resistência à compressão no 3DP-CC quando comparado com as amostras moldadas convencionalmente. Entretanto, menores ligações intercamadas resultaram em menor

resistência à flexão do 3DP-CC, levando à uma tendência de delaminação entre as camadas do 3DP-CC quando sob elevadas temperaturas.

De modo semelhante, Han *et al.* (2022), por meio de tomografia computadorizada, identificaram menor porosidade média no 3DP-CC em comparação ao concreto moldado, mas verificaram menor densidade nas interfaces impressas, onde ocorreram fissuração interlamelar e delaminação durante o aquecimento. Foram observados gradientes de temperatura, em que a região central dos corpos de prova se encontrava em estado de tração, enquanto a região da borda era comprimida.

Arunothayan e Sanjayan (2023) investigaram os efeitos de elevadas temperaturas em concretos de ultra-alto desempenho impressos em 3D, produzindo cinco misturas com diferentes combinações de fibras de aço e poliméricas (polipropileno e álcool polivinílico). Os corpos de prova foram aquecidos em forno elétrico até 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C e 1000 °C, a uma taxa de 4 °C/min e mantidos por duas horas na temperatura alvo. Os resultados mostraram que as fibras poliméricas reduziram significativamente a vulnerabilidade ao *spalling* explosivo, com destaque para o polipropileno, cujo baixo ponto de fusão gerou canais de alívio para o vapor. Em comparação ao concreto moldado, as amostras impressas apresentaram danos ligeiramente menores, atribuídos à maior porosidade das camadas intermediárias, que favoreceram a dissipação de pressão. Contudo, a partir de 400 °C, observou-se delaminação interlamelar, substituindo o *spalling* nas amostras impressas e indicando que as interfaces continuam sendo regiões críticas sob exposição térmica.

Zhou *et al.* (2025) também investigaram os efeitos de altas temperaturas no concreto impresso em 3D, mas com ênfase na resistência entre camadas, microestrutura, produtos de hidratação e porosidade. Para tanto, foram realizados ensaios mecânicos e análises de DRX, MEV, TG e tomografia computadorizada. Os resultados mostraram que a resistência de união entre camadas reduz-se drasticamente com o aumento da temperatura, atingindo perda superior a 90% a 800 °C. Além disso, a elevação térmica intensifica a formação e o crescimento de poros, sobretudo nas interfaces, favorecendo a iniciação e a propagação de fissuras. Acima de 400 °C, a expansão térmica diferencial e a decomposição progressiva do Ca(OH)_2 ampliam o desenvolvimento de microfissuras. Já acima de 600 °C, a decomposição completa do Ca(OH)_2 e do CaCO_3 origina grandes fissuras interconectadas, resultando em um material altamente poroso e estruturalmente comprometido.

De forma geral, os estudos evidenciam que o concreto impresso em 3D apresenta comportamento particular sob elevadas temperaturas: a maior permeabilidade e porosidade

reduzem a suscetibilidade ao *spalling* em comparação ao concreto moldado, mas a integridade das interfaces entre camadas permanece como ponto crítico, resultando em delaminações e perdas significativas de resistência mecânica. A intensificação da porosidade, a formação de microfissuras e a decomposição das fases hidratadas comprometem substancialmente o desempenho estrutural do 3DP-CC, com reduções superiores a 90% na resistência de união entre camadas a 800 °C. As fibras poliméricas se mostram eficazes na mitigação do *spalling*, por formarem uma rede de alívio de pressão com o aumento da temperatura, mas ainda há a necessidade de investigações adicionais que considerem estratégias para melhorar a aderência intercamadas e a estabilidade térmica do material, aspectos ainda pouco explorados e de relevância direta para aplicações estruturais seguras em condições de incêndio.

2.3.1 Surgimento e evolução de danos no concreto convencional e no 3DP-CC durante o aquecimento

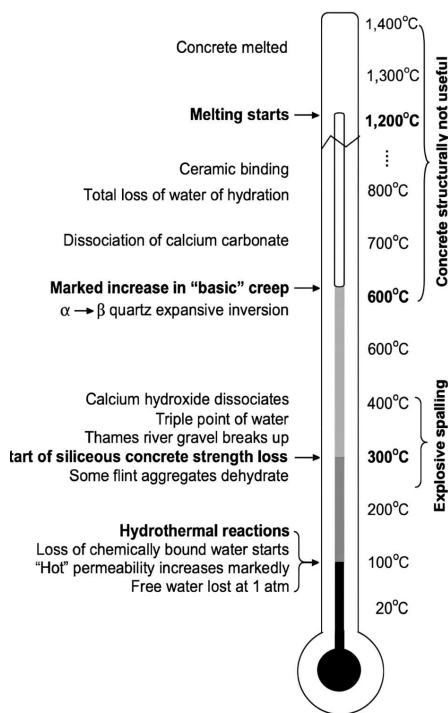
O concreto sofre deterioração de suas propriedades com o aumento da temperatura, em razão das alterações físico-químicas que ocorrem durante o aquecimento (Khoury, 2000), conforme ilustrado na Figura 2. Nesse processo, Georgali e Tsakiridis (2005) destacam a perda de resistência à compressão, a formação de rachaduras e lascas, a destruição da ligação entre a pasta de cimento e os agregados, bem como a deterioração gradual da pasta de cimento endurecida.

Essas modificações resultam em danos que podem ser identificados visualmente, como mudanças de cor, fissuras e lascamento superficial (Khoury, 2000; Georgali; Tsakiridis, 2005). Durante o aquecimento, o concreto pode apresentar também *spalling*, caracterizado pelo destacamento violento ou não violento de camadas ou fragmentos da superfície, quando submetido a temperaturas elevadas e a um rápido aumento de calor (Khoury, 2000).

Li, Qian e Sun (2004) verificaram que a cor do concreto se mantém inalterada até 200 °C, passando a apresentar tons de amarelo-palha, esbranquiçado e vermelho quando exposto a 400, 800 e 1000 °C, respectivamente. Arioiz (2007) ao observar visualmente amostras submetidas a temperaturas elevadas, identificou o aparecimento de trincas superficiais a 600 °C. A 800 °C, essas fissuras tornaram-se bastante pronunciadas e se intensificaram ainda mais em 1000 °C. Segundo o autor, os efeitos das altas temperaturas no concreto se manifestam inicialmente por rachaduras e lascamento na superfície, acompanhados de mudanças de cor. Além disso, o gel C-S-H, responsável pela resistência, se decompõe a partir de 600 °C, quando

também surgem as primeiras fissuras visíveis. Em 800 °C, o concreto tende a se esfarelar, e as rachaduras se acentuam com a decomposição do CaCO₃ em CaO.

Figura 2 - Processos físico-químicos no concreto de cimento Portland durante o aquecimento.



Fonte: Khoury, 2000

O concreto impresso em 3D apresenta um comportamento de degradação semelhante ao do concreto moldado convencional. Contudo, em função das particularidades do processo construtivo do 3DCP, suas propriedades mecânicas e o padrão de fissuração sob ou após a exposição a altas temperaturas podem diferir do material moldado (Ma *et al.*, 2025). Nas amostras produzidas por impressão 3D, as falhas ocorrem predominantemente nas interfaces entre camadas, evidenciando que essa região constitui o ponto de menor resistência no material (Cicione *et al.*, 2021; Arunothayan e Sanjayan, 2023; Dong *et al.*, 2024; Luo; Li; Wang, 2024).

Cicione *et al.* (2021) verificaram perda de aderência entre camadas, atribuída à formação de um gradiente térmico capaz de gerar tensões de tração autoequilibrantes superiores à resistência à flexão das amostras de concreto impresso em 3D quando submetidas a temperaturas elevadas. Entretanto, os autores também destacaram que a maior permeabilidade e porosidade do 3DP-CC pode torná-lo menos suscetível à formação de rachaduras.

Desse modo, há evidências de que as interfaces representam as regiões críticas sob exposição térmica, uma vez que o modo de falha predominante nas peças impressas em 3D é a delaminação, enquanto nas amostras moldadas prevalece a fragmentação. Por outro lado, a

baixa incidência de lascamento explosivo nas peças impressas pode estar associada à maior porosidade das interfaces entre camadas, o que pode contribuir para um melhor desempenho estrutural de edificações impressas em 3D sob altas temperaturas (Han *et al.*, 2022; Arunothayan e Sanjayan, 2023).

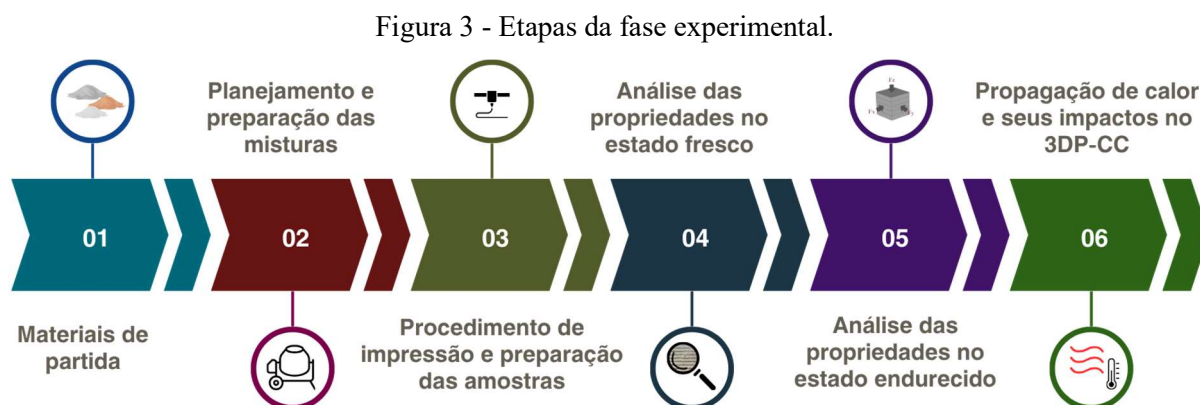
Ma *et al.* (2025) avaliaram os padrões de evolução das trincas em corpos de prova de 3DP-CC após exposição a temperaturas elevadas e concluíram que, embora tenha sido observada uma tendência de degradação semelhante na resistência à compressão residual de 3DP-CC e do concreto moldado com a mesma formulação, o 3DP-CC apresentou padrões de fissuração distintos, com trincas se propagando preferencialmente ao longo das interfaces entre camadas e filamentos, em contraste com a fissuração mais dispersa das peças moldadas

Xiao *et al.* (2021a) também avaliaram a aparência do concreto após exposição a altas temperaturas e identificaram variações decorrentes das alterações químicas induzidas pelo aquecimento. As primeiras modificações visuais foram observadas a partir de 400 °C, quando ocorreu delaminação nas amostras impressas em 3D, em contraste com a fragmentação registrada nos espécimes moldados. A 600 °C, as amostras adquiriram coloração amarelo-acinzentada em razão da desidratação do Ca(OH)_2 , enquanto, no pico de 800 °C, todos os espécimes se tornaram amarelos claros e quebradiços devido à decomposição do CaCO_3 .

Constata-se, então, que a literatura sobre impressão 3D de compósitos cimentícios ainda apresenta lacunas importantes, especialmente quanto ao entendimento do comportamento desses compósitos sob elevadas temperaturas e ao uso de reforços de origem natural. Embora diversos estudos tenham investigado formulações e parâmetros reológicos para a extrusão de misturas cimentícias, a influência de fibras naturais no desempenho pós-aquecimento de materiais para impressão 3D permanece pouco explorada. Diante dessa lacuna, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de compósitos cimentícios para impressão 3D reforçados com fibras de sisal, com base na hipótese de que esse reforço pode mitigar os efeitos deletérios da exposição térmica sobre as propriedades mecânicas e microestruturais. A inovação deste estudo reside tanto na avaliação experimental do comportamento termomecânico e microestrutural do 3DP-SFCC, ainda inexistente na literatura, quanto na integração de princípios de sustentabilidade, por meio da utilização de uma fibra natural amplamente disponível e de baixo e da redução do teor de cimento com a introdução de fíler e metacaulim. Assim, este trabalho contribui para o avanço do conhecimento sobre materiais sustentáveis e de melhor desempenho para impressão 3D, oferecendo uma alternativa técnica e ambientalmente viável para a construção aditiva.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a descrição dos materiais e métodos empregados no desenvolvimento deste trabalho, que é composto por seis fases principais, conforme ilustrado na Figura 3.



3.1 MATERIAIS DE PARTIDA

Os materiais utilizados para a formulação das misturas avaliadas, assim como sua descrição básica, estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Materiais de partida.

Material	Especificações
Cimento	CPV-ARI, Cimento Nacional
Metacaulim	Comercial, Metacaulim do Brasil
Fíler calcário	Material passante na peneira 200 mesh
Areia	Areia natural, com tamanho máximo de partícula de 2,40 mm
Água	Proveniente da concessionária local
Superplastificante	Glenium® 160 SCC, BASF
HPMC	Hidroxipropilmetilcelulose comercial
Fibras de sisal	Fibra natural cedida pela Companhia Industrial do Sisal, Bayeux-PB

Foi utilizado um cimento Portland comercial CPV-ARI (PC) em conformidade com a NBR 16697 (ABNT, 2018) semelhante ao cimento CEM I da EN 197-1 (EN, 2011) e tipo III da ASTM C 150 (ASTM C150, 2020). Foi utilizado um metacaulim (MK) comercial e um filer calcário (LF) passante na peneira 200 mesh (diâmetros menores que 0,075 mm) para preparar as misturas ternárias, visando a redução do consumo de cimento e melhoria das propriedades reológicas para impressão 3D.

As composições químicas e propriedades físicas desses materiais são mostradas na Tabela 2. As análises foram realizadas no Laboratório Interdisciplinar de Caracterização e Desenvolvimento de Nanomateriais (LANANO), do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB). O metacaulim apresentou área superficial superior ao filer calcário e ao cimento. Verificou-se ainda teor de alumina de 23,81 %, associado à formação de sílico-aluminato de cálcio hidratado (C-(A)-S-H).

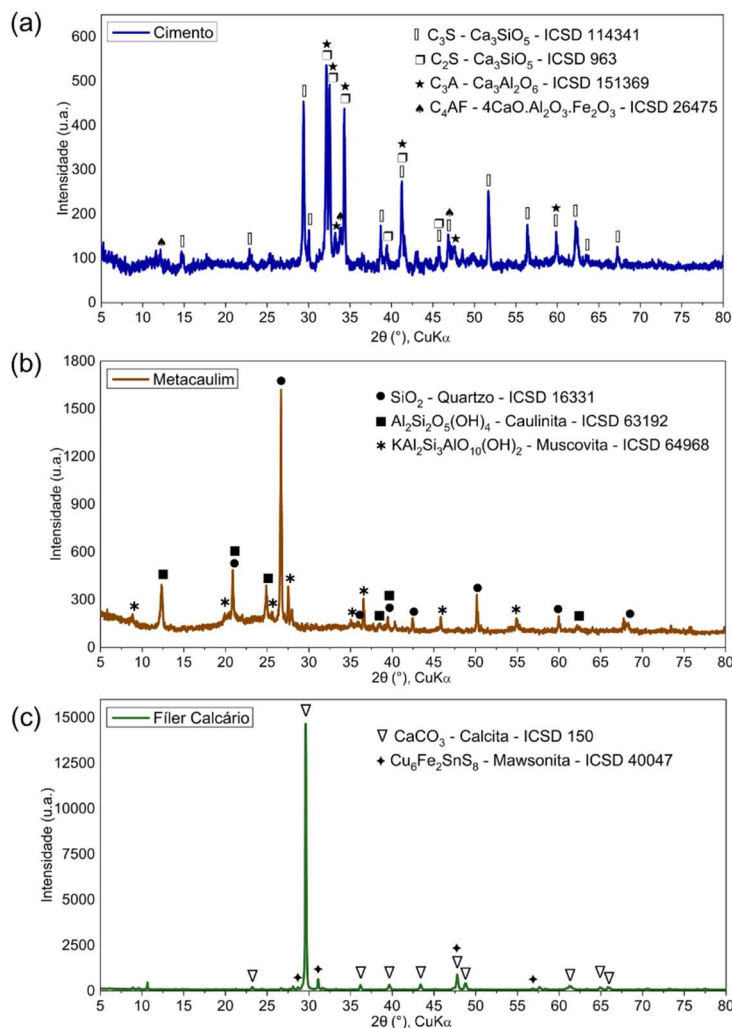
Tabela 2 - Composição química do pó de cimento Portland, filer calcário e metacaulim.

		Cimento	Filer calcário	Metacaulim
Propriedades físicas	Densidade (g/cm ³)	3,02	2,72	2,61
	D50 (µm)	4,60	8,50	3,60
	Superfície específica BET (m ² /g)	1,07	2,75	10,93
	Al ₂ O ₃	-	-	23,81
Composição química (% por peso)	CaO	-	94,13	0,32
	SiO ₂	-	4,68	51,05
	Fe ₂ O ₃	-	0,62	17,04
	SO ₃	-	-	0,15
	TiO ₂	-	0,01	3,45
	K ₂ O	-	0,22	3,23
	Outros	-	0,34	0,95

As análises de difração de raios X (DRX) e de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizados para identificar a microestrutura e as fases cristalinas do cimento, filer e metacaulim. Os ensaios de DRX foram executadas em um difratômetro Shimadzu LabX XRD-6000, disponível no Laboratório de Combustíveis e Materiais (LACOM) da UFPB, utilizando radiação CuK α , velocidade de varredura de 1 °/min, passo de 0,02° e intervalo angular de 5° a 80°. Os difratogramas obtidos para o cimento, metacaulim e filer calcário são apresentados na Figura 4.

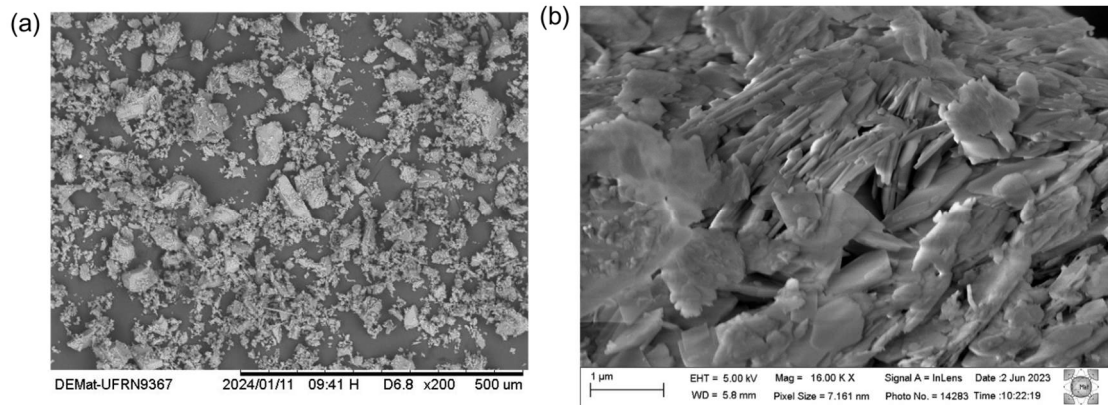
Os padrões de DRX evidenciam que o cimento apresenta os picos característicos de C₂S, C₃S, C₃A e C₄AF. O metacaulim mostra discreta amorficidade e a presença de quartzo, caulinita e muscovita (Figura 4b), enquanto o filer calcário apresenta alta cristalinidade, com picos intensos de calcita e ocorrência de mawsonita (Figura 4c).

Figura 4 – Padrões de DRX do cimento (a), metacaulim (b) e filer calcário (c).



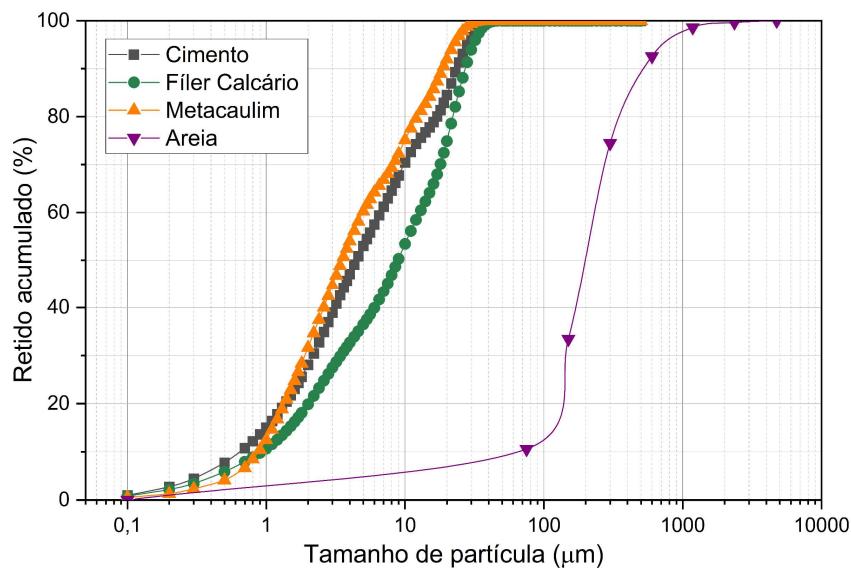
As imagens de MEV do filer calcário e metacaulim, obtidas por elétrons secundários, em um Hitachi, modelo de bancada TM 3000, do Laboratório de Caracterização Estrutural de Materiais (LABCEM) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). As micrografias apresentadas na Figura 5a e Figura 5b evidenciam a morfologia das partículas e ajudam a compreender sua influência no comportamento das misturas no estado fresco. O metacaulim apresenta partículas lamelares e mais porosas, características que tendem a aumentar a viscosidade e favorecer a retenção de forma, mas que também exigem maior dosagem de aditivo superplastificante para garantir a fluidez necessária à extrusão, sem elevação do teor de água. Já a morfologia mais arredondada das partículas do filer calcário favorece a fluidez das misturas.

Figura 5 – Micrografias do filler calcário (a) e metacaulim (b).



Utilizou-se como agregado uma areia natural com o tamanho máximo de agregado de 2,40 mm e densidade específica de 2,61 g/cm³. A distribuição granulométrica foi determinada pelo método de peneiramento, utilizando aberturas de 4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm; 0,60 mm; 0,30 mm; 0,15 mm e 0,075 mm, conforme estabelecido pela NBR 17054 (ABNT, 2022), e está apresentada na Figura 6. As distribuições de tamanho de partícula (PSD) do cimento, filler calcário e metacaulim (Figura 6) foram determinadas por via seca através de granulômetro a laser Cilas, modelo 1180, do Laboratório de Purificação e Aspersão de Minerais Argilosos (LAPAMA). Foi evidenciado que os grãos do filler calcário apresentam dimensões superiores às do cimento e do metacaulim.

Figura 6 - Distribuição granulométrica da areia, cimento Portland, metacaulim e filler calcário.



Para que fossem atingidas as propriedades reológicas necessárias para a impressão, foram utilizados superplastificante a base de policarboxilato (SP) e hidroxipropilmetilcelulose

(HPMC) como modificador de viscosidade. A água para mistura foi advinda da concessionária local.

As fibras de sisal, provenientes do estado da Bahia, foram doadas pela Companhia Industrial do Sisal. Com diâmetro aproximado de 0,18 mm e densidade de 1,27 g/cm³, elas foram incorporadas às misturas ternárias com o objetivo de avaliar sua influência na capacidade de impressão das misturas 3DP-SFCC e seu comportamento em altas temperaturas. As fibras foram cortadas em comprimentos de 6 mm e 12 mm e submetidas a um tratamento alcalino, realizado para reduzir a presença da lignina e, conseqüentemente, melhorar a adesão entre as fibras e a matriz, além de reduzir a absorção de água (Li; Mai; Ye, 2000).

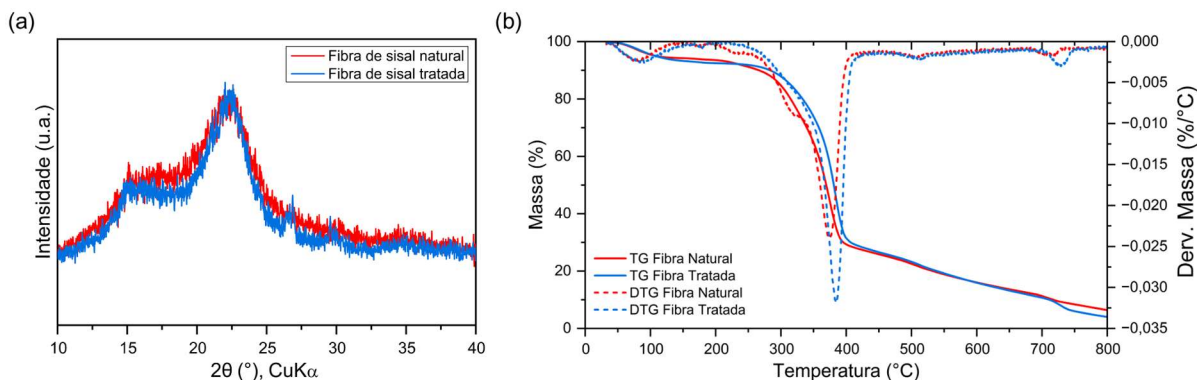
O procedimento utilizado para o tratamento consistiu em imergir as fibras de sisal em 0,73 % em peso de solução de Ca(OH)₂ em temperatura controlada em laboratório (25 °C) por 50 min. As fibras tratadas não foram lavadas para manter o excesso de álcali na superfície da fibra, com o objetivo de promover a interação química entre o hidróxido de cálcio e o carbonato de cálcio da matriz, aumentando a ligação interfacial. As fibras foram então secas em estufa a 50 °C por 24 h. A utilização de uma solução a 0,73% de Ca(OH)₂ para tratamento das fibras de sisal foi escolhida com base em resultados promissores obtidos no estudo de Ferreira *et al.* (2015). Esse tratamento modifica as ligações químicas da fibra, aumentando sua cristalinidade, o que, por sua vez, melhora a resistência à tração da fibra e reduz sua capacidade de absorção de água, resultando em uma melhor adesão da fibra à matriz.

A análise por DRX foi realizada nas fibras naturais e após tratamento alcalino (Figura 7a). Para tal, foi utilizado um equipamento Shimadzu, modelo LabX XRD-6000 (radiação CuK), do LACOM-UFPB. A intensidade difratada da radiação foi medida em uma faixa de 2θ entre 10° e 40° com um tamanho de passo de 0,02° a 1 °/min. Para a preparação da amostra, as fibras foram secas, trituradas com auxílio de almofariz e pistilo e passadas em peneira de 200 mesh. O índice de cristalinidade foi calculado utilizando o método empírico proposto por Segal *et al.* (1959), levando em consideração a intensidade máxima de difração do pico 002 (2θ = 22,68°) e intensidade máxima de difração da região amorfa (2θ = 18°), obtidos da análise de DRX das fibras naturais e após o tratamento. O método indicou aumento na cristalinidade das fibras de 34,3 % para 38,4 % após o tratamento alcalino.

As análises termogravimétricas da fibra de sisal natural e após o tratamento foram realizadas em um instrumento de medição simultânea TG/DTA Shimadzu DTG-60H e são

apresentadas na Figura 7b. Para execução da análise, as amostras foram aquecidas de 30 °C a 800 °C a 60 ml/min de fluxo de nitrogênio com uma taxa de aquecimento de 20 °C/min. Um cadinho de platina aberto foi usado para apoiar as amostras.

Figura 7 - Fibras de sisal natural e após tratamento alcalino: difração de raios-X (a) e TG/DTG (b).

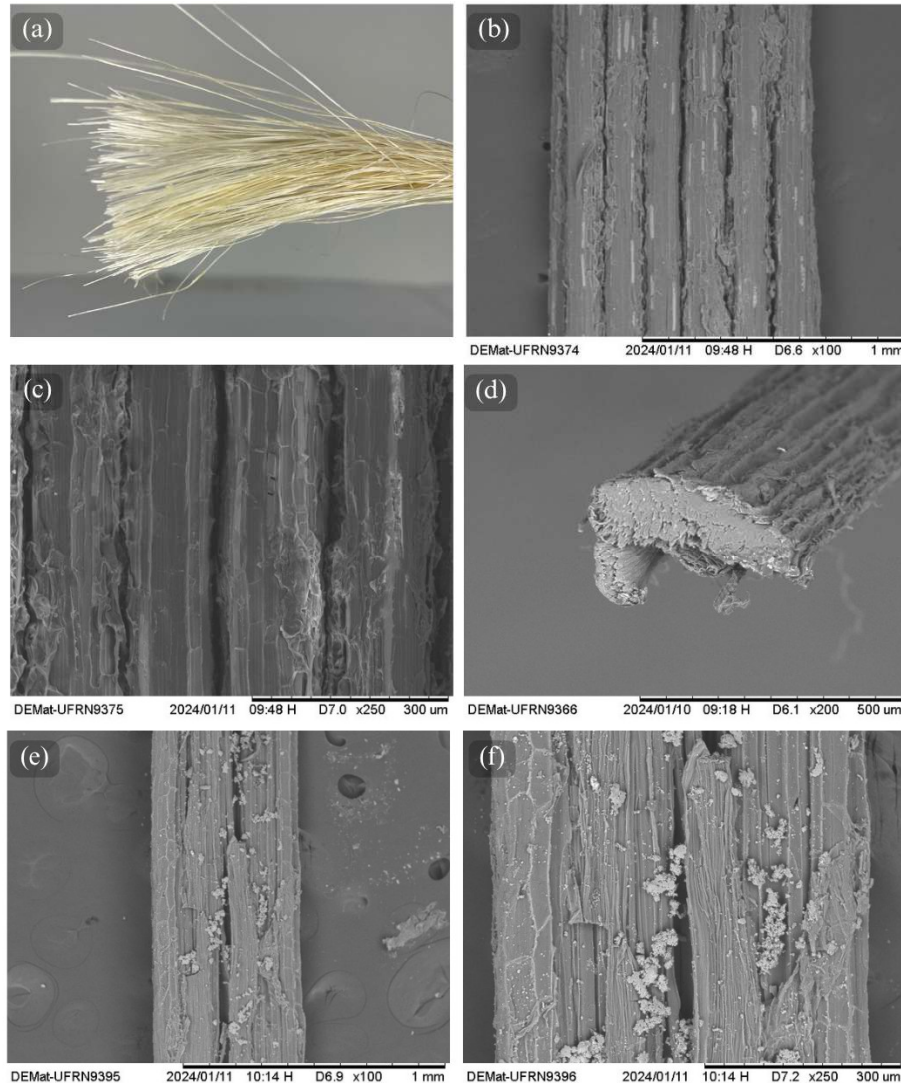


Nas curvas termogravimétricas e termogravimétricas derivadas da fibra de sisal (Figura 7b) é possível visualizar os três estágios de decomposição térmica observados por Wei e Meyer (2014), Ferreira *et al.* (2021) e Ren, Gao, Zhang (2022): (i) evaporação da umidade na faixa de temperatura de 40 a 130 °C, (ii) decomposição da hemicelulose simultaneamente com a degradação da lignina entre 200 e 350 °C e (iii) e degradação da celulose e da lignina de 310 a 400 °C. A perda de peso contínua após essa temperatura ocorre principalmente devido à carbonização das fibras (Ren; Gao; Zhang, 2022). As fibras naturais e tratadas apresentaram comportamentos semelhantes de degradação térmica, porém fibra de sisal tratada apresentou ligeiramente uma menor perda de massa na etapa (ii) e maior perda de massa na etapa (iii), evidenciando que o tratamento removeu alguns materiais amorfos da fibra do sisal, especialmente a lignina, gerando uma melhora na cristalinidade, já observada no padrão DRX (Figura 7a). Nas fibras de sisal, tanto naturais quanto tratadas em meio alcalino, a degradação térmica até 400 °C, temperatura em que os principais constituintes estruturais (hemicelulose e celulose) já estão intensamente degradados, causou perdas de peso de aproximadamente 70 %.

Adicionalmente, a superfície das fibras naturais e tratadas tiveram suas morfologias avaliadas por MEV, em equipamento Hitachi, modelo de bancada TM 3000, do LABCEM-UFRN. A Figura 8 apresenta as imagens obtidas, em que é possível visualizar as fibras elementares formadas e interligadas por celulose, hemicelulose, lignina e pectina. O tratamento alcalino proporcionou maior rugosidade e cristalinidade às fibras com a diminuição da quantidade de lignina, o que deve influenciar em suas propriedades físicas e características

químicas. Com o tratamento, o hidróxido de cálcio remanescente pode melhorar adesão da fibra à matriz.

Figura 8 - Fibra de sisal natural (a); micrografias das fibras de sisal: parede lateral da fibra natural (b) e (c); seção transversal da fibra de sisal (d); parede lateral da fibra após tratamento alcalino (e) e (f).



Ensaio de tração nas fibras naturais e após tratamento alcalino foram realizados em uma máquina universal de ensaios (Shimadzu AG-X) com uma célula de carga de 10 kN, do Laboratório de Solidificação Rápida (LSR) da UFPB. Os ensaios foram executados em 10 repetições, com comprimento de ensaio de 50 mm e usando uma taxa de deslocamento de 0,1 mm/min. Para calcular a resistência à tração das fibras, o diâmetro da fibra foi determinado por análise de imagem de micrografias de um microscópio eletrônico e apresentou valor médio de $0,18 \pm 0,03$ mm. Após o tratamento, foi observado que a resistência à tração das fibras de sisal aumentou de 444,6 MPa para 627,2 MPa e a absorção de água diminuiu de 236 % para 182 %.

3.2 PLANEJAMENTO E PREPARAÇÃO DAS MISTURAS

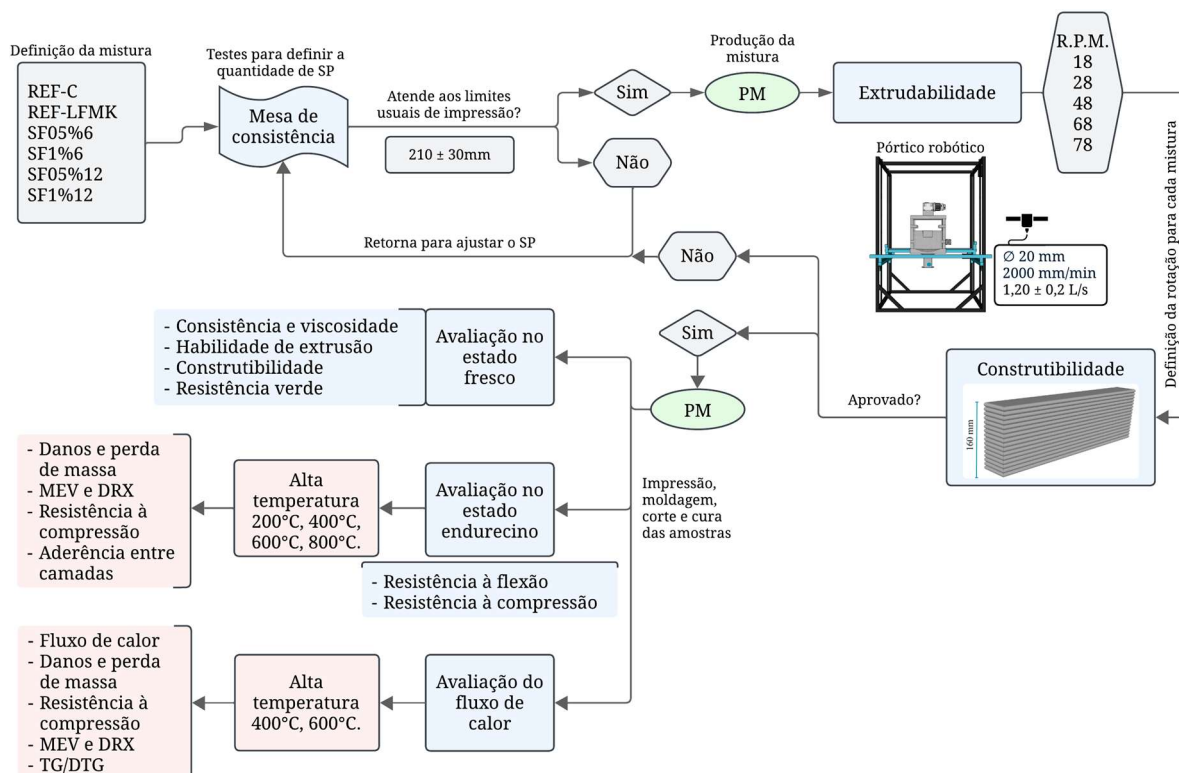
As proporções detalhadas da mistura das matérias-primas usadas para a preparação do 3DP-SFCC são mostradas na Tabela 3. A mistura de referência (REF-C) foi definida com uma proporção mássica de 1:2 (cimento:areia). A partir dela, foi formulada uma mistura ternária com adições minerais de LF e MK, denominada REF-LFMK, mantendo a relação em massa de 1:2 de finos (cimento+MK+LF:areia), substituindo 40 % do volume de cimento Portland (CP) da mistura REF-C por 30% de LF e 10% de MK. Com base na matriz, ternária foram definidas mais 4 misturas com fibra de sisal (FS) de 6 mm e 12 mm com fração volumétrica de 0,5 % e 1,0 %, totalizando seis misturas avaliadas. Todas as misturas apresentam relação água/finos (a/f) igual a 0,36 e as quantidades de materiais variam para apresentação das quantidades em kg/m³, mantendo as proporções de materiais da matriz após a inserção volumétrica das fibras no compósito.

Tabela 3 - Composição das misturas 3DP-SFCC.

Mistura	PC (kg/m ³)	LF (kg/m ³)	MK (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	FS (kg/m ³)	SP (%)	HPMC (%)	Compr imento da FS (mm)	Fração da fibra (% por volume)
REF-C	685,90	-	-	1371,80	246,92	-	0,60	0,15	-	-
REF- LFMK	407,08	203,54	67,85	1356,94	244,25	-	1,10	0,15	-	-
SF05%6	405,05	202,52	67,51	1350,15	243,03	6,35	1,20	0,15	6	0,5
SF1%6	403,01	201,51	67,17	1343,37	241,18	12,70	1,50	0,15	6	1,0
SF05%12	405,05	202,52	67,51	1350,15	243,03	6,35	1,20	0,15	12	0,5
SF1%12	403,01	201,51	67,17	1343,37	241,18	12,70	1,50	0,15	12	1,0

O teor de superplastificante a base de policarboxilato foi ajustado para que cada mistura apresentasse espalhamento na mesa de consistência entre 180 mm e 240 mm, conforme sugerido por estudos anteriores que utilizam o mesmo pórtico robótico de impressão deste trabalho (Barbosa *et al.*, 2022a; Dias *et al.*, 2024a; Nunes *et al.*, 2023a). Porém, como a presença de fibra pode exigir uma mistura mais fluida, para que a impressão ocorra sem ocasionar obstruções no bico de extrusão (Ma *et al.*, 2019), foi necessário realizar ensaio de extrudabilidade e construtibilidade para, então, definir o teor de aditivo e a rotação da impressora para os 3DP-SFCC avaliados. O aditivo HPMC foi mantido constante e o SP alterado conforme a necessidade para atender as condições extrudabilidade e construção, seguindo o fluxo de verificação de requisitos para construção 3DP-SFCC no sistema disponível (Figura 9).

Figura 9 - Protocolo desenvolvido para definição e verificação dos requisitos de elementos de construção aditiva com fibras de sisal.



As composições analisadas (Tabela 3) foram produzidas em um misturador de eixo vertical com um tempo de mistura de 120 s, com a seguinte ordem de colocação dos materiais: 1) cimento e areia; 2) 75 % da água; 3) 25 % da água e o superplastificante; 3) adição das fibras de forma bem distribuída, para facilitar sua dispersão; 4) adição do filer calcário; 5) adição do metacaulim; 6) adição do HPMC. Nas misturas que não continham LF, MK ou fibra, a sequência de mistura foi a mesma, excluindo apenas as etapas de inserção desses materiais. As misturas foram, então, direcionadas para impressão e/ou para a realização dos ensaios no estado fresco. Posteriormente, foram realizados os processos de cura e corte das amostras e, aos 28 dias, os ensaios no estado endurecido e de fluxo de calor através do 3DP-CC.

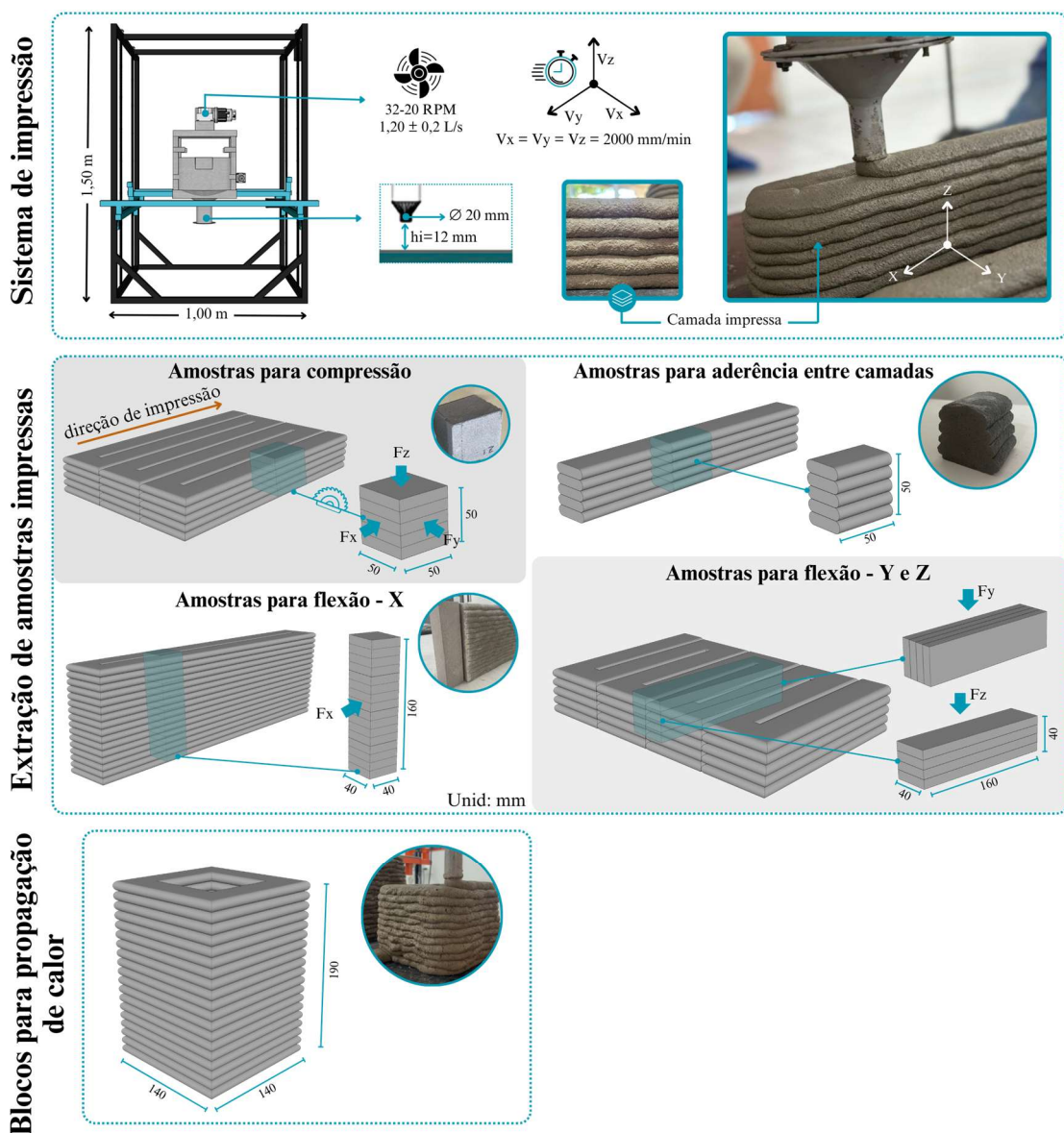
3.3 PROCEDIMENTO DE IMPRESSÃO E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para impressão dos compósitos, foi utilizada impressora cartesiana do tipo pórtico, configurada usando o *software* do sistema de controle, capaz de se mover ao longo das direções X, Y e Z de forma automatizada. Foi definida velocidade de impressão horizontal de 2000 mm/min e a velocidade de rotação da hélice de extrusão para cada mistura foi testada e determinada de modo a dar condições de impressão e manter constante a taxa de extrusão (1,20 ± 0,2 l/s). Imediatamente após o processo de mistura, os compósitos foram transportados para

o interior da cuba de extrusão da impressora 3D e extrudados através de um bico circular de 20 mm de diâmetro, com altura de deposição de 12 ± 1 mm.

Para análise no estado endurecido, foram produzidas peças com 5 e 16 camadas, de modo a possibilitar a extração de amostras de dimensões 50 x 50 x 50 mm e 40 x 40 x 160 mm para as três dimensões (X, Y e Z), conforme detalhado na Figura 10. As amostras moldadas foram fabricadas simultaneamente, compactadas com uma haste de compactação em 3 camadas. Cada camada recebeu 0.25 golpes/cm².

Figura 10 - Ilustração do processo de impressão e de retirada das amostras impressas.



Todas as peças foram armazenadas em ambiente com temperatura de 25 °C e umidade 75 ± 5 % por 24 horas e, posteriormente, foram levadas para cura submersa em água por 28

dias. Os cortes nas peças impressas, para obtenção das amostras para análise, foram executados no estado endurecido e com o auxílio de uma máquina equipada com disco de corte diamantado.

Para avaliar o impacto da incorporação de fibras de sisal na propagação de calor através do 3DP-CC, foram produzidos blocos com dimensões de 140 × 140 × 190 mm (Figura 10) utilizando os mesmos parâmetros de impressão definidos nas etapas anteriores.

A Tabela 4 apresenta o quantitativo de amostras produzidas para os ensaios no estado endurecido e de propagação de calor.

Tabela 4 – Quantidade de amostras produzidas para os ensaios no estado endurecido e de propagação de calor.

Ensaio	Dimensão das amostras (mm)	Tipo	Quantidade
Perda de massa e resistência à compressão	50 × 50 × 50	Impresso	450
		Moldado	150
Resistência à flexão	40 × 40 × 160	Impresso	90
		Moldado	30
Aderência entre camadas	50 × 50 × 50	Impresso	90
Blocos – Resistência à compressão e propagação de calor	140 × 140 × 190	Impresso	18

3.4 ENSAIOS DAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

3.4.1 Consistência, capacidade de extrusão de construção das misturas 3DP-CC

Foram realizados ensaios de consistência e viscosidade para auxiliar no entendimento do comportamento das misturas. Foram executados testes de espalhamento na mesa de consistência e profundidade de penetração de cone seguindo as diretrizes apresentadas pela ASTM C 1437 (2020) e ASTM C 780 (2020), respectivamente, nos períodos de 0 min, 15 min, 30 min, 45 min e 60 min após o término da mistura. A viscosidade das argamassas impressas foi avaliada por meio de ensaio de viscosidade rotacional utilizando um viscosímetro IKA® ROTAVISC hi-vi I, acoplado a um sistema de medição do tipo *vane* com quatro lâminas (modelo VAN-SP-4), com 104 mm de comprimento, com uma haste e cada lâmina com uma extensão de 25,4 mm e diâmetro de 12,7 mm. O protocolo experimental consistiu na aplicação de um ciclo completo de histerese, com variação controlada da velocidade angular de 10 a 150 rpm. As medições foram realizadas em intervalos de 10 rpm, avaliando-se os mesmos pontos tanto na etapa crescente quanto na decrescente (Nunes *et al.*, 2023). A viscosidade relativa dinâmica (V_{dr}) no ponto de escoamento das misturas foi determinada com base na curva descendente, no ponto em que os valores apresentaram estabilização e baixa taxa de erro. Além

disso, essa abordagem permitiu a avaliação do comportamento tixotrópico do material a partir da diferença entre as curvas ascendente e descendente do ciclo.

Para entendimento do comportamento das fibras de sisal nas características dos filamentos impressos pelo sistema utilizado e para definir a rotação adequada do sistema de extrusão no momento da impressão, foram realizados testes de extrudabilidade e de capacidade de construção. Dessa forma, a avaliação da extrudabilidade das misturas foi realizada por meio da impressão de um filamento único, com aproximadamente 200 mm de comprimento por um bico de diâmetro de 20 mm, sob diferentes rotações do sistema de extrusão (18, 28, 48, 68 e 78 rpm). A partir desse filamento, foram analisados critérios relacionados à continuidade da extrusão imediatamente após a saída do bico, conforme Jiang *et al.* (2022) e Liu *et al.* (2025), considerando aspectos visuais como: presença de interrupções, falhas, colapsos, variações abruptas da seção transversal e estabilidade dimensional do filamento ao longo de seu comprimento, por meio de medições da largura realizadas em três pontos distintos ao longo da peça impressa, observando possíveis variações dimensionais laterais para as diferentes misturas. Após determinação da rotação adequada para cada mistura, foram realizados testes semelhantes aos realizados por Jia *et al.* (2024a), em que foram impressas pilhas de filamentos com aproximadamente 160 mm de altura para investigação da capacidade de construção, do aspecto visual das camadas e das possíveis falhas nos filamentos.

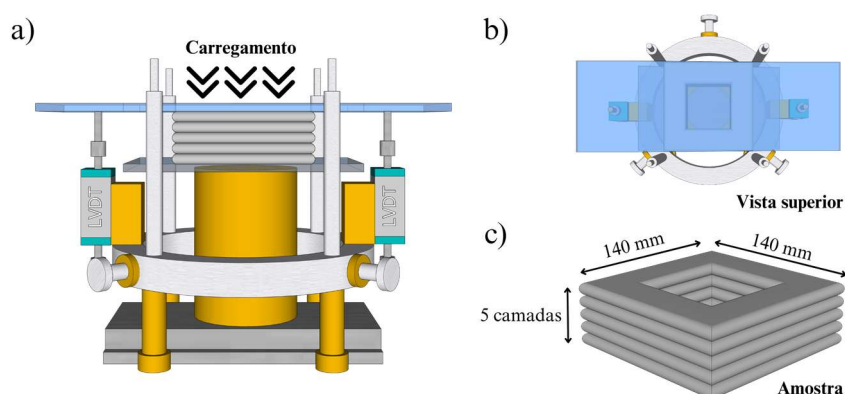
3.4.2 Resistência verde

O ensaio proposto objetiva compreender melhor a deformação e resistência de peças impressas no estado fresco, levando em consideração a influência do processo de extrusão e dos parâmetros de impressão nos filamentos impressos. Este ensaio é particularmente relevante para a tecnologia de impressão 3D, pois simula melhor as condições reais de aplicação, incluindo as tensões iniciais geradas entre as camadas imediatamente após a deposição. A maioria dos testes realizados atualmente para obtenção de deformação e resistência verde auxiliam na compreensão da influência apenas dos parâmetros da mistura, pois são executados utilizando amostras moldadas.

Foi realizada a avaliação da resistência verde, utilizando um sistema de medição montado em laboratório, acoplado diretamente à amostra logo após sua impressão, equipado com dois transdutores de deslocamento variável linear (LVDT), conforme ilustrado na Figura 11a. O teste consistiu na aplicação de carregamento crescente, realizado por meio de placas de peso padronizado (200 gf), e leitura das deformações provocadas sobre um bloco impresso com

formato modelado, conforme a Figura 11c. O bloco foi impresso e imediatamente conduzido para a execução do teste. As amostras utilizadas apresentam dimensões de aproximadamente 140×140 mm em planta, compostas por cinco camadas impressas, e correspondem à metade de um bloco de alvenaria estrutural comercial, seguindo recomendações da ISO/ASTM 52939 (2023), que estabelece que elementos impressos representem componentes reais da construção, visando maior aplicabilidade e validação do processo construtivo.

Figura 11 - Esquema do aparato para o teste de resistência verde (a) com detalhe da vista superior (b) e do modelo da amostra analisada (c).



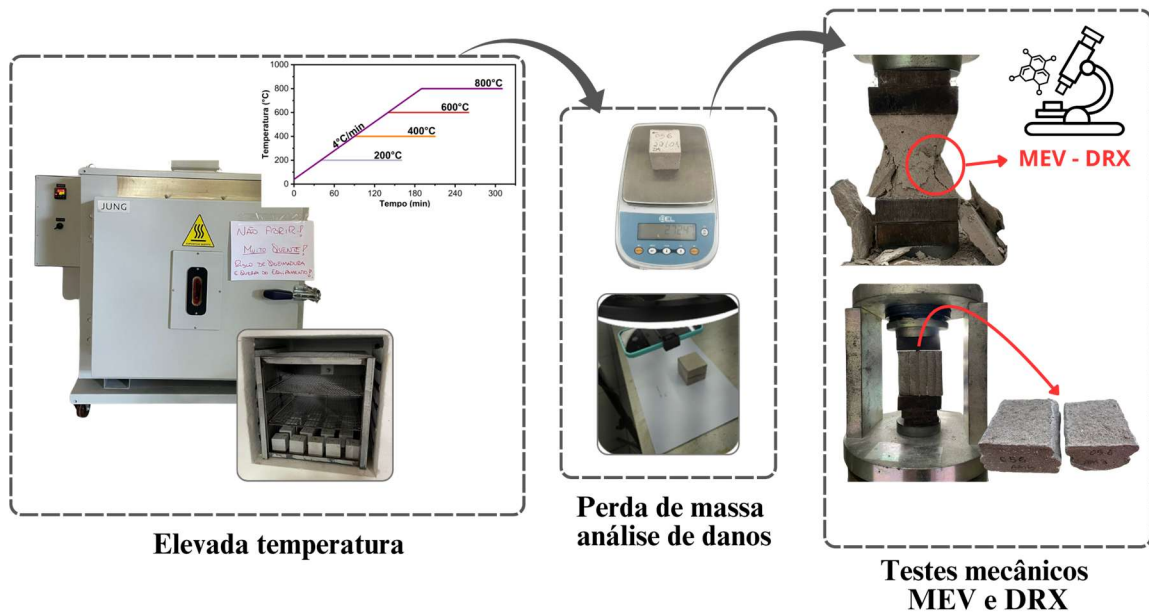
As cargas foram adicionadas sequencialmente a cada aproximadamente 10 segundos até o limite de deslocamento dos LVDTs (24 mm) ou até o colapso do material plástico. Antes do início do carregamento, foi realizada a captura de uma imagem da superfície superior da amostra, com o objetivo de mensurar a área efetiva de aplicação de carga para considerar eventuais irregularidades geométricas oriundas do processo de deposição.

3.5 ENSAIOS DAS PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

3.5.1 Aquecimento das amostras para avaliação

Nesse estudo, para cada mistura e temperatura avaliada, foram analisadas 5 amostras cúbicas moldadas, além de 5 para cada direção de teste nas amostras impressas. Após os 28 dias de cura, as amostras foram secas em estufa por 24 h. Em sequência, foram pesadas, obtidas imagens de suas faces e levadas a um forno com controle de programação (Figura 12), de modo a serem aquecidas a 200, 400, 600 e 800 °C com taxa de aquecimento de 4 °C/min, consistentes com pesquisas anteriores (Arunothayan; Sanjayan, 2023; Dong *et al.*, 2024). Após atingir a temperatura de análise, a temperatura foi mantida por 120 min. Após o aquecimento, as amostras foram resfriadas à temperatura ambiente no forno.

Figura 12 - Esquema ilustrando a sequência para análise em elevada temperatura.



Ao término do resfriamento, quando as amostras chegavam à temperatura ambiente, foram retiradas do forno, novamente pesadas e capturadas imagens de suas faces, para verificação da sua aparência, de possíveis danos e determinação de sua perda de massa causados pelo ciclo de temperatura. As amostras foram, então, submetidas ao ensaio de compressão. Amostras submetidas ao MEV e DRX foram extraídas a aproximadamente 1 cm da face das peças cúbicas após a ruptura. Ensaio de aderência foram realizados em espécimes mantidos à temperatura ambiente e após exposição a ciclos de 400 e 600 °C, devido ao aumento da degradação das fases hidratadas e ao maior risco de fissuração nesses níveis.

3.5.2 Resistência à tração na flexão e à compressão

As avaliações da tração na flexão e compressão foram realizadas em três direções de teste (Figura 10) (ABNT, 2005; ASTM C109/C109M-21, 2021; ASTM C348, 2021). Os testes de tração na flexão foram executados em amostras não aquecidas utilizando corpos de prova prismáticos de 40 × 40 × 160 mm extraídos de peças impressas, conforme ilustrado na Figura 10, e moldadas após aos 28 dias de cura. Foram ensaiadas 5 amostras para cada situação, a uma taxa de carga de 50 N/s.

No teste de resistência à compressão foram analisadas amostras cúbicas extraídas da impressão, com 50 mm de aresta nas três diferentes direções e amostras moldadas de mesmas dimensões. Para cada análise foram ensaiadas 5 amostras, resultando em 20 amostras por composição por temperatura. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em até 24 h após o término do ciclo de temperatura e taxa de carga do teste foi de 500 N/s.

Para avaliar quantitativamente a extensão da anisotropia gerada durante o processo de impressão 3D, a razão entre as resistências máxima e mínima foram testadas entre diferentes direções de amostras impressas e calculada pela através da Equação 1, conforme proposto por Zhang *et al.* (2023). Nesse caso, quanto menor a diferença nas forças medidas nas direções de variação, a taxa de anisotropia é mais próxima de 1, e vice-versa.

$$R_{a,c} = \frac{\delta_{c,max}}{\delta_{c,min}} \quad \text{Equação 1}$$

Em que: $R_{a,c}$ é a razão de anisotropia para resistência à compressão, $\delta_{c,max}$ e $\delta_{c,min}$ referem-se à resistência máxima à compressão e à resistência à compressão mínima entre várias direções.

3.5.3 Aderência entre camadas

O procedimento para o ensaio de aderência entre camadas foi determinado com base na literatura (Barbosa *et al.*, 2022b; Dias *et al.*, 2024b; Ting *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2025). As amostras extraídas da impressão, com comprimento de 50 mm e 5 camadas de impressão, foram submetidas à uma carga aplicada axialmente através de dois cutelos de madeira posicionados paralelamente entre si. Os cutelos foram colocados entre a 3ª e a 4ª camadas de impressão (Figura 12), para assegurar que a falha ocorresse nessa região. A carga foi aplicada por meio de uma prensa hidráulica servo controlada (modelo XYZ-3000), equipada com célula de carga com capacidade máxima de 20 kN. A resistência da aderência foi calculada através da Equação 2.

$$\sigma = \frac{2P}{\pi A} \quad \text{Equação 2}$$

Em que: σ = resistência de aderência entre camadas (MPa); P = carga máxima aplicada (N) e A = área de ruptura do corpo-de-prova (mm²).

As peças impressas foram cortadas com auxílio de máquina com disco de corte diamantado. Para cada mistura e temperatura avaliadas, foram ensaiadas 5 amostras, sendo estas submetidas a uma velocidade de carga de 2,5 mm/min até a separação das camadas.

3.5.4 DRX e MEV das amostras submetidas ao aquecimento

Após ruptura dos espécimes impressos submetidos ao teste mecânico de compressão, foram extraídas amostras localizadas a aproximadamente 10 mm de suas superfícies, para realização das análises de MEV e DRX.

Para DRX, foram analisadas amostras das misturas REF-C e REF-LFMK para todas as temperaturas definidas no plano experimental. As amostras foram quebradas com auxílio de almofariz e pistilo e passadas em peneira de 200 mesh. A análise foi executada em um difratômetro de raios-X da Shimadzu, modelo LabX XRD-6000. As medidas foram realizadas na linha $\text{CuK}\alpha$, velocidade de varredura de $1^\circ/\text{min}$, passo de $0,02^\circ$ e com ângulo variando de 5° e 60° . O MEV foi realizado em amostras da mistura SF05%12, nas temperaturas ambiente e 400°C , com o objetivo de avaliar a interface fibra-matriz e a degradação da fibra de sisal. A superfície das amostras foi metalizada com ouro e analisada em um *scanning electron microscopy* TESCAN, model VEG4.

3.6 TESTE DE AVALIAÇÃO DE PROPAGAÇÃO DE CALOR NO 3DP-CC

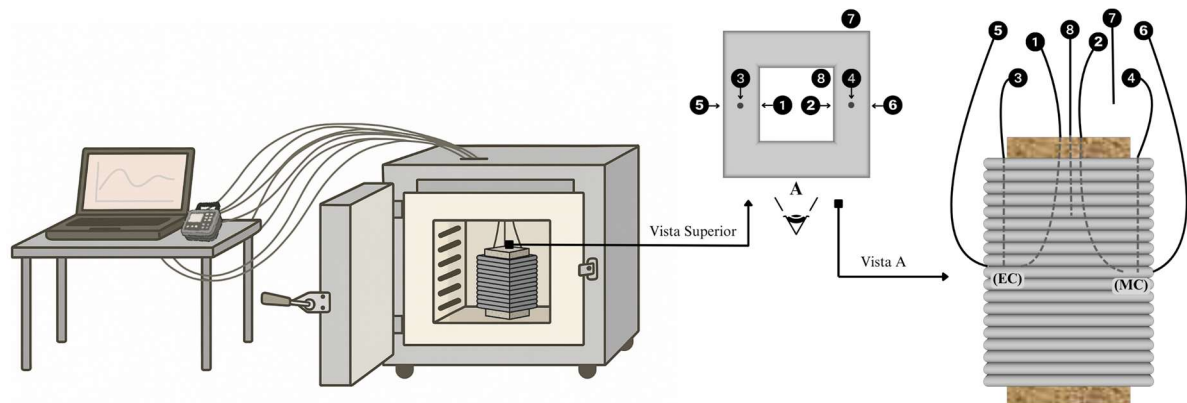
Para avaliar o impacto da incorporação de fibras de sisal na propagação de calor através do 3DP-CC, foram selecionadas duas misturas: REF-LFMK e SF05%12. Esta última foi definida com base nos resultados do estado endurecido, por ter apresentado o melhor desempenho sob condições de elevada temperatura. Para o monitoramento da propagação de calor no 3DP-CC, estabeleceram-se temperaturas de 400°C e 600°C , cujos resultados foram comparados aos obtidos para amostras não aquecidas. Para cada combinação de mistura e temperatura, foram produzidos três blocos, sendo um deles destinado ao controle da propagação de calor.

Após 28 dias de cura, a superfície superior dos blocos impressos foi nivelada utilizando uma máquina de corte e uma lixadeira mecânica. As dimensões reais foram determinadas por meio de medições com paquímetro. Em seguida, os blocos foram secos em estufa a 105°C e pesados em balança digital com precisão de 0,1 g.

Para a medição da temperatura representativa, foram instalados termopares minerais tipo N, com diâmetro de 3 mm, em oito pontos distintos, conforme ilustrado na Figura 13. Com o objetivo de analisar a propagação de calor entre camadas, três termopares foram posicionados na interface entre duas camadas: um na face externa, um no interior e outro na face interna.

Para avaliar passagem de calor através de uma camada, outros três termopares foram instalados em sua região central, também distribuídos entre a face externa, o interior e a face interna. Adicionalmente, um termopar foi colocado fora do bloco, para medir a temperatura interna do forno, e outro foi instalado na cavidade oca do bloco.

Figura 13 - Esquema da montagem do ensaio de propagação de calor para blocos 3DP-CC.



Para garantir que o calor fosse transferido exclusivamente pelas paredes dos blocos, estes foram isolados termicamente na parte inferior e superior com placas refratárias fixadas por meio de argamassa refratária.

Os blocos foram submetidos a aquecimento em forno com controle programável, sendo levados até a temperatura-alvo de 400 °C ou 600 °C, com taxa de aquecimento de 4 °C/min. Após atingir a temperatura definida, esta foi mantida por 120 min. Em seguida, as amostras foram resfriadas naturalmente até a temperatura ambiente no interior do próprio forno, apenas com o orifício de exaustão aberto. As temperaturas da superfície e do interior do concreto foram monitoradas em tempo real por meio de um *data logger* de 8 canais, com precisão de $\pm 0,8$ °C, taxa de amostragem de 1 min (com todos os canais ativados) e capacidade de registro contínuo por até 24 h. Ao término do ensaio, os dados foram exportados, possibilitando a obtenção das curvas de aquecimento e resfriamento.

Ao final do resfriamento, com as amostras já em temperatura ambiente, o aparato foi desmontado e os blocos retirados do forno. Imagens das suas superfícies foram capturadas e, em seguida, foram novamente pesados para avaliação da perda de massa decorrente do ciclo térmico. Posteriormente, os blocos foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão, conforme a norma NBR 12118 (ABNT, 2013). Para determinação da resistência à compressão, foi considerada a carga de rompimento e a área líquida dos blocos, definida a partir de imagens de suas faces.

Após rompimento, amostras destinadas às análises de DRX, MEV e análise térmica (TG/DTG) foram extraídas de três regiões distintas de cada peça: face interna, face externa e região central da camada de impressão. Uma amostra do bloco não aquecido da mistura SF05%12 foi direcionada para as mesmas análises.

As análises de DRX foram executadas em um difratômetro de raios-X Bruker D2-Phaser do laboratório de Tecnologia Mineral da Universidade Federal do Pernambuco. As medidas foram realizadas na linha $\text{CuK}\alpha$, velocidade de varredura de $1^\circ/\text{min}$, passo de $0,02^\circ$ e com ângulo variando de 5 e 60° .

As análises de microscopia eletrônica de varredura foram realizadas no LABCEM-UFRN, utilizando um microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo (FEG) modelo ZEISS Auriga 40. As amostras, provenientes do ensaio de resistência à compressão dos blocos, tiveram suas superfícies de fratura expostas no momento do rompimento, sendo estas utilizadas para a obtenção das imagens.

O equipamento utilizado para análise termogravimétrica e termogravimétrica diferencial foi a termo balança DTG-60, da Shimadzu, disponível no LSRAP-UFPB. As amostras foram submetidas à razão de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ até 1000°C . Foi utilizado cadinho de alumina e atmosfera de gás nitrogênio com vazão de $50\text{ ml}/\text{min}$.

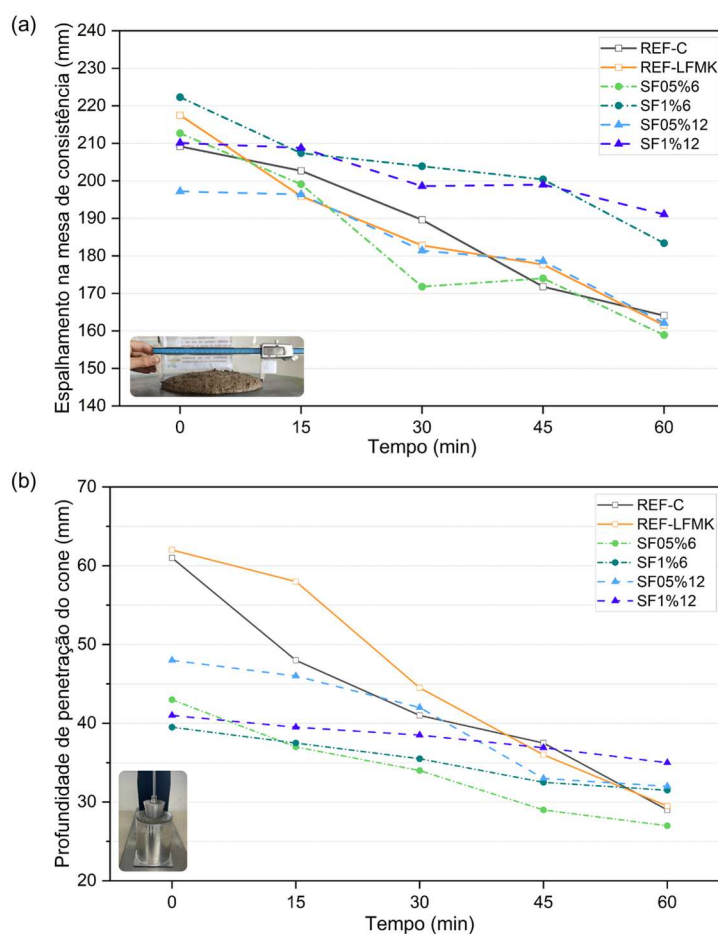
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES FORMULADAS

4.1.1 Análise de consistência, extrudabilidade e construtibilidade

Os resultados de consistência, avaliados pelos ensaios de espalhamento na mesa de consistência e da profundidade de penetração de cone, são apresentados na Figura 14. A presença e o aumento do tamanho e teor de fibra alterou o comportamento reológico do compósito, diminuindo a consistência das misturas inicialmente e reduzindo a perda de consistência das misturas com o tempo. Essa menor perda de consistência pode estar associada à liberação gradativa da água previamente absorvida pelas fibras durante a mistura, fenômeno também relatado por Acosta-Calderon *et al.* (2022) durante a hidratação do cimento.

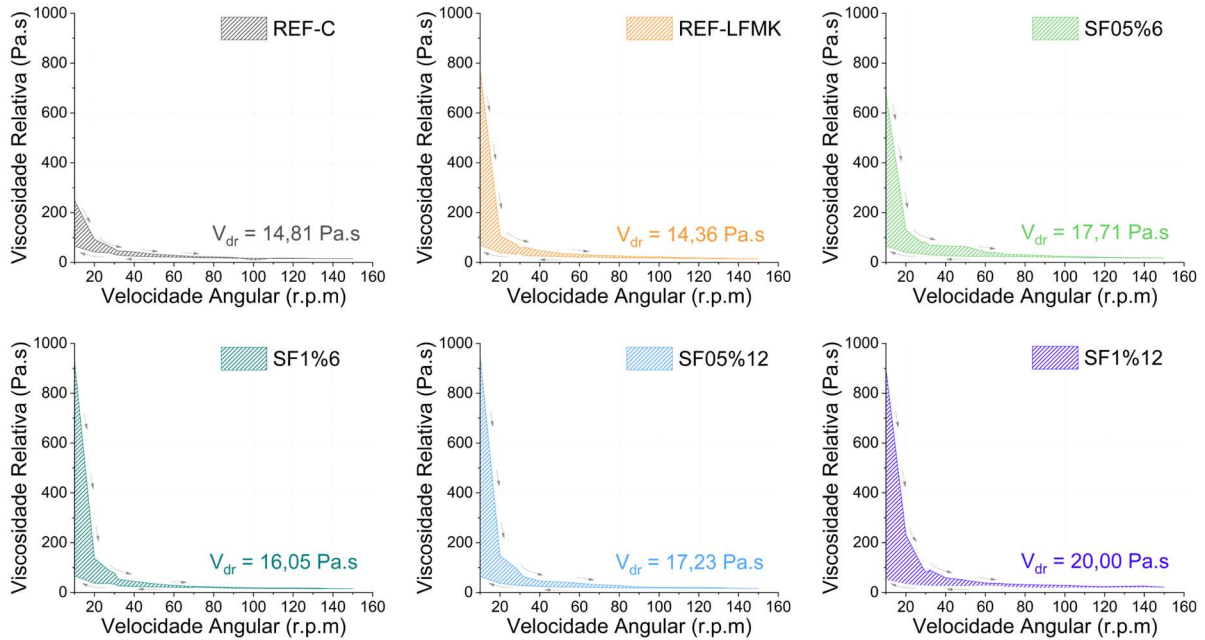
Figura 14 - Misturas 3DP-SFCC: resultados de espalhamento na mesa de consistência (a) e de profundidade de penetração do cone (b).



As viscosidades das misturas 3DP-SFCC avaliadas são apresentados na Figura 15 e revelam um comportamento pseudoplástico tixotrópico, evidenciado pela diminuição na

viscosidade relativa com o aumento da rotação seguida de recuperação parcial da viscosidade com a diminuição da rotação. As composições com adições minerais e fibras apresentaram maiores diferenças entre a ruptura e o acúmulo estrutural.

Figura 15 - Viscosidade das misturas 3DP-SFCC.



As presenças do fíler calcário, do metacaulim e das fibras de sisal contribuíram para o aumento da tensão de escoamento e das viscosidades relativas dos compósitos em todas as velocidades angulares avaliadas, mesmo com o incremento da dosagem de superplastificante. Nesse contexto, Xue *et al.* (2025) ressaltam que materiais de alta reatividade e granulometria fina, como o metacaulim, tendem a elevar a tensão de escoamento estática e a viscosidade plástica da pasta.

As viscosidades relativas dinâmicas (V_{dr}) das misturas com fibras variaram entre 17,71 e 20,00 Pa.s e o maior valor observado, para SF1%12, representou um aumento de 39 % em relação à mesma matriz sem fibras. Isso ocorre porque fibras naturais como o sisal introduzem obstáculos mecânicos ao fluxo e absorvem água da mistura, aumentando o atrito entre partículas e contribuindo para uma maior coesão da mistura Varela *et al.* (2024).

A Figura 16 e a Figura 17 apresentam os resultados do teste de capacidade de extrusão e o aspecto visual dos filamentos durante os testes, respectivamente. Foi revelado que, conforme esperado, as larguras dos filamentos aumentam com a elevação da rotação da extrusão. Entre as misturas sem fibra, considerando as mesmas rotações, não houve diferença considerável na extrudabilidade. Entretanto, a inserção de fibras ocasionou uma diminuição da largura dos

filamentos, chegando ao comportamento de aglomeração de fibras e bloqueio do filamento para as misturas com 1% de fibras de sisal com 18 rpm. Além disso, as misturas com 1 % de fibra apresentaram descontinuidades e dificuldades na impressão do filamento, quando utilizadas a rotações de até 28 rpm.

Figura 16 - Capacidade de extrusão das misturas 3DP-SFCC.

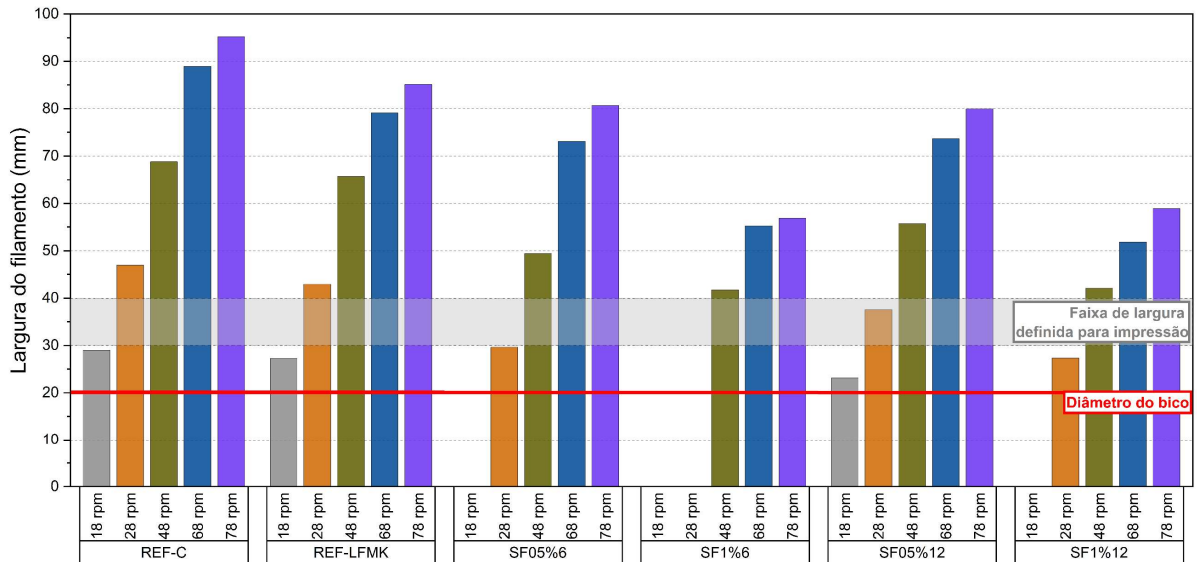
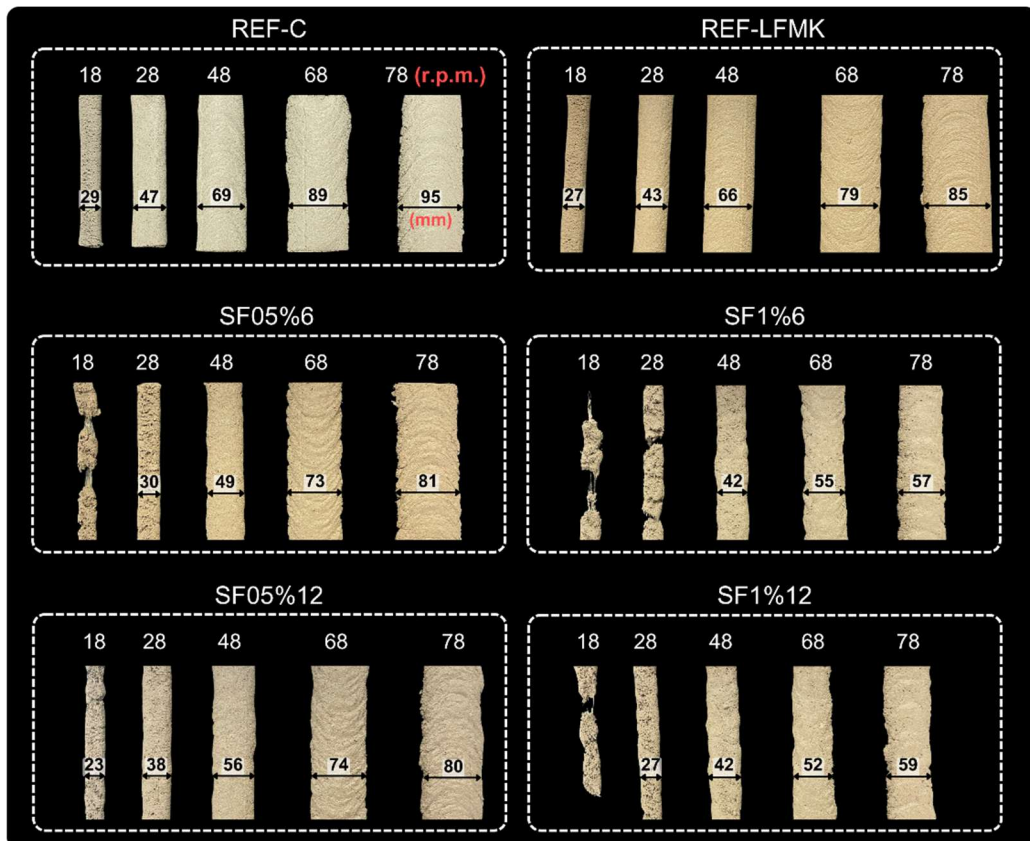


Figura 17 - Filamentos impressos apresentando a respectiva largura para cada rotação durante o ensaio de avaliação da capacidade de extrusão das misturas 3DP-CC.



Varela *et al.* (2024) e Ma *et al.* (2024) também comprovaram que à medida que o teor e o comprimento da fibra aumentam, a extrudabilidade diminui, levando a irregularidades na superfície, com furos e rachaduras nos filamentos impressos, o que evidencia a importância de testes de extrudabilidade e construtibilidade para cada sistema de impressão a ser utilizado.

Desse modo, a presença da fibra, principalmente em maior quantidade (1 % de adição), aumentou a tensão de escoamento e a consistência das misturas, aqui evidenciado pela necessidade de uma maior energia de rotação para manutenção do fluxo pelo sistema de extrusão. Esse comportamento evidenciado em estudos anteriores (Boddepalli; Gandhi; Panda, 2024; Cao; Xu; Zhang, 2016; Hou *et al.*, 2024) pode ser explicado pelo aumento de interação entre partículas sólidas, com possíveis aglomerações que dificultam o fluxo de partículas, além da provável redução do filme de água ao redor das partículas, provocado pela maior área superficial das adições e pela absorção de água das fibras, que tendem a aumentar a força de atrito entre fibras e entre agregado e fibra.

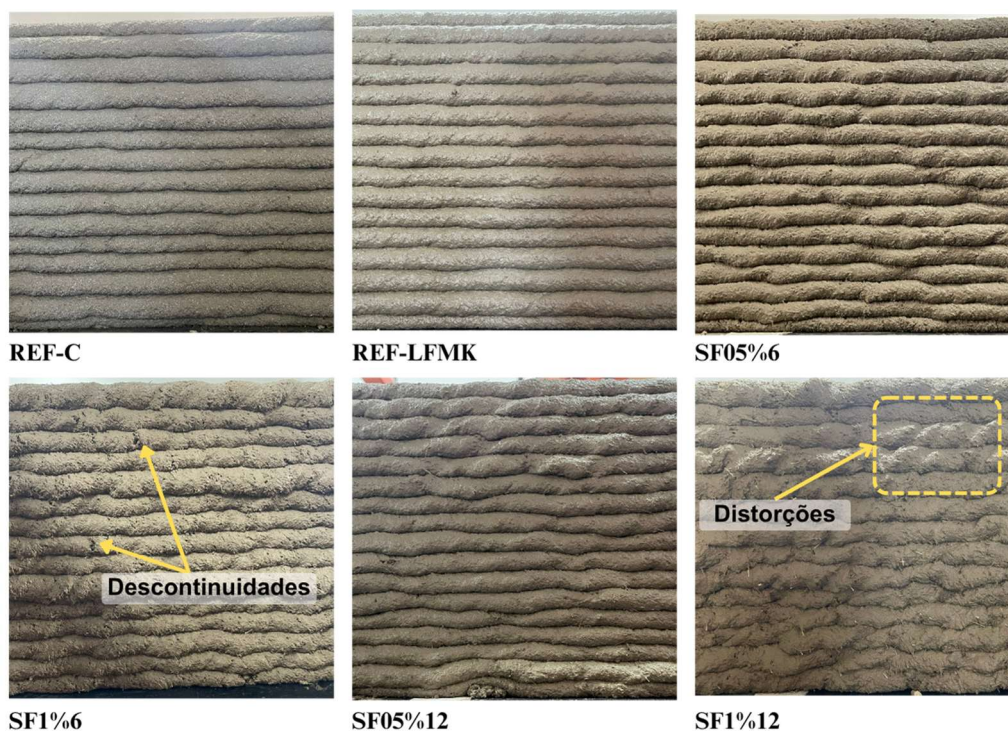
Considerando que a extrudabilidade dos materiais para impressão 3DP é considerada excelente quando a largura do filamento extrudado é igual ou próxima ao diâmetro do bico de extrusão, desde que a extrusão ocorra de forma contínua e uniforme (Jiang *et al.*, 2022), foi possível determinar que as misturas com 0,5 % de fibras de sisal obtiveram melhor desempenho de extrusão, pois foi possível imprimir em baixas rotações filamentos contínuos, uniformes e com larguras mais próximas da largura do bico. Essa condição indica mínima deformação lateral após a extrusão, com boa coesão da mistura e alta estabilidade geométrica. Dentro dessa perspectiva, a mistura SF05%12 apresentou melhor desempenho de extrusão dentre as misturas com fibras, com apenas 16 % de aumento de largura do filamento em relação ao diâmetro do bico. A mistura com 1 % de fibra de 6 mm apresentou maior dificuldade de extrusão, exigindo maiores energias para o material ser extrudado, o que resultou em uma largura do primeiro filamento imprimível já 109 % maior do que o diâmetro do bico pela necessidade de maior rotação na extrusão. Desse modo, é possível inferir que a presença de fibras contribui para a estabilidade geométrica desejada na impressão 3D, mas é necessário equilibrar sua quantidade para garantir deformabilidade sem dificultar a extrusão.

As rotações para impressão das peças para análise no estado fresco e endurecido foram definidas como 28 ± 2 rpm para as misturas sem fibra e com 0,5 % de fibra, de modo a obter camadas com largura de 35 ± 5 mm. Nas misturas com 1 % de fibra, para viabilizar a continuidade na impressão do filamento e o melhor aspecto visual da camada, além de evitar

bloqueios, irregularidades e má qualidade da extrusão, foi necessário aumentar a rotação para 68 ± 2 rpm.

Definidas as rotações a partir do ensaio de extrudabilidade, o teste de construtibilidade foi realizado e imagens dos filamentos impressos são apresentadas na Figura 18. É observado que a impressão das misturas sem fibras resulta na deposição de um filamento linear sem falhas, gerado pelo fluxo contínuo da mistura. A inserção de fibras degrada o aspecto visual da impressão, evidenciando falhas de impressão e distorções ao longo dos filamentos, conforme destacado na Figura 18. Com o aumento do teor de fibras nas misturas, houve um aumento de rachaduras aparentes na lateral e continuidade imperfeita, embora não tenha ocorrido interrupção durante o processo de impressão.

Figura 18 - Aspecto visual dos filamentos impressos durante o ensaio de construtibilidade.



As misturas com 0,5 % de fibras de sisal obtiveram boa aparência dos filamentos, embora com apresentação de pequenas irregularidades na superfície. A presença das fibras também evidenciou uma maior altura das camadas e uma transição de superfície lisa para áspera, provavelmente gerada pelo aumento da consistência das misturas e pela maior dificuldade de a mistura passar pelo bico de impressão. Com 1 % de fibras de sisal, os filamentos extrudados apresentaram maiores distorções, com pequenas rachaduras ou quebras na superfície. Apesar da presença de algumas falhas nas misturas com 1 % de fibras de sisal, a

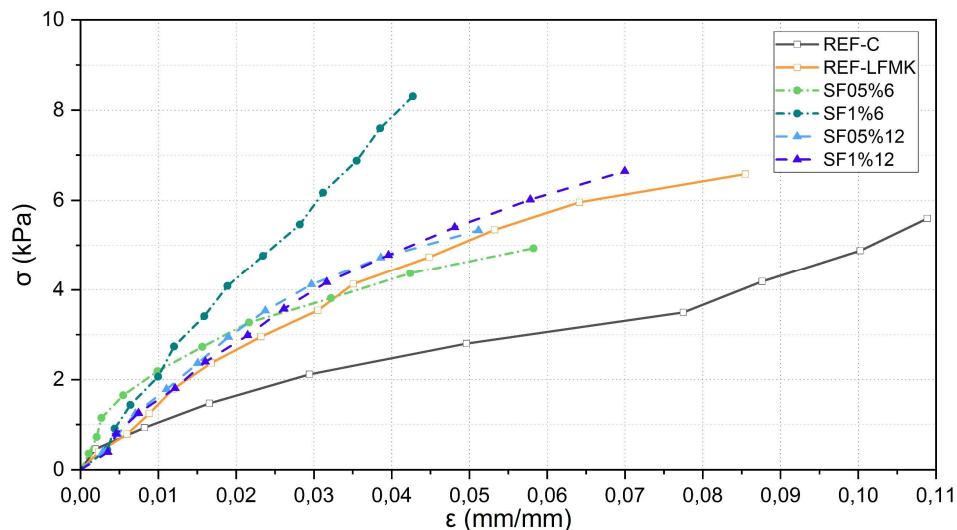
qualidade de impressão foi considerada aceitável, pois foi possível construir as peças projetadas no *software* de forma contínua e ininterrupta.

4.1.2 Resistência verde

A Figura 19 apresenta os resultados de resistência verde para cada composição. De maneira geral, os blocos das misturas com substituição parcial do cimento por adições minerais apresentaram menores deformações para um mesmo nível de tensão aplicada durante o teste, evidenciando a importância da presença das adições, especialmente o metacaulim, para obtenção de filamentos menos deformáveis e impressões com maior capacidade de construção. Para uma carga de 2,0 kPa, a deformação da amostra de REF-C foi aproximadamente 100 % maior do que em REF-LFMK.

Desse modo, a presença da fibra, principalmente em maior quantidade (1 % de adição), aumentou a tensão de escoamento e a consistência das misturas, aqui evidenciado pela necessidade de uma maior energia de rotação para manutenção do fluxo pelo sistema de extrusão. Esse comportamento evidenciado em estudos anteriores (Boddepalli; Gandhi; Panda, 2024; Cao; Xu; Zhang, 2016; Hou *et al.*, 2024) pode ser explicado pelo aumento de interação entre partículas sólidas, com possíveis aglomerações que dificultam o fluxo de partículas, além da provável redução do filme de água ao redor das partículas, provocado pela maior superfície específica das adições e pela absorção de água das fibras, que tendem a aumentar a força de atrito entre fibras e entre agregado e fibra.

Figura 19 - Diagrama tensão-deformação das misturas.



A maior resistência verde ao longo do ensaio para as misturas com MK, mesmo com dosagens mais elevadas de SP, está bem relacionada com a viscosidade nas primeiras rotações.

O teste de viscosidade demonstrou uma maior resistência inicial ao deslocamento, sugerindo uma tensão de escoamento mais elevada nas misturas contendo metacaulim. Assim, de acordo com as propriedades reológicas avaliadas anteriormente, a presença de adições minerais resulta em um aumento das viscosidades iniciais e da coesão das misturas, podendo gerar misturas com maior capacidade de construção.

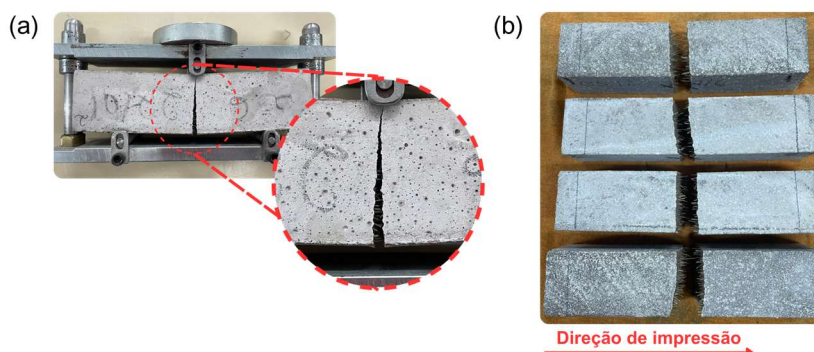
A mistura SF1%6 apresentou maior capacidade de construção, evidenciada por menores deformações quando sob carregamentos, reduzindo a deformação em aproximadamente 75 % quando comparada com REF-C. Esse resultado está em consonância com os resultados dos testes de consistência e extrudabilidade, que indicaram SF1%6 uma mistura mais consistente e viscosa.

4.2 CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO E SOB ELEVADAS TEMPERATURAS

4.2.1 Resistência à tração na flexão

Os testes foram executados e a Figura 20 ilustra o modo de ruptura dos corpos de prova durante o ensaio de resistência à tração na flexão, com detalhe para a evidência sobre o alinhamento das fibras na direção da impressão, que estão orientadas paralelamente à direção de impressão. Alchaar e Al-Tamimi (2021) atribuíram esse alinhamento ao fato de que a pressão exercida durante a extrusão ajuda a orientar as fibras nessa direção.

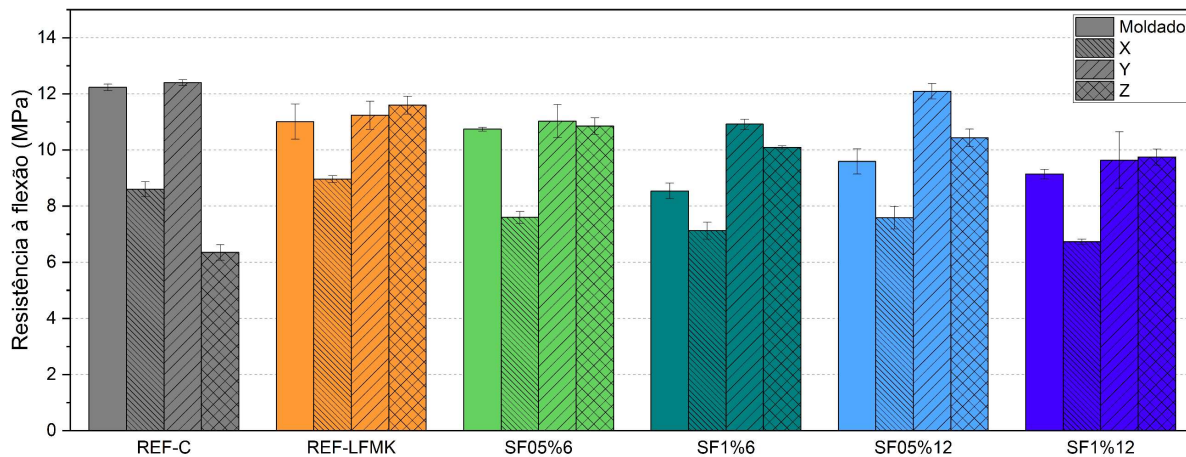
Figura 20 - Espécimes após ensaio de resistência à tração na flexão evidenciando o modo de ruptura (a) e o direcionamento das fibras na direção de impressão (b).



A Figura 21 apresenta os resultados de resistência à tração na flexão das misturas 3DP-SFCC desenvolvidas com diferentes dosagens de fibras de sisal. A incorporação das fibras de sisal apresentou uma tendência muito semelhante de desenvolvimento de capacidade de

resistência à flexão nas diferentes direções analisadas quando comparado com a mesma matriz sem fibras (REF-LFMK).

Figura 21 - Resistência à flexão de espécimes moldados e impressos não aquecidos.



A presença de fibras de sisal manteve ou proporcionou aumento na resistência à flexão no eixo Y em relação ao REF-LFMK, que pode ser explicado pelo alinhamento das fibras ao longo da direção de impressão verificado em estudos anteriores (Ma *et al.*, 2022a; Varela *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2023; Zhou *et al.*, 2022) e evidenciado nas imagens dos ensaios apresentadas na Figura 20. Nesse caso, as fibras orientadas perpendicularmente aos planos das fissuras desempenham um papel na contenção e redução da propagação da fissura (Warsi; Panda; Biswas, 2023).

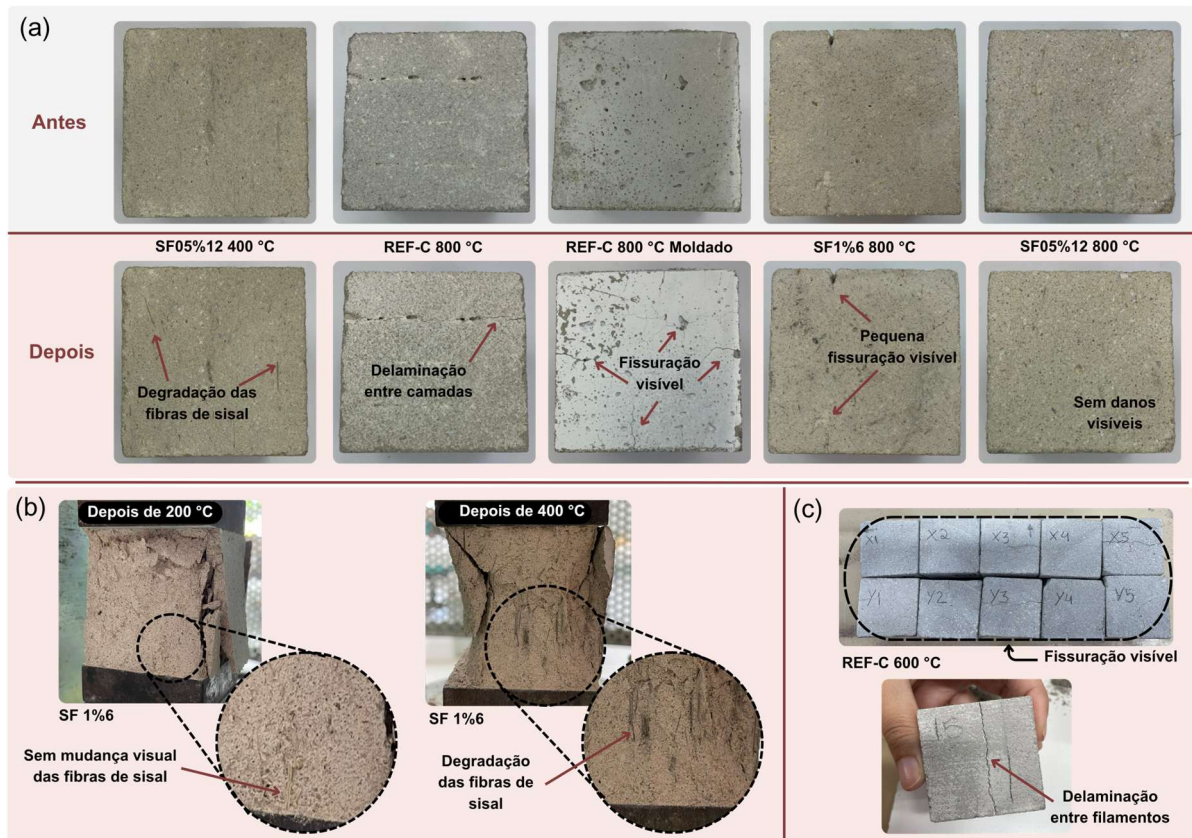
Houve discreta perda de resistência à flexão no eixo X nas misturas com fibras. Esse comportamento pode ser explicado pela geração de falhas e maior porosidade entre camadas impulsionada pelo direcionamento das fibras durante a impressão. A mistura SF1%12 apresentou menor resistência à flexão em todas as direções, o que pode estar relacionado com a maior dificuldade de dispersão das fibras e consequente formação de aglomerados ou vazios de maior porte, evidenciados nos testes de extrudabilidade. Adicionalmente, a presença de falhas durante a impressão, com filamentos mais irregulares (Figura 18), pode ter introduzido pontos de fragilidade nas peças SF1%12 e reduzido seu desempenho.

4.2.2 Danos superficiais e perda de massa do 3DP-CC após aquecimento

A aparência dos espécimes após exposição a altas temperaturas foi observada e foram captadas imagens de suas superfícies. A Figura 22a apresenta algumas das imagens que representam marcos no comportamento do 3DP-SFCC com fibras de sisal quando sob temperaturas elevadas. Após 200 °C houve discreta mudança de coloração em todas as

composições avaliadas, causada pela evaporação gradual da água da pasta de cimento, bem como pelo processo progressivo de remoção da água quimicamente ligada aos hidratos de cimento (Hager, 2014). Nessa temperatura, as fibras de sisal não apresentaram mudanças visuais (Figura 22b) e possivelmente não devem ter apresentado enfraquecimento devido a baixa quantidade de hemicelulose em sua composição, que é responsável pela maior parte do comportamento de degradação térmica das fibras naturais (Teixeira *et al.*, 2019).

Figura 22 - Alterações observadas nos espécimes de diferentes composições após a exposição à elevadas temperaturas, com imagens de antes da entrada no forno para comparativo (a); Aparência da fibra nos espécimes após 200 °C e 400 °C (b); Indicação de danos nos espécimes da composição REF-C após submissão ao ciclo de 600 °C (c).



Após 400 °C, como apresentado na Figura 22b, é perceptível o escurecimento na coloração da fibra, que já apresenta degradação significativa, gerada pela decomposição da hemicelulose, lignina e da celulose, como indicado na termogravimetria apresentada na Figura 7b. A matriz também apresenta mudança de coloração provocada pela oxidação dos sais ferrosos e os hidróxidos de ferro amorfos presentes no agregado, que ocorre na faixa de 250 °C a 300 °C (Chakrabarti; Yates; Lewry, 1996; Short; Purkiss; Guise, 2001). Adicionalmente, segundo Chen, Li e Chen (2009), nessa temperatura, a água do silicato de cálcio hidratado intercamada (C-S-H gel) e parte da água combinada do C-S-H gel intercamada e dos hidratos

de sulfoaluminato evaporam, o que deve ocasionar perda de massa e intensificar a mudança de coloração da matriz.

A 600 °C as amostras REF-C apresentaram, adicionalmente, fissuração de delaminação (Figura 22c), devido à distribuição concentrada de grandes poros nas relações entre camadas, resultado também encontrado por Xiao *et al.* (2021a) e Luo, Li e Wang (2024). Nessa temperatura, ocorreram também fissuras paralelas às faces, ocasionadas possivelmente pelas tensões de autoequilíbrio (causadas por deformações térmicas incompatíveis) quando o concreto é rapidamente aquecido ou resfriado e os gradientes de temperatura são altos e pela dissociação do hidróxido de cálcio ocorrida em torno de 530 °C, que causa retração (Chen; Li; Chen, 2009). Arioz (2007) também realizou observação visual de amostras de concreto submetidas a temperaturas elevadas e percebeu que as trincas superficiais se tornaram visíveis quando a temperatura atingiu 600 °C. Nessa temperatura, as misturas REF-LFMK com e sem fibras permaneceram apresentando somente diferença de coloração da matriz e das fibras.

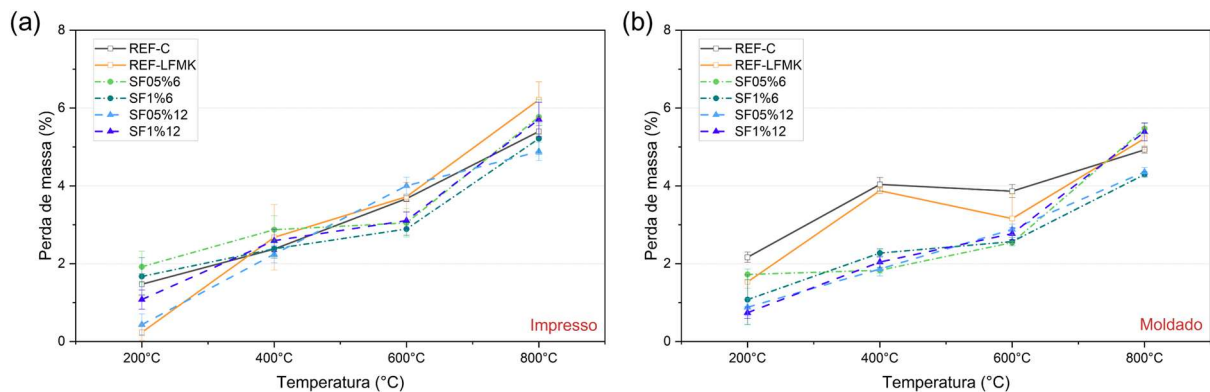
Após 800 °C as misturas sem fibras e com fibras de 6 mm apresentaram fissuração semelhantes às apresentadas no REF-C a 600 °C, mostrando que a presença das fibras conseguiu retardar o aparecimento de danos no 3DP-CC. Esse comportamento é atribuído à degradação das fibras de sisal, que estabelecem rotas de liberação de pressão de vapor mais rápidas em temperaturas mais altas. Desse modo, todas as amostras avaliadas mantiveram boa integridade ao final de todos os ciclos de temperatura, não havendo lascamento explosivo, e os espécimes com fibras de sisal de 12 mm não apresentaram nenhuma fissuração após a exposição a temperaturas elevadas, demonstrando que o tamanho da fibra parece ter mais influência na redução dos danos causados pelo aumento da temperatura no 3DP-SFCC do que o teor.

Nas amostras moldadas, de maneira geral, os danos foram semelhantes aos encontrados nas amostras impressas e ocorreram nas mesmas temperaturas. As diferenças observadas estão na maior intensidade da fissuração nas amostras moldadas e na posição das fissuras, que nas misturas impressas foram de delaminação em alguns momentos e nas amostras moldadas apresenta um aspecto de mapeamento. Desse modo, o processo de impressão não alterou de forma significativa o aparecimento de danos nos compósitos avaliados após o aquecimento.

Os resultados de perda de massa, apresentados na Figura 23, mostram que, à medida que a temperatura aumenta, uma mudança perceptível na taxa de perda de massa pode ser observada. O comportamento de perda de massa das amostras impressas foi semelhante às

amostras moldadas, indicando pouca interferência do processo de impressão. Para as amostras expostas à temperatura alvo de 200 °C, a perda de massa indica a perda de água capilar devido à evaporação (Arunothayan; Sanjayan, 2023), apresentando uma média de perda de massa de 1,15 % nas amostras impressas. A 400 °C, a perda de massa aumenta, chegando a 2,9 % nas amostras impressas, provocada pela evaporação da água intercamada do C-S-H e parte da água combinada do C-S-H gel e do sulfoaluminato de cálcio hidratado, que ocorrem após 300 °C (Chen; Li; Chen, 2009; Zhou *et al.*, 2025). Nessa fase, como apresentado na Figura 7b, ocorre também uma degradação significativa das fibras de sisal, gerada pela decomposição da hemicelulose e degradação da lignina e da celulose. Na temperatura aproximada de 530 °C, é esperado que ocorra a quebra do hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) (Arunothayan; Sanjayan, 2023) seguida pelo avanço da carbonização das fibras de sisal, o que contribui fortemente para a perda de massa média de 3,33 % a 600 °C. A 800 °C, a perda de massa se torna ainda mais expressiva, atingindo 6,2 % para as amostras impressas com REF-LFMK, principalmente com a decomposição dos carbonatos e do C-S-H gel (Peng; Huang, 2008). Os resultados indicaram que as fibras de sisal pouco afetaram a perda de massa neste estudo, possivelmente devido à sua quantidade limitada (0,5 % e 1,0 % em volume).

Figura 23 - Perda de massa de espécimes impressos (a) e moldados (b) expostos a elevadas temperaturas.

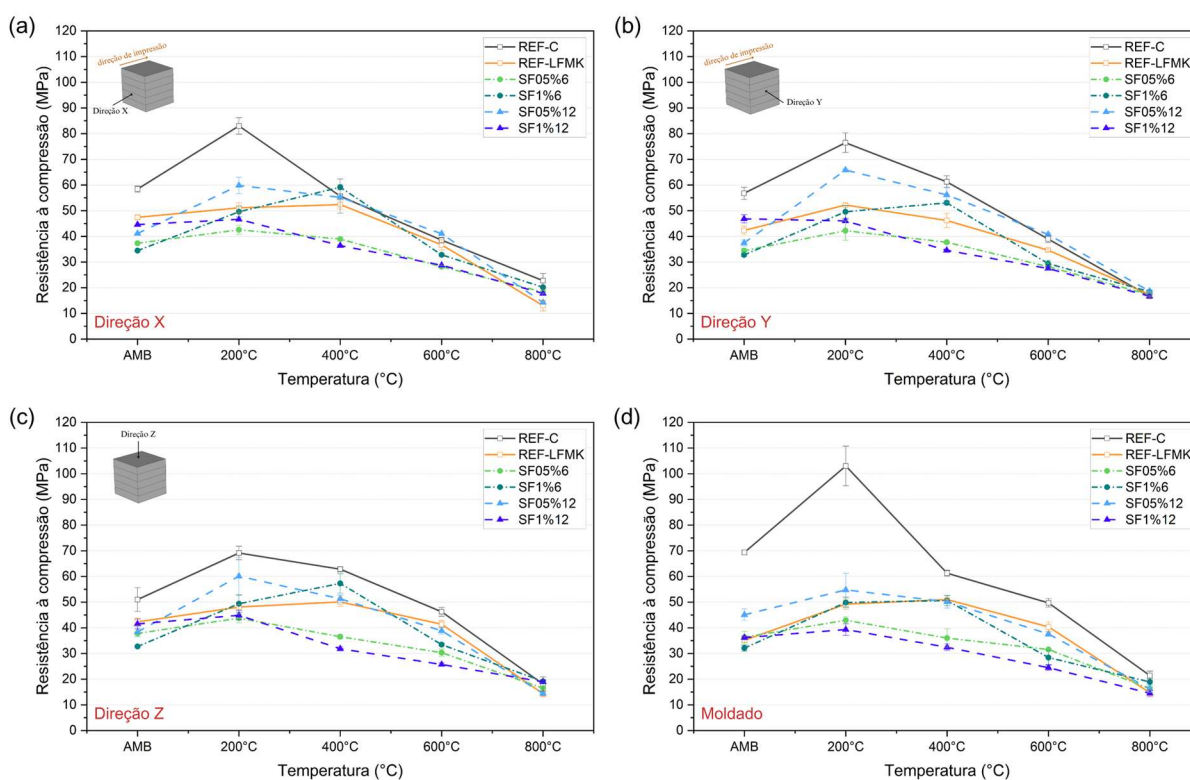


4.2.3 Resistência à compressão

Os resultados de resistência à compressão das misturas moldadas e impressas em 3D com fibras de sisal foram plotados separadamente para cada direção de teste e são mostrados na Figura 24. Todos os espécimes, moldados e impressos, apresentaram duas superfícies de ruptura cônicas diagonais, indicando alto grau de compactação das amostras. Os valores de resistência à compressão de amostras impressas e não aquecidas produzidas com diferentes teores de fibras de sisal variaram entre 32 a 46 MPa, enquanto a variação foi 42 a 58 MPa nas

misturas de referência. É perceptível que, de forma geral, em amostras não aquecidas, a inserção das fibras de sisal reduz a resistência à compressão das peças impressas 3D, o que pode ser atribuído à estrutura em camadas e aos poros e falhas nas juntas causados pela presença das fibras (Varela *et al.*, 2024).

Figura 24 - Resistência à compressão de espécimes com diferentes teores de fibras de sisal, expostos a elevadas temperaturas, impressos em 3D nas direções de carregamento X (a), Y (b) e Z (c) e moldados (d).



A maior perda percentual, quando comparados os dados das amostras impressas em cada direção com as amostras moldadas para uma mesma mistura, ocorreu na mistura SF05%12, em que houve uma diminuição de 17,0 % na resistência da amostra avaliada na direção X, passando de 45,1 MPa na amostra moldada para 37,4 MPa no 3DP-SFCC. Esse comportamento foi observado de forma mais intensa por Jia *et al.* (2024b) durante a investigação do efeito da forma e do teor de fibra de aço nas propriedades frescas e endurecidas do 3DP-CC. As perdas chegaram a aproximadamente 32 % nas amostras impressas em relação às moldadas, considerando uma mesma mistura. Para Jia *et al.* (2024b), o processo de impressão amplia o impacto das fibras de aço na porosidade, que leva ao aumento da porosidade e ao enfraquecimento da ligação entre a fibra de aço e a matriz, gerando maiores perdas de resistência à compressão. Desse modo, os dados indicam que o processo de impressão provoca

perdas de resistência mais consideráveis quando com a presença das fibras de aço do que com misturas com fibras de sisal.

Por outro lado, após o aquecimento, a perda de resistência se apresentou maior nas misturas sem a presença de fibra. Da temperatura ambiente para 600 °C, por exemplo, a resistência do REF-C na direção Y cai de 58,41 MPa para 38,51 MPa, representando uma perda de 34 %, enquanto a perda para REF-LFMK é de 23 % e SF05%12 tem perda insignificante após a mesma condição de temperatura. Esse comportamento aprimorado dos compósitos com fibras de sisal pode ser explicado pela presença de vazios gerados pelas fibras degradadas ao longo do material, evidenciado nas imagens microscópicas a serem apresentadas na Figura 28, que ajudam a aliviar a pressão nos poros com a elevação da temperatura, resultando em menores danos ao material. Essa tendência contrapõe os resultados encontrados por Arunothayan e Sanjayan (2023), em que a combinação e presença de fibras de aço poliméricas não interferiram significativamente na queda de resistência das amostras de concreto impresso em 3D submetido a elevadas temperaturas (até 1000 °C).

De maneira geral, da temperatura ambiente até 200 °C é perceptível que há manutenção ou aumento da resistência à compressão, que podem ser justificadas pela densificação da microestrutura devido às reações pozolânicas aceleradas do metacaulim e à liberação de água ligada. Xiao e König (2004) também mostraram que nesse intervalo de temperatura, a resistência à compressão do concreto não é significativamente alterada. Em contraponto, quando a temperatura ultrapassa os 400 °C, a resistência à compressão do 3DP-CC começa a diminuir intensamente (Arunothayan; Sanjayan, 2023; Xiao; König, 2004). Aos 600 °C, foi identificada uma queda acentuada na resistência, ocasionada pela decomposição da portlandita e pelo início da decomposição do C-S-H gel (560 °C) (Peng; Huang, 2008), além da influência da presença de danos, como fissuração. A perda de resistência é intensificada aos 800 °C, com a segunda fase de decomposição do C-S-H gel e com a descarbonatação dos carbonatos (Peng; Huang, 2008).

Após o ciclo de 800° C, a resistência à compressão média residual das misturas 3DP-CC foi de 16 a 22 MPa. Para as misturas sem fibras, isso representou uma perda de resistência de 59 a 72 % quando comparado com as amostras não aquecidas. Já nas misturas com fibras, esses valores representaram uma queda de 41 a 65 % na resistência à compressão, o que demonstra o melhor comportamento mecânico das misturas com fibras de sisal.

De maneira geral, os resultados de resistência à compressão das amostras moldadas (Figura 24d) foram semelhantes aos obtidos para as amostras impressas nas diferentes direções, indicando bom comportamento das peças impressas. Analisando separadamente as resistências nas diferentes direções ensaiadas, as maiores resistências foram verificadas no eixo X de avaliação, que corresponde à direção de impressão. Zhou *et al.* (2023) entendem que a resistência à compressão nessa direção é a mais alta porque a pressão aplicada ao material durante o processo de extrusão torna o material mais compactado longitudinalmente.

Entretanto, ao utilizar fibras de aço em 3DP-CC, Zhang *et al.* (2023) verificaram que a resistência à compressão de amostras impressas testadas na direção paralela à interface (direção Y) é significativamente menor devido ao alinhamento e ao efeito parede das fibras de aço.

Sahin *et al.* (2025) avaliaram misturas 3DP-CC reforçadas com fibras de aço submetidas a temperaturas elevadas e observaram que a maior queda na resistência à compressão também ocorreu quando o carregamento foi aplicado na direção Y, com queda em torno de 20 %, refletindo que as forças interfaciais são particularmente vulneráveis ao calor para esta categoria de alinhamento de carga. Após exposição a 600 °C, a queda na resistência à compressão das misturas contendo fibras de aço variou de 37 % a 47 %.

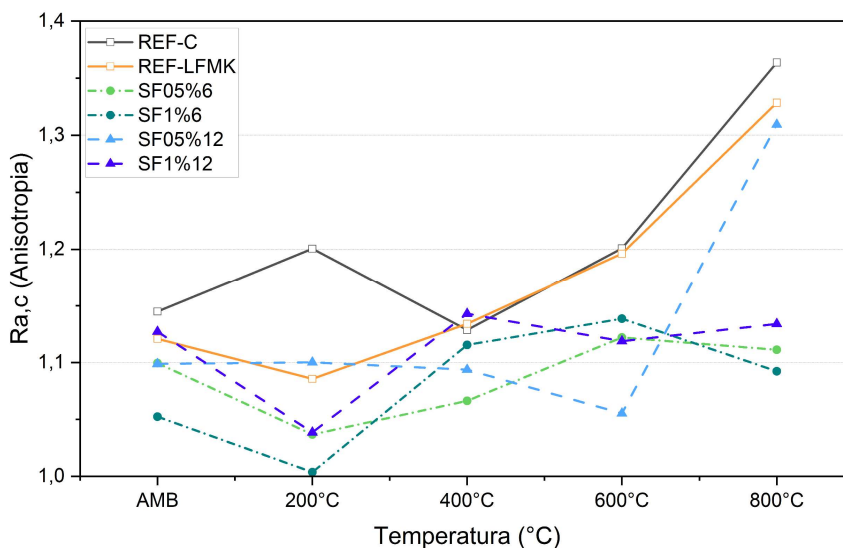
Os dados de resistência à compressão das misturas 3DP-SFCC (Figura 24) evidenciam que a queda na resistência à compressão das misturas contendo fibras de sisal chegou a 38 % após exposição a 600 °C. Porém, houve aumento da resistência à compressão nas direções X e Y do SF05%12 após a mesma temperatura de exposição, quando comparado REF-LFMK. Os dados apontam que as misturas com fibras de sisal não sofrem com a vulnerabilidade na direção Y percebidas por Zhang *et al.* (2023) e Sahin *et al.* (2025), havendo para o 3DP-SFCC um maior equilíbrio entre as direções analisadas do que os compósitos com fibras de aço.

Estudos realizados utilizando a tecnologia de impressão 3D de misturas com fibras (Ma *et al.*, 2024; Varela *et al.*, 2024; Zhou *et al.*, 2022) indicam haver direcionamento das fibras durante a impressão. Para Ma *et al.* (2024), o direcionamento das fibras durante a impressão provoca uma maior variação de resistência à compressão entre diferentes direções de carregamento, definida como anisotropia. Zhou *et al.* (2023) entendem que a principal razão para a anisotropia no 3DP-CC é a morfologia dos poros submetidos às diferentes direções de carregamento, concordando também haver influência das fibras curtas. Para Dong *et al.* (2024) e Luo, Li e Wang (2024), essa variação de resistência também ocorre pela presença de interfaces

fracas entre as camadas impressas. Essas características aumentam a resistência à fragmentação em temperatura elevada, mas também podem levar à anisotropia sob diferentes direções de carregamento.

Os resultados obtidos para $R_{a,c}$ (Figura 25) evidenciam que, de maneira geral, as fibras de sisal reduziram ligeiramente a anisotropia das amostras impressas e que a anisotropia aumenta com o aumento da temperatura de exposição do 3DP-SFCC, sendo esse aumento mais acentuado nas misturas sem fibras.

Figura 25 - Razão de anisotropia para resistência à compressão de espécimes impressos com fibras de sisal sob elevadas temperaturas.



A redução da anisotropia provocada com a inserção das fibras de sisal pode ser consequência da melhor ligação entre camadas (a ser discutida na seção 4.2.4.). Zhang *et al.* (2024) destacaram que a resistência à compressão do 3DP-CC varia principalmente por diferenças na porosidade, influenciadas pelo processo de impressão e pelos materiais usados. A melhor coesão entre camadas observadas nas amostras com FS parece ter limitado a formação e alteração dos poros entre camadas, além de mitigar fissuras sob carga, resultando em menor anisotropia no 3DP-SFCC.

Após aquecimento a 200 °C há uma diminuição da razão de anisotropia, ocasionada pela melhor compacidade das amostras, que provocou também aumento da resistência dos espécimes. Já aos 600 °C e 800 °C, a razão de anisotropia aumenta de forma mais acentuada nas misturas sem fibras. Para Zhou *et al.* (2025), quando os compósitos impressos em 3D são expostos a altas temperaturas, há uma diminuição intensa da união entre camadas e diferenças significativas nas propriedades mecânicas pode amplificar a natureza anisotrópica do 3DP-CC.

A liberação de água e a decomposição das fases hidratadas durante o aquecimento alteram a distribuição e o volume dos poros no 3DP-CC, criando caminhos para iniciação e propagação de trincas, provocando enfraquecimento estrutural. A maior anisotropia evidenciada, de 1,36, ocorreu na mistura REF-C quando submetida ao ciclo de 800 °C, enquanto a menor anisotropia foi observada na mistura SF1%6 a 200 °C, apresentando um valor de aproximadamente 1,0. A 800 °C, a anisotropia diminuiu 17,8 % ao adicionar 1,0 % de fibras de sisal de 6 mm na matriz REF-LFMK. Em amostras não aquecidas, essa diminuição foi de 6,1 %. A menor anisotropia observada nos compósitos com fibras de sisal em altas temperaturas pode ser atribuída ao alívio de tensões pelos caminhos deixados após a decomposição das fibras, o que retardou danos no 3DP-SFCC e resultou em fissuras tardias e menores variações de resistência entre as direções analisadas.

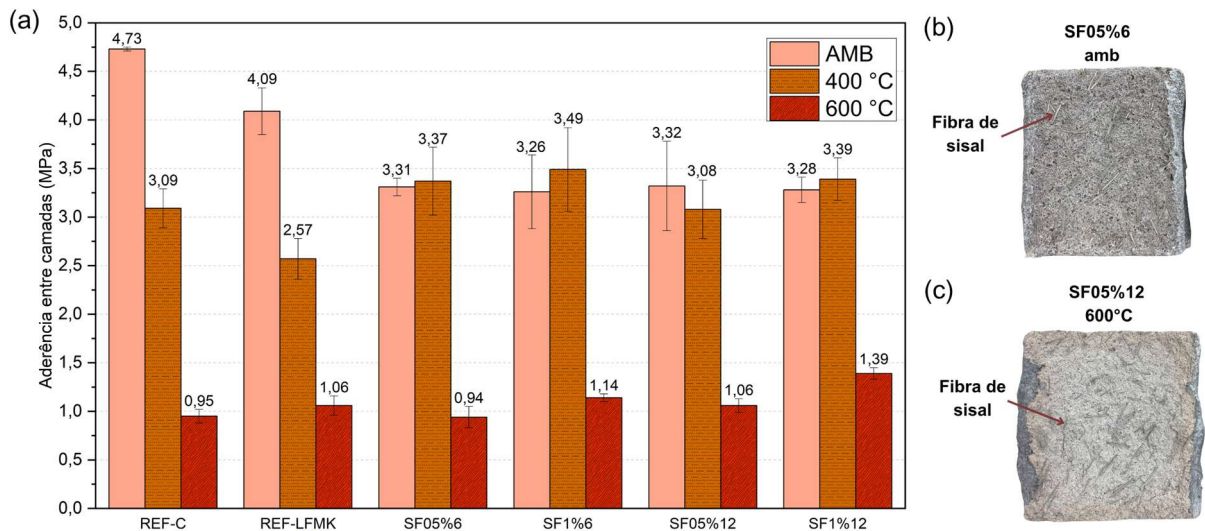
4.2.4 Aderência entre camadas

A adesão entre camadas foi avaliada em espécimes não aquecidos e aquecidos a 400 °C e a 600 °C e os resultados (Figura 26a) indicam que a aderência entre camadas é reduzida para misturas REF-C e REF-LFMK, sem adição de fibras, e se mantém sem alteração nas misturas com fibras em todos os percentuais e tamanhos utilizados no 3DC-SFCC na temperatura de 400 °C levando em consideração o desvio padrão. A diminuição na aderência entre camadas das misturas sem fibras após a temperatura alvo de 400 °C foi em média de 36 %, e as misturas com fibras mantiveram a adesão entre camadas nessa temperatura. Isso ocorre por que as fibras de sisal têm a degradação da celulose e da lignina entre 310 e 400 °C, como demonstrado nas análises de TG/DTG, e isso ocasiona a redução da poro pressão entre camadas provocando o alívio de tensão e evitando a falha, o contrário ocorre nas misturas sem fibras que tiveram redução na resistência de aderência devido ao aumento da pressão nos poros.

Aos 600 °C o impacto é maior para todos os espécimes avaliados, diminuindo ainda mais os valores de adesão entre camadas, porém o aumento da quantidade e do tamanho de fibras de sisal ocasionaram uma menor perda de aderência percentual. Adicionalmente, nessa temperatura as adesões mantiveram valores próximos ou superiores às misturas sem fibras. A mistura SF1%12 apresentou melhor resultado dentre as misturas avaliadas, com adesão 46 % superior a REF-LFMK após a exposição a 600 °C, comprovando que as fibras de sisal diminuem o impacto da perda de adesão em elevadas temperaturas e que é relevante combinar alta fração volumétrica e maior comprimento. Nesse contexto, a fibra mais longa (12 mm) tende

a atravessar melhor a interface entre camadas, criando pontos de ligação adicionais e auxiliando no alívio de pressão nos poros.

Figura 26 - Adesão entre camadas: resultados de espécimes impressos em 3D, não aquecidos e submetidos a temperaturas alvo de 400 °C e 600 °C, com diferentes teores de fibras de sisal (a); espécime SF05%6 (b) e SF05%12 após ciclo de 600 °C (c).

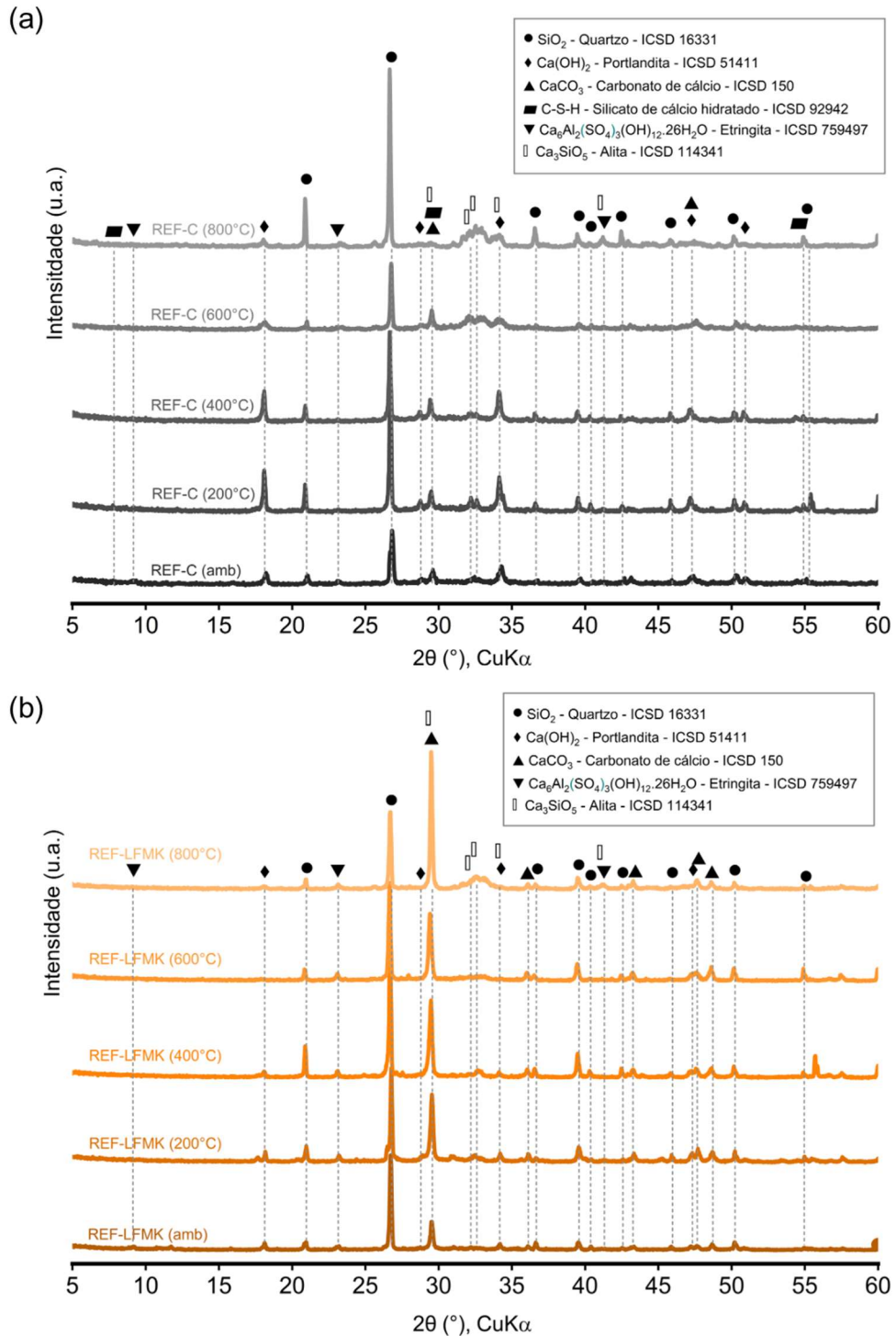


Durante os testes, a falha nos espécimes iniciou na região entre camadas, que funciona como um entalhe, aumentando a concentração de tensão, e se manteve na ligação entre camadas, exibindo separação de camadas com maior fragilidade dessa área. Após os ensaios, foi verificado que as fibras se apresentavam bem distribuídas ao longo da superfície (Figura 26b e Figura 26c) e que se mantinham posicionadas ao longo dos filamentos, sem ancoragem entre filamentos, comportamento esperado e provocado pelo processo de extrusão. Nos espécimes aquecidos, houve modificação do estado das fibras de sisal, a ser apresentada nas análises de MEV (Figura 28b), provocada por sua decomposição. Assim como identificado por Xiao *et al.* (2021a), a decomposição das fibras durante o aquecimento pode ter fornecido uma rede de microfissuras para liberação de vapor e contribuído para a manutenção da adesão entre camadas a 400 °C e uma queda menos intensa após exposição a 600 °C. Porém como a deterioração de misturas cimentícias sob elevadas temperaturas ocorre por processos físicos, químicos e mecânicos, em temperatura de 600 °C, o processo químico de degradação dos compostos hidratados da matriz é mais preponderante, embora o efeito físico de degradação das fibras de sisal ainda tenha influência em manter a resistência de aderência entre camadas da mistura SF1%12 maior que as demais misturas. Esse comportamento sob elevadas temperaturas evidencia a importância de utilização de fibras nas misturas para impressão 3D.

4.2.5 DRX e MEV das amostras submetidas ao aquecimento

Os padrões de DRX das matrizes cimentícias REF-C e REF-LFMK sem aquecimento e após aquecimento nas temperaturas de 200, 400, 600 e 800 °C são apresentados na Figura 27 com identificação dos picos analisados.

Figura 27 - Padrões de DRX das matrizes impressas REF-C (a) e REF-LFMK (b) após exposição a diferentes temperaturas.

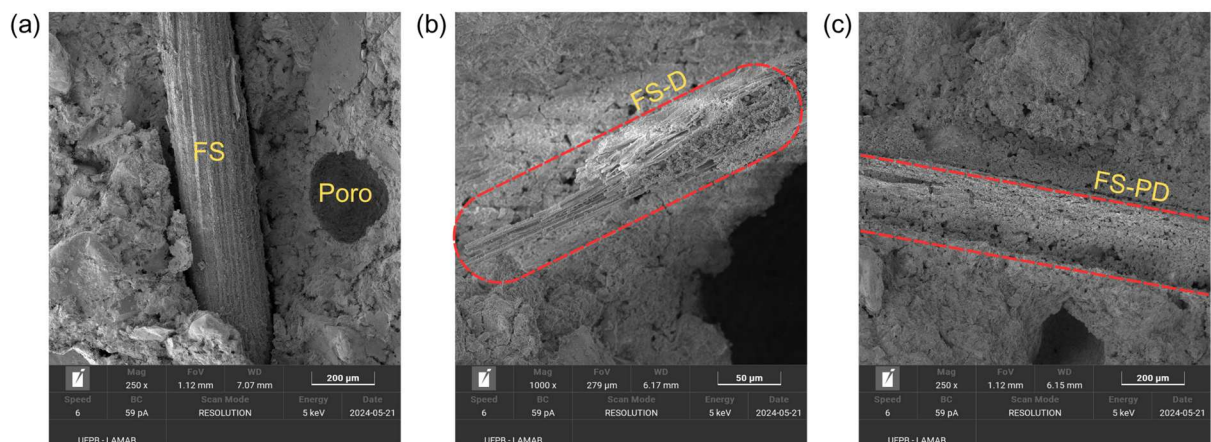


Nas duas matrizes há uma redução significativa na intensidade dos picos de portlandita após 600 °C, devido à desidroxilação (Peng; Huang, 2008), chegando a não serem detectados após 600 °C para REF-LFMK. Para REF-LFMK, os picos de portlandita se apresentam menos intensos do que em REF-C para todas as temperaturas analisadas, comportamento conduzido pelo consumo de portlandita nas reações pozolânicas com o metacaulim. O consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e a formação de aluminossilicato de cálcio hidratado (C-(A-)S-H) proporcionam maior estabilidade ao material cimentício sob altas temperaturas, o que refletiu em uma menor perda de resistência e menores danos provocados ao REF-LFMK, comparado ao REF-C, com a elevação da temperatura.

A decomposição da etringita é observada já aos 200 °C nos padrões de DRX do REF-C, pois sua desidratação ocorre de 110 °C a 150 °C (Ma *et al.*, 2022b). Há percepção da decomposição do carbonato de cálcio nas amostras submetidas a 800 °C. Ademais, há identificação de alita residual nas duas matrizes até 600 °C, com picos mais intensos na mistura REF-C, produzida com maior quantidade de cimento.

A Figura 28 apresenta as imagens de MEV das amostras impressas em 3D da mistura SF05%12. Na temperatura ambiente (Figura 28a), é possível visualizar a integridade da fibra de sisal e sua boa aderência com a matriz cimentícia. Após o teste de temperatura elevada a 400 °C, é possível visualizar a fibra degradada (FS-D) (Figura 28b) e, em outros locais da amostra, os poros deixados pela degradação das fibras de sisal (FS-PD) podem ser facilmente identificados (Figura 28c). Esses novos poros fornecem uma rota de fuga adequada para o vapor escapar, reduzindo assim os danos ao 3DP-SFCC em elevadas temperaturas.

Figura 28 - Imagens de MEV do SF05%12: fibra de sisal na matriz em temperatura ambiente (a), fibra degradada (b) e vazio deixado pela fibra (c) após exposição a 400 °C de temperatura alvo.



4.3 ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DE CALOR E SEUS IMPACTOS NO 3DP-CC

Após a análise do 3DP-CC no estado endurecido, foram selecionadas as misturas REF-LFMK e SF05%12 para a avaliação da transferência de calor. A mistura SF05%12 foi escolhida por apresentar o melhor desempenho em resistência à compressão entre as formulações com fibras sob condições de elevada temperatura. Já a mistura REF-LFMK foi adotada como referência, por não conter fibras e possuir a mesma matriz da formulação anterior.

4.3.1 Evolução temporal de perfis de temperatura detalhados

A evolução temporal dos perfis de temperatura do 3DP-CC em profundidade foi monitorada em dois blocos para cada mistura analisada: um submetido ao aquecimento até 400 °C, cujos resultados são apresentados na Figura 29 e na Figura 30, e outro até 600 °C, com resultados exibidos na Figura 31 e na Figura 32. Em todas as condições avaliadas, observou-se um comportamento semelhante. Nos blocos sem fibras, a transferência de calor ocorreu de forma mais rápida pela região entre camadas do que pelo interior das camadas. Esse resultado pode estar relacionado à maior porosidade existente entre as interfaces, a qual favorece a propagação do calor nessa região.

Figura 29 - Perfis de temperatura nos diferentes pontos avaliados no bloco REF-LFMK durante o ciclo de 400 °C.

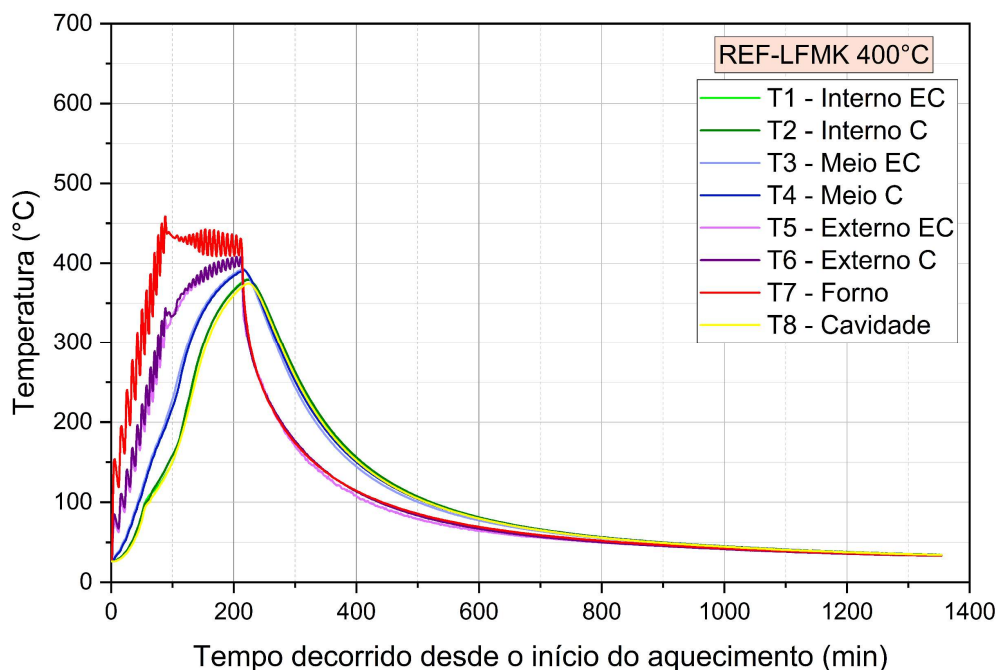


Figura 30 - Perfis de temperatura nos diferentes pontos avaliados no bloco SF05%12 durante o ciclo de 400 °C.

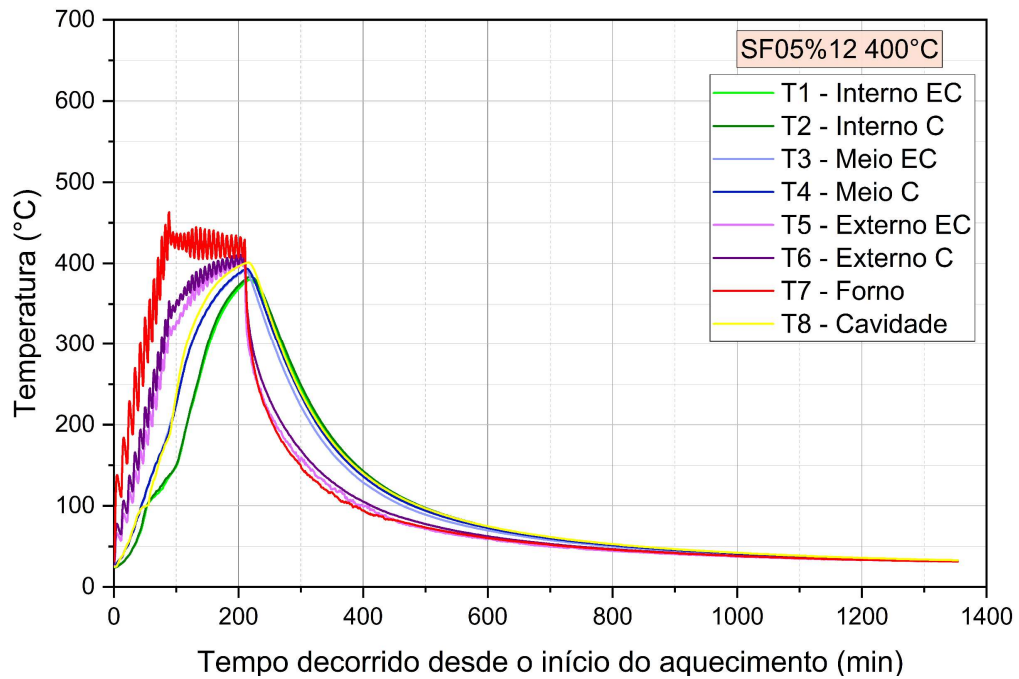


Figura 31 - Perfis de temperatura nos diferentes pontos avaliados no bloco REF-LFMK durante o ciclo de 600 °C.

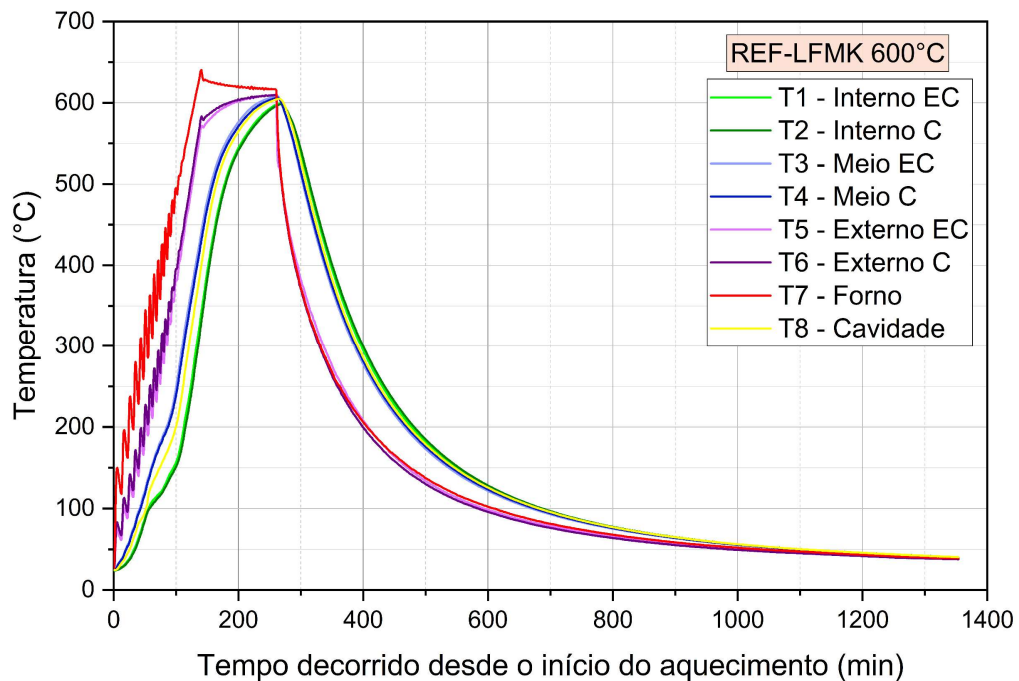
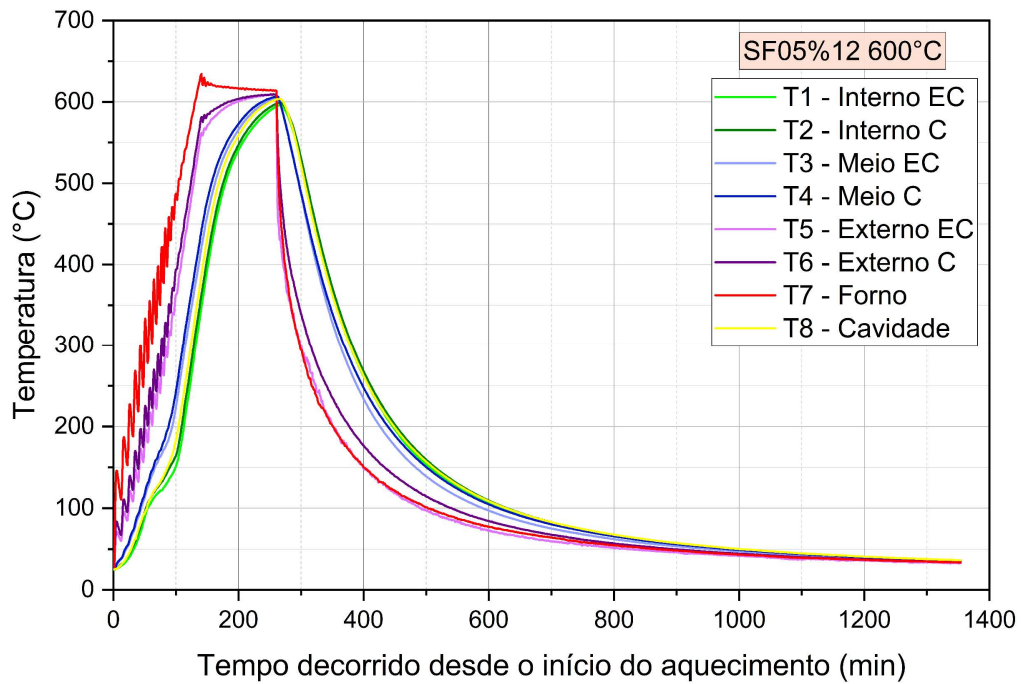


Figura 32 - Perfis de temperatura nos diferentes pontos avaliados no bloco SF05%12 durante o ciclo de 600 °C.

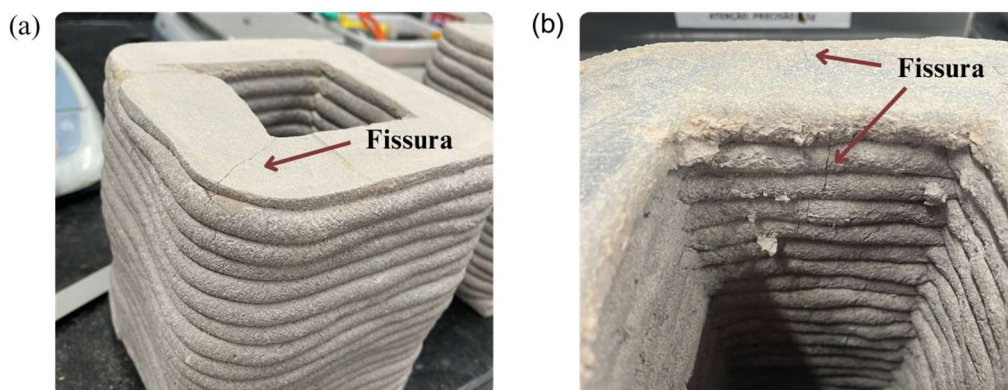


Um achado relevante deste estudo foi a alteração do comportamento térmico nos blocos com adição de fibras de sisal. Nessas amostras, a transferência de calor ocorreu de forma mais rápida através da camada do que pela região de interface entre camadas. Esse resultado pode estar associado à formação de caminhos preferenciais para a condução térmica, originados pela degradação das fibras. Tal comportamento contribui para a redução dos gradientes térmicos no interior do material, uma vez que a região de interface não apresenta um aquecimento significativamente mais acelerado que o das camadas adjacentes. Assim, a aderência entre camadas tende a ser menos comprometida por diferenças no regime de transferência de calor, o que pode justificar o melhor desempenho observado nas misturas contendo fibras de sisal.

4.3.2 Modos de falha e perda de massa do 3DP-CC

Após finalização do ciclo de temperatura, os blocos foram retirados do forno, pesados e imagens de suas superfícies foram captadas. Após o ciclo de 400 °C, não foram observadas modificações nos blocos. Entretanto, após 600 °C os blocos apresentaram fissuras posicionadas nos cantos e no meio das arestas (Figura 33).

Figura 33 - Danos superficiais nos blocos REF-LFMK (a) e SF05%12 (b) após exposição a 600 °C.



Os resultados de perda de massa dos blocos avaliados estão apresentados na Tabela 5. A perda de massa dos blocos com fibras de sisal foi ligeiramente maior, o que pode estar relacionado com a degradação das fibras após o aquecimento.

Tabela 5 - Perda de massa dos blocos após elevada temperatura.

Composição	Temperatura (°C)	Perda de massa (%)
REF-LFMK	400	6,5
	600	7,4
SF05%12	400	6,8
	600	7,5

4.3.3 Resistência à compressão

A Tabela 6 apresenta os resultados de resistência à compressão dos blocos de 3DP-CC tanto na condição não aquecida quanto após os ciclos de temperatura.

Tabela 6 - Resistência à compressão dos blocos após elevada temperatura.

Composição	Temperatura (°C)	Resistência (MPa)
REF-LFMK	AMB	42,3
	400	30,9
	600	19,1
SF05%12	AMB	42,6
	400	33,6
	600	19,6

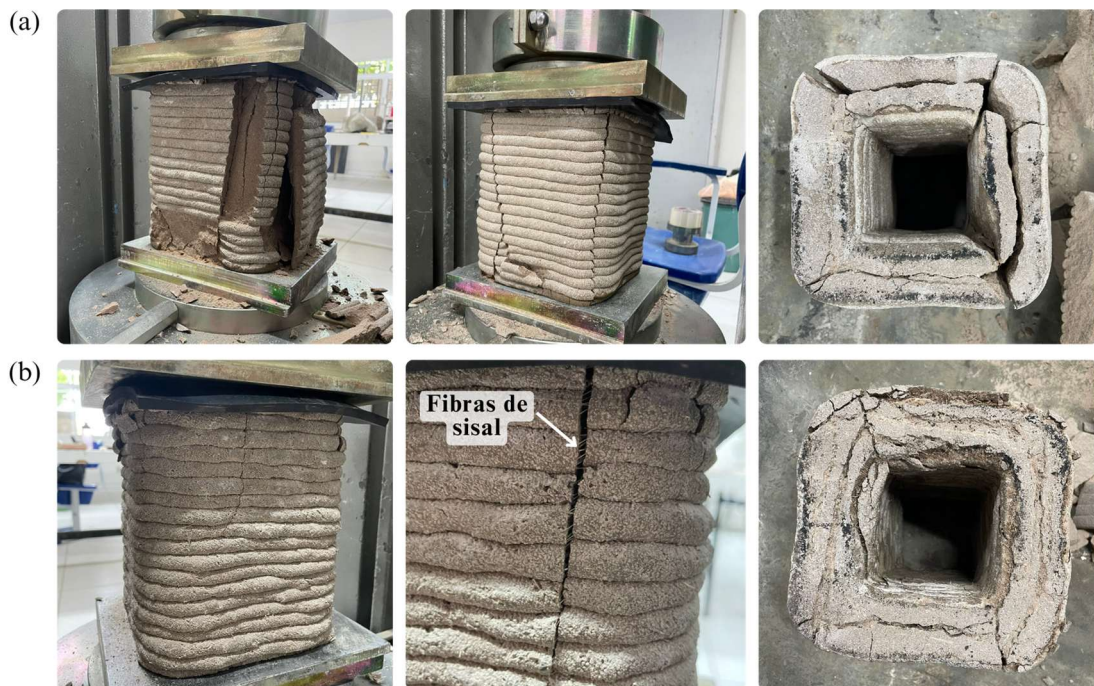
Nos blocos não aquecidos, não foram observadas alterações significativas na resistência à compressão, indicando que a adição de fibras não exerceu influência relevante em temperatura ambiente. Após o ciclo de 400 °C, entretanto, os blocos com 0,5% de fibras de sisal de 12 mm apresentaram redução de resistência de 21,1 %, mas ainda assim mantiveram desempenho 8,7

% superior ao dos blocos sem fibras na mesma condição. Nessa temperatura, os blocos sem fibras registraram perda de resistência de 27 %. Por outro lado, nas amostras de menor dimensão não foram verificadas reduções de resistência para as misturas REF-LFMK e SF05%12 após o aquecimento a 400 °C, sugerindo que os danos ocasionados pela exposição térmica tendem a ser mais intensos em peças de maiores dimensões.

Após o ciclo a 600 °C, a redução de resistência foi mais acentuada, atingindo aproximadamente 54 % em ambas as misturas. Embora a mistura SF05%12 tenha apresentado valores de resistência ligeiramente superiores em relação à REF-LFMK, a magnitude da perda observada foi semelhante.

Durante os ensaios, os blocos apresentaram modos de falha semelhantes. Nos blocos não aquecidos e sem fibras de sisal, observou-se ruptura repentina e sem indícios prévios, caracterizada principalmente pela formação de fissuras verticais concentradas nos cantos (Figura 34a). Em algumas regiões, verificou-se ainda o surgimento de fissuras de cisalhamento, orientadas na diagonal e no sentido de cima para baixo. Nos blocos com fibras de sisal (Figura 34b), a fratura também ocorreu com fissuração vertical, porém sem ruptura brusca, em razão do efeito de ancoragem proporcionado pelas fibras.

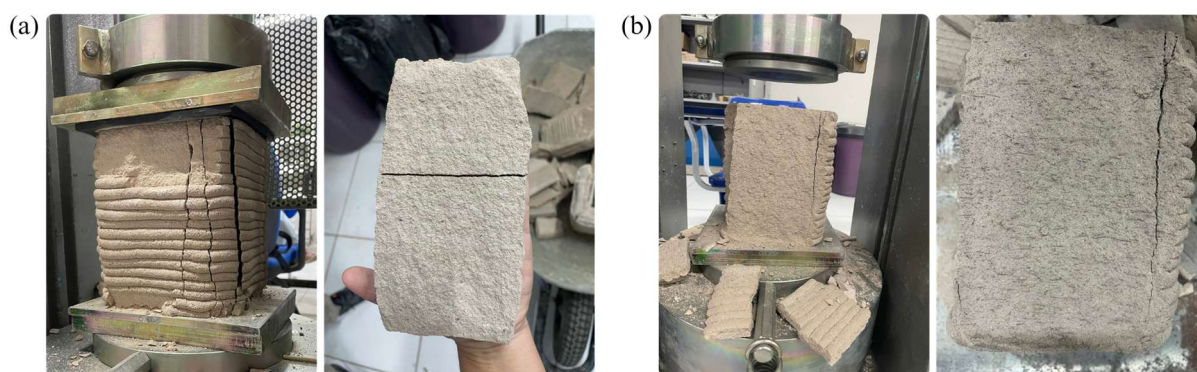
Figura 34 - Modo de ruptura dos blocos 3DP-CC REF-LFMK (a) e SF05%12 (b) não aquecidos.



Com a degradação das fibras de sisal, todos os blocos submetidos ao ciclo de aquecimento de 400 °C apresentaram ruptura repentina (Figura 35). Nos blocos REF-LFMK foram observados deslocamentos e fissuras verticais, além de delaminação entre camadas sem aplicação de esforço (Figura 35a). A delaminação entre camadas após elevada temperatura também foi observada por Cicione *et al.* (2021), que atribuiu o comportamento às tensões de tração autoequilibrantes, induzidas em decorrência do gradiente térmico.

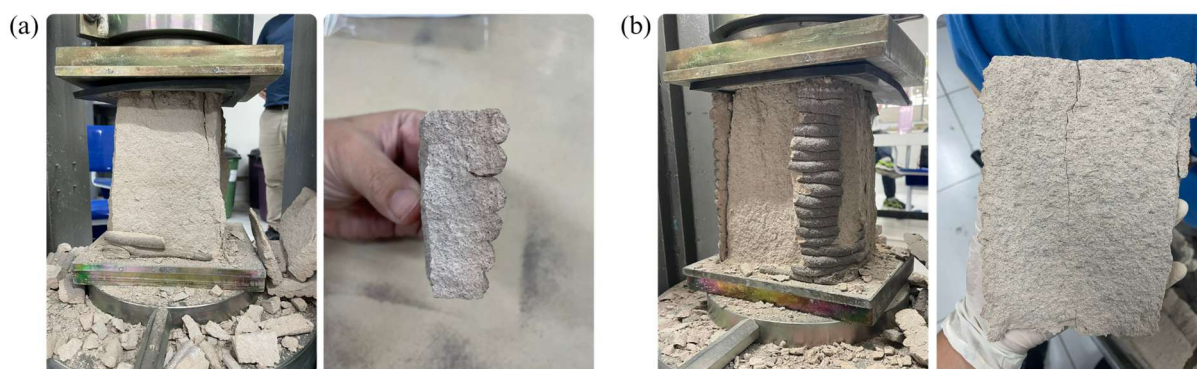
A ocorrência de deslocamento também foi observada nos blocos SF05%12, com visualização da posição e degradação das fibras nas placas após ruptura (Figura 35b).

Figura 35 - Modo de ruptura dos blocos 3DP-CC REF-LFMK (a) e SF05%12 (b) após 400 °C.



Após a exposição a 600 °C, além do deslocamento observado em todos os blocos (Figura 36), verificou-se alteração na coloração da matriz (Figura 36a) e um estado avançado de degradação, com a matriz apresentando desagregação ao simples toque.

Figura 36 - Modo de ruptura dos blocos 3DP-CC REF-LFMK (a) e SF05%12 (b) após 600 °C.

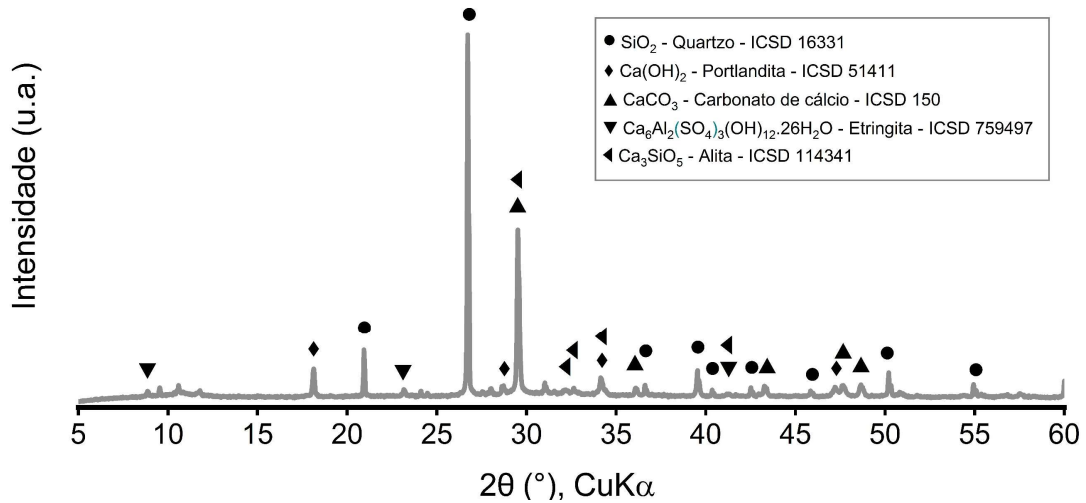


4.3.4 DRX e MEV dos blocos após a propagação de calor

O padrão de DRX da amostra não aquecida SF05%12, apresentado na Figura 37, revelou a presença de quartzo, portlandita, carbonato de cálcio, etringita e alita. Esse resultado está em

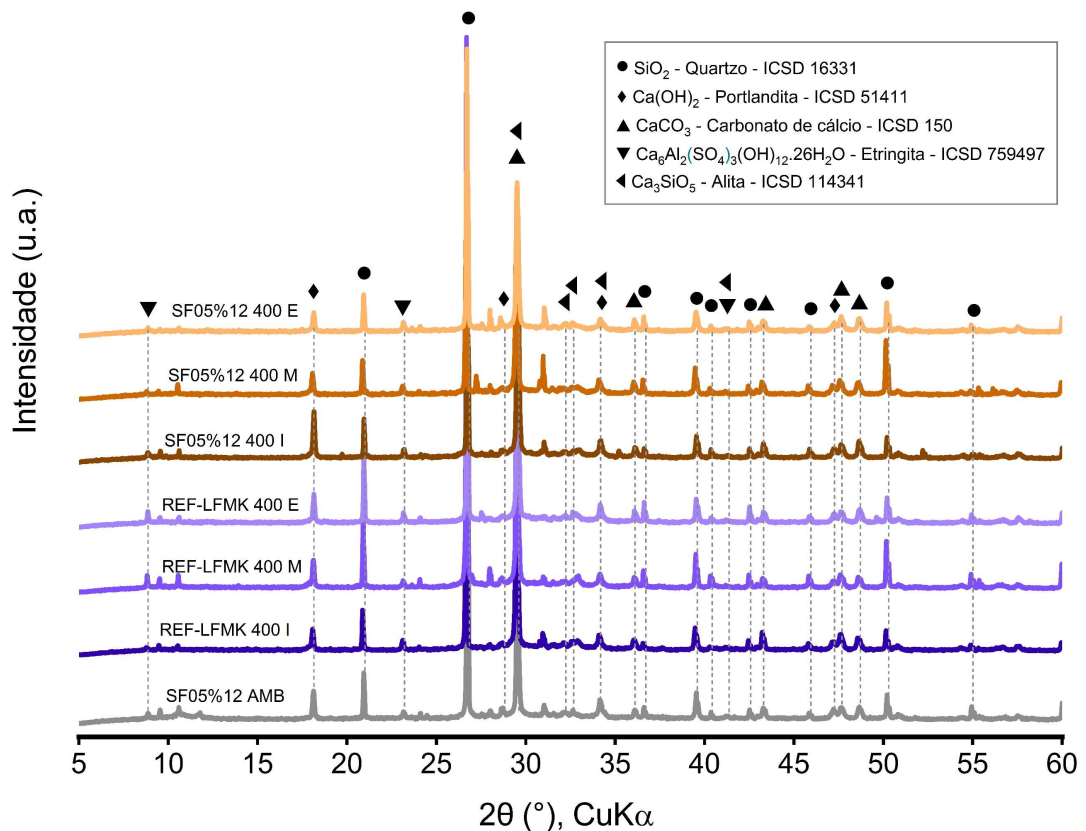
consonância com o padrão obtido para a amostra REF-LFMK apresentado na Figura 27, confirmando a consistência dos dados e a reprodutibilidade das fases cristalinas identificadas.

Figura 37 - Padrão de DRX da amostra do bloco não aquecido SF05%12.



Os padrões de DRX das misturas REF-LFMK e SF05%12 nos diferentes pontos analisados estão apresentados na Figura 38 (após 400 °C) e na Figura 39 (após 600 °C), com identificação dos picos avaliados.

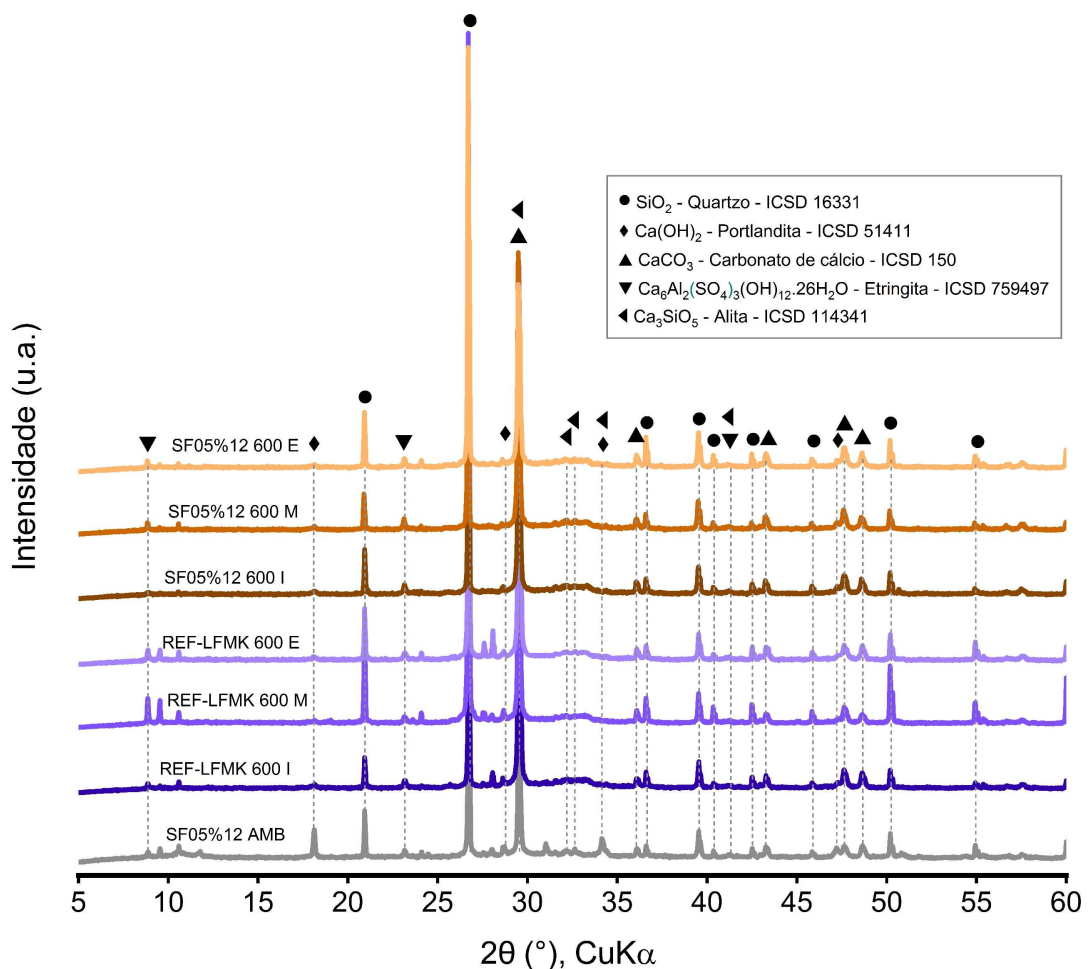
Figura 38 - Padrões de DRX de amostras dos blocos após exposição a 400°C.



Após 400 °C, os picos de portlandita começam a diminuir, indicando o início de sua decomposição térmica.

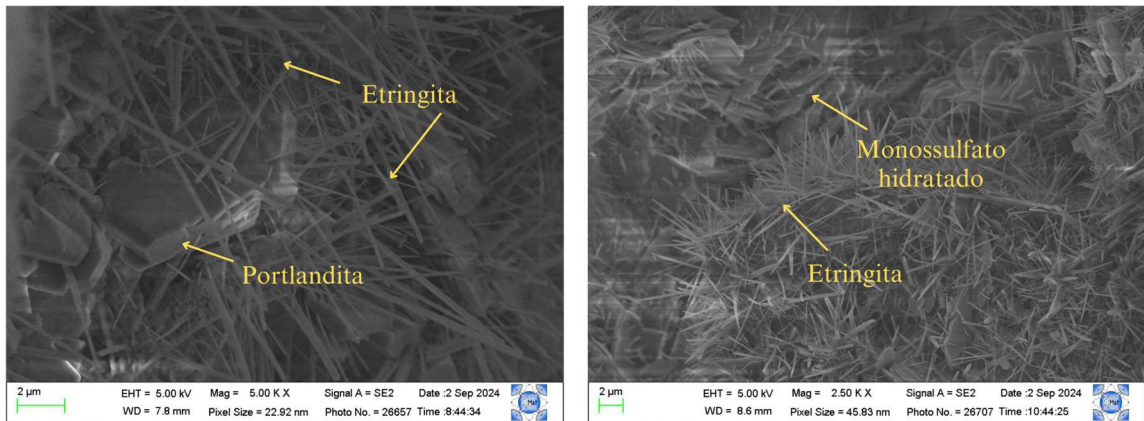
Após a exposição a 600 °C, a portlandita encontra-se praticamente decomposta, enquanto se observa um discreto aumento na quantidade de carbonato de cálcio. Esse fenômeno pode estar associado à recristalização ou à transformação de fases menos estáveis, como vaterita e aragonita, em calcita, precedendo sua posterior decomposição térmica. Segundo Thiery *et al.* (2007), a carbonatação da portlandita origina calcita bem cristalizada, cuja decomposição ocorre em temperaturas mais elevadas quando comparada aos polimorfos amorfos e metaestáveis de carbonato de cálcio (vaterita e aragonita) formados a partir da carbonatação do C-S-H gel.

Figura 39 - Padrões de DRX de amostras dos blocos após exposição a 600°C.



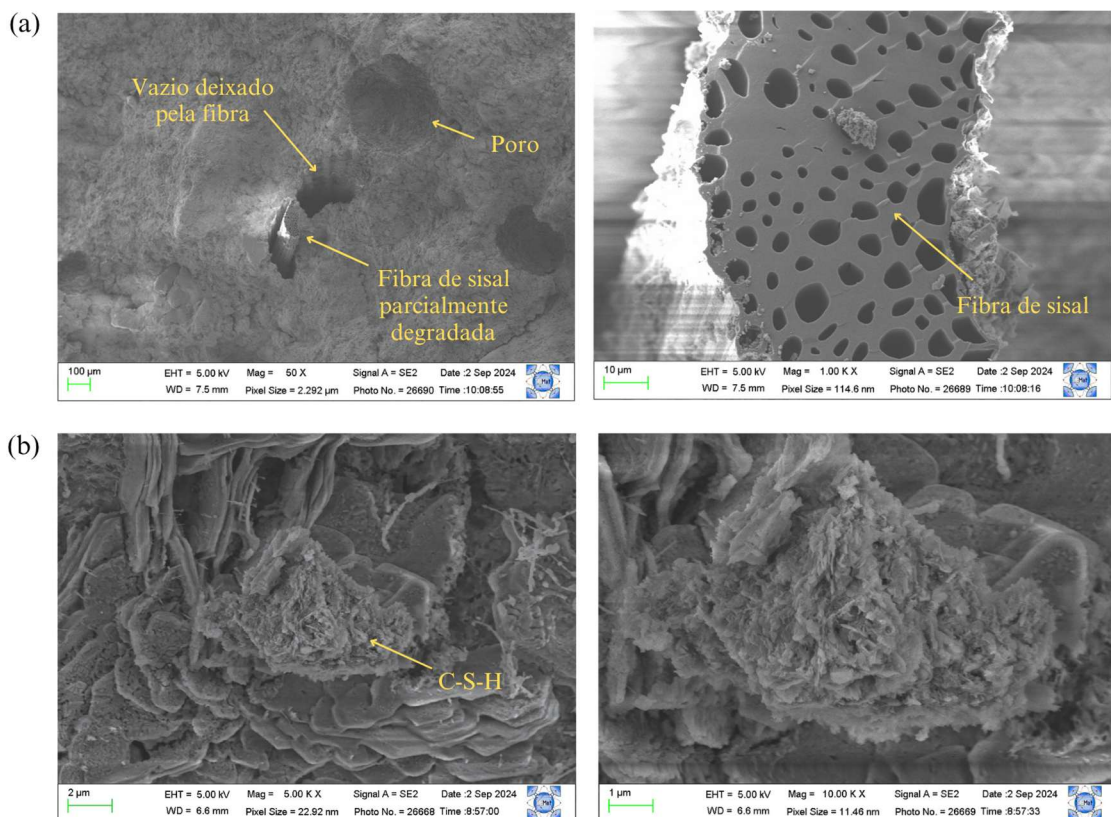
As micrografias eletrônicas de varredura do bloco SF05%12 não aquecido são apresentadas na Figura 40, nas quais é possível identificar cristais aciculares característicos da etringita, além de cristais de portlandita e de monossulfato hidratado.

Figura 40 – Micrografias eletrônicas de varredura do bloco SF05%12 não aquecido.



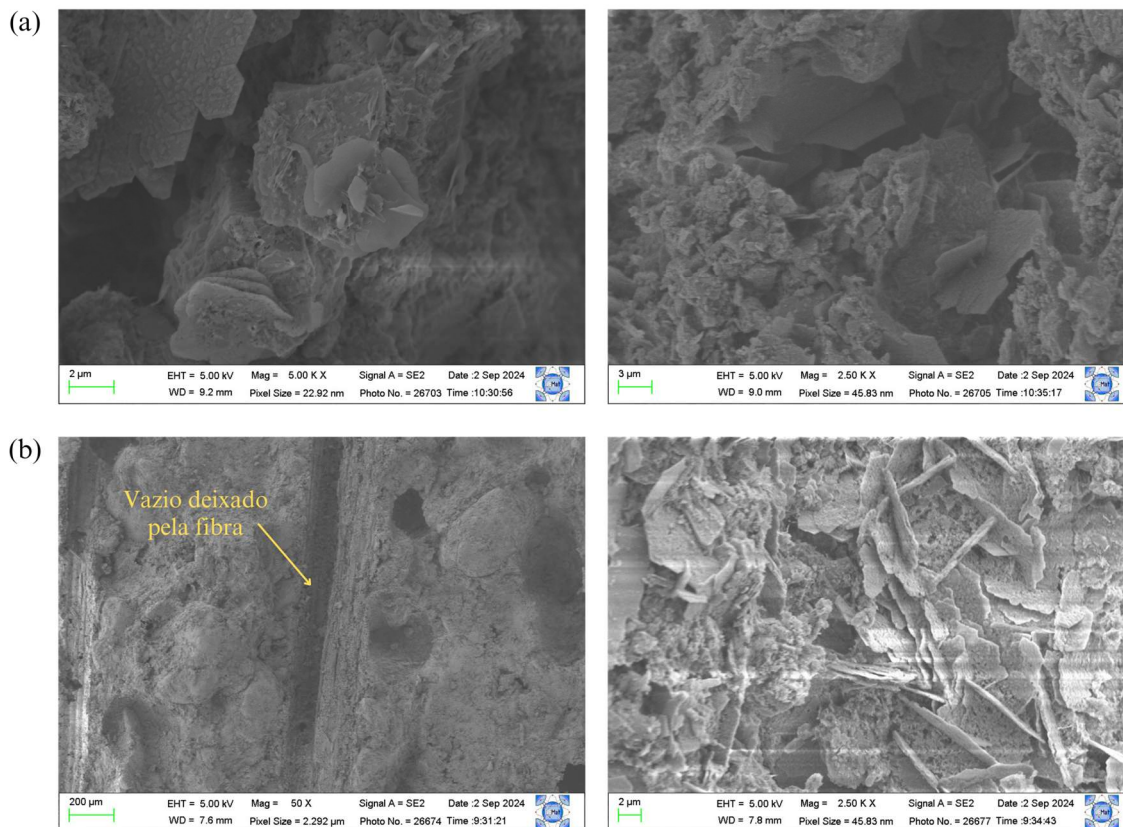
A Figura 41 apresenta micrografias eletrônicas de varredura do bloco SF05%12 após exposição a 400 °C. Na Figura 41a é possível observar a degradação da fibra de sisal incorporada na matriz cimentícia e uma redução significativa do seu diâmetro, o que gera a formação de canais ou vazios ao longo do seu trajeto. Esses espaços podem atuar como caminhos preferenciais para a transferência de calor e pressão durante a exposição térmica, influenciando o comportamento mecânico e térmico do material. Nessa temperatura já não foi possível observar os cristais bem formados observados na amostra não aquecida.

Figura 41 – Micrografias eletrônicas de varredura do bloco SF05%12 após exposição a 400 °C: (a) ponto interno da parede do bloco e (b) ponto externo da parede do bloco.



A Figura 42 apresenta micrografias eletrônicas de varredura do bloco SF05%12 após exposição a 600 °C. Nessa condição, a matriz cimentícia apresenta maior porosidade, evidenciando degradação significativa dos cristais. Além disso, observa-se a presença de vazios deixados pela degradação das fibras de sisal.

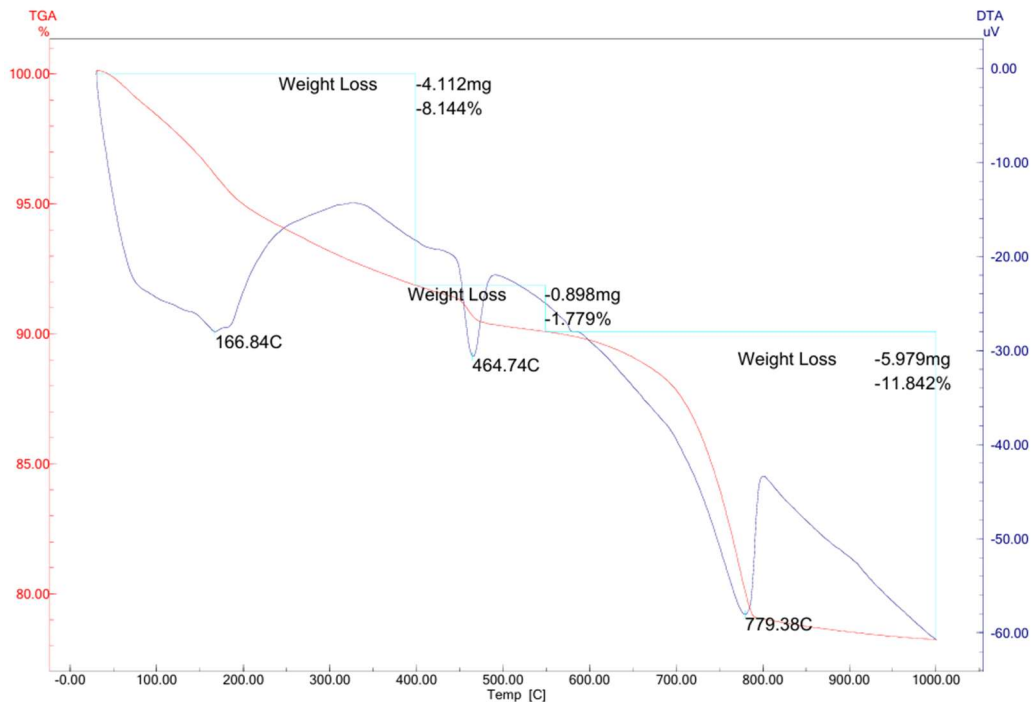
Figura 42 - Micrografias eletrônicas de varredura do bloco SF05%12 após exposição a 600 °C: (a) ponto interno e (b) ponto externo.



4.3.5 Análise térmica das amostras

A Figura 43 apresenta os resultados da análise TG/DTA realizada na amostra do bloco SF05%12 na condição não aquecida. A interpretação das curvas permitiu a identificação de três eventos térmicos significativos no processo de degradação do material, distribuídos em diferentes intervalos de temperatura. O primeiro evento, registrado entre 30 e 400 °C, corresponde predominantemente à perda de água livre e quimicamente ligada, englobando a desidratação dos silicatos e aluminatos hidratados, bem como a decomposição das fibras de sisal incorporadas à matriz. O segundo evento, observado entre 400 e 550 °C, está associado à decomposição da portlandita. Por fim, o terceiro evento, que ocorre entre 550 e 1050 °C, refere-se à descarbonatação dos minerais carbonáticos presentes, principalmente calcita (CaCO_3).

Figura 43 - Curvas TG e DTA referentes à amostra do bloco não aquecido SF05%12.



Na Figura 43, destaca-se a desidroxilação da portlandita com pico a 464,74 °C, assim como a decomposição da calcita, cujo pico foi identificado em 779,38 °C. Esse comportamento é esperado e encontra-se em conformidade com estudos prévios da literatura (Alarcon-Ruiz, 2005; Arunothayan; Sanjayan, 2023; Zhou *et al.*, 2025). Para a amostra analisada, a perda de massa entre 400 e 550 °C (evento 2) foi de 8,144 %, o que corresponde a um teor de portlandita de 7,31 % presente na mistura.

A Tabela 7 resume as temperaturas correspondentes aos três principais eventos térmicos, bem como as perdas de massa associadas a cada transformação para todas as amostras avaliadas. Nessa tabela, também é apresentada a estimativa do teor de portlandita nos blocos com e sem fibras, considerando os diferentes pontos de coleta (I, M e E). Esses resultados são fundamentais para a compreensão dos mecanismos de transferência de calor e degradação térmica em compósitos impressos em 3D, pois permitem correlacionar a decomposição de fases específicas às condições térmicas locais. Além disso, fornecem subsídios importantes para avaliar de que maneira a incorporação de fibras de sisal influencia a propagação do calor no interior do material. Adicionalmente, as curvas termogravimétricas completas das amostras submetidas ao aquecimento estão apresentadas no Apêndice A, possibilitando uma análise complementar e mais detalhada do comportamento térmico das amostras avaliadas.

Tabela 7 - Temperaturas de ocorrência dos eventos térmicos, perdas de massa associadas e estimativa da fração de portlandita nos blocos REF-LFMK e SF05%12.

Amostra	Temp.	Temperatura (°C)			Perda de Massa (%)			Portlandita (%)	
		Evento 1	Evento 2	Evento 3	30°C-400°C	400°C-550°C	550°C-1050°C		
SF05%12	-	AMB	166,84	464,74	779,38	8,144	1,779	11,842	7,31
REF-LFMK	I	400	113,15	460,83	782,62	3,286	2,137	14,060	8,79
REF-LFMK	M	400	119,00	462,13	773,22	2,343	1,883	10,895	7,74
REF-LFMK	E	400	114,27	460,04	779,82	3,304	2,001	13,716	8,23
SF05%12	I	400	118,38	459,73	781,65	3,991	1,677	13,970	6,89
SF05%12	M	400	120,27	453,23	776,29	3,219	1,546	12,868	6,36
SF05%12	E	400	111,76	458,22	783,55	4,338	1,400	15,026	5,76
REF-LFMK	I	600	-	-	776,54	1,496	0,441	13,917	1,81
REF-LFMK	M	600	-	-	774,42	0,955	0,366	13,898	1,50
REF-LFMK	E	600	-	-	766,76	1,311	0,334	12,907	1,37
SF05%12	I	600	-	-	783,23	1,743	0,455	14,383	1,87
SF05%12	M	600	-	-	783,35	0,948	0,296	14,017	1,22
SF05%12	E	600	-	-	762,83	1,670	0,461	12,667	1,90

Nas amostras previamente submetidas ao aquecimento, as perdas de massa no evento 1 foram consideravelmente menores do que as observadas na amostra de referência (não aquecida). Tal comportamento decorre do fato de que essas amostras já haviam passado pela liberação de água e pela desidratação durante o ciclo térmico. De modo semelhante, as perdas de massa no evento 2 foram reduzidas nas amostras provenientes dos blocos expostos a 600 °C, uma vez que a desidroxilação da portlandita já havia ocorrido durante o ensaio em forno. Esse resultado encontra respaldo nas análises de DRX (Figura 39), que evidenciam a redução ou ausência de portlandita após o ciclo a 600 °C. Por essa razão, não foram definidas as temperaturas dos eventos 1 e 2 para as amostras submetidas a 600 °C.

A análise comparativa das perdas de massa no evento 2, considerando as amostras do ciclo a 400 °C, indica que o teor de portlandita foi mais elevado no ponto interno (I) do bloco, sugerindo menor degradação da pasta nessa região. Esse achado é coerente com o perfil térmico registrado pelos termopares, uma vez que o calor incide de forma mais intensa e prolongada nas regiões externas, resultando em maior decomposição da portlandita próximo à superfície. Assim, a distribuição espacial do teor de portlandita confirma o gradiente de degradação microestrutural induzido pelo aquecimento, reforçando a interpretação conjunta dos resultados de TG/DTA, DRX e propagação térmica.

No evento 3 (550 a 1050 °C), as amostras previamente aquecidas apresentaram uma maior perda de massa em comparação à amostra de referência. Esse comportamento pode estar relacionado à formação de carbonatos secundários durante o resfriamento, possivelmente na forma de carbonato de cálcio amorfo, que se mostra menos estável e tende a se decompor de maneira mais acentuada na faixa de altas temperaturas. Além disso, parte da portlandita já desidroxilada entre 400 e 600 °C pode ter reagido com o CO₂ ambiente, originando calcita adicional (Villagrán-Zaccardi, 2017), a qual também contribui para o aumento da perda de massa observada no evento 3.

5 CONCLUSÕES

Este estudo investigou as propriedades de capacidade de impressão, propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de compósitos cimentícios com fibras de sisal impressos em 3D em temperatura ambiente e após temperaturas elevadas de 200 °C a 800 °C. A influência da incorporação da fibra, do processo de impressão e das elevadas temperaturas nas propriedades do 3DP-SFCC foi discutida. As principais conclusões são listadas a seguir:

- (i) A presença e o aumento do comprimento e teor de fibras de sisal alterou o comportamento reológico do compósito, diminuindo a consistência das misturas inicialmente e reduzindo a taxa de perda de consistência das misturas com o tempo. O acréscimo de 1 % de fibras de 12 mm elevou a viscosidade em 39 %;
- (ii) A incorporação das fibras de sisal em misturas para impressão 3D aumenta a consistência das misturas, o que pode prejudicar a extrudabilidade. As misturas com 0,5 % de fibras de sisal apresentaram melhor extrusão;
- (iii) O aparecimento de danos como fissuração e delaminação foi retardado no 3DP-SFCC. Os compósitos reforçados com fibras de 12 mm não apresentaram fissuração mesmo após exposição à temperatura de 800 °C, demonstrando maior eficiência na formação de vias para dissipação térmica e, conseqüentemente, conferindo ao 3DP-SFCC uma maior resistência à temperatura;
- (iv) A adição das fibras de sisal reduziu a resistência à compressão dos espécimes não aquecidos em até 27,5 %, mas diminuiu o impacto da alta temperatura na redução da resistência à compressão do 3DP-SFCC. O incremento de 0,5 % de fibra de sisal de 12 mm foi capaz de manter a resistência à compressão até 600 °C, enquanto para o compósito sem fibras a perda foi de 23 % após 600 °C;
- (v) A incorporação de fibras de sisal contribuiu para redução da anisotropia gerada pelo processo de impressão 3D, de modo que houve diminuição de até 17,8 % da razão de anisotropia no compósito com 1 % de fibras de sisal de 6 mm em relação à mistura sem fibras após aquecimento a 800 °C;
- (vi) As fibras de sisal diminuem o impacto da perda de adesão entre camadas quando o 3DP-CC é submetido à elevadas temperaturas. O aumento da quantidade e do tamanho de fibras de sisal podem gerar ganhos de adesão. O incremento de 1 % de

fibras de 12 mm provocou uma adesão 46 % maior no compósito após a exposição a 600 °C, sugerindo benefícios potenciais em ambientes propensos a temperaturas elevadas; e

- (vii) A propagação de calor ocorre de forma mais intensa na região entre camadas e nas composições contendo fibras de sisal. Isso porque, ao se degradarem, as fibras geram canais que facilitam a passagem de calor. Dessa forma, as misturas com fibras tendem a apresentar menor impacto frente à elevação da temperatura.

Em resumo, a adição de fibras de sisal ao 3DP-CC demonstrou benefícios termomecânicos, contribuindo para a melhoria das propriedades físico-mecânicas dos compósitos. A inserção de 0,5 % de FS de 12 mm apresentou maior potencial para produzir 3DP-CC mais resistente à elevadas temperaturas.

REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13279: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos–Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. **Rio de Janeiro**, 2005.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Blocos vazados de concreto simples para alvenaria — Métodos de ensaio**. [S.l.: S.n.].

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Cimento Portland–Requisitos**, NBR 16697. ABNT Rio de Janeiro, , 2018.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 17054: agregados: determinação da composição granulométrica: método de ensaio**. ABNT Rio de Janeiro, 2022.

ACOSTA-CALDERON, Samantha et al. Comparative evaluation of sisal and polypropylene fiber reinforced concrete properties. **Fibers**, v. 10, n. 4, p. 31, 2022.

AHMED, Ghafur H.; ASKANDAR, Nasih H.; JUMAA, Ghazi B. A review of largescale 3DCP: Material characteristics, mix design, printing process, and reinforcement strategies. **Structures**, v. 43, p. 508–532, 2022.

ALARCON-RUIZ, Lucia et al. The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste. **Cement and Concrete research**, v. 35, n. 3, p. 609-613, 2005.

ALCHAAR, Aktham S.; AL-TAMIMI, Adil K. Mechanical properties of 3D printed concrete in hot temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 266, p. 120991, 2021.

ALVES FIDELIS, Maria Ernestina *et al.* The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 2, n. 2, p. 149–157, 2013.

ANDREW TING, Guan Heng *et al.* Extrudable region parametrical study of 3D printable concrete using recycled glass concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 50, p. 104091, 2022.

ARIOZ, Omer. Effects of elevated temperatures on properties of concrete. **Fire Safety Journal**, v. 42, n. 8, p. 516–522, 2007.

ARUNOTHAYAN, Arun R.; SANJAYAN, Jay G. Elevated temperature effects on 3D printed ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 367, p. 130241, 2023.

ASTM C109/C109M-21. **Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50mm] Cube Specimens)**. West Conshohocken, PAASTM International, , 15 jul. 2021.

ASTM C150. Standard Specification for Portland Cement, ASTM International. *In*: ASTM West Conshohocken, PA, USA, 2020.

ASTM C348. **Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars**. West Conshohocken, PAASTM International, , 1 abr. 2021.

ASTM C780. Test Method for Preconstruction and Construction Evaluation of Mortars for Plain and Reinforced Unit Masonry. *In*: West Conshohocken, PA: ASTM International, 15 jun. 2020.

ASTM C1437. **Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar**. West Conshohocken, PAASTM International, , 1 out. 2020.

BAO, Ta Minh Phuong et al. Testing mortars for 3D printing: correlation with rheological behavior. **Materials**, v. 17, n. 20, p. 5002, 2024.

BARBOSA, Marcella S. *et al.* Development of composites for 3D printing with reduced cement consumption. **Construction and Building Materials**, v. 341, p. 127775, 2022a.

BARBOSA, Marcella S. *et al.* Development of composites for 3D printing with reduced cement consumption. **Construction and Building Materials**, v. 341, p. 127775, 2022b.

BHATTACHERJEE, Shantanu *et al.* Sustainable materials for 3D concrete printing. **Cement and Concrete Composites**, v. 122, p. 104156, 2021.

BODDEPALLI, Uday; GANDHI, Indu Siva Ranjani; PANDA, Biranchi. Synergistic effect of fly ash and polyvinyl alcohol fibers in improving stability, rheology, and mechanical properties of 3D printable foam concrete. **Construction and Building Materials**, v. 429, p. 136464, 2024.

CAO, Mingli; XU, Ling; ZHANG, Cong. Rheology, fiber distribution and mechanical properties of calcium carbonate (CaCO₃) whisker reinforced cement mortar. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 90, p. 662–669, 2016.

CHAKRABARTI, Birbhushan; YATES, Tim; LEWRY, Andrew. Effect of fire damage on natural stonework in buildings. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 7, p. 539–544, 1996.

CHANG, Ze *et al.* A review of methods on buildability quantification of extrusion-based 3D concrete printing: From analytical modelling to numerical simulation. **Developments in the Built Environment**, v. 16, p. 100241, 2023.

CHEN, Bing; LI, Chunling; CHEN, Longzhu. Experimental study of mechanical properties of normal-strength concrete exposed to high temperatures at an early age. **Fire Safety Journal**, v. 44, n. 7, p. 997–1002, 2009.

CHEN, Yu *et al.* A review of printing strategies, sustainable cementitious materials and characterization methods in the context of extrusion-based 3D concrete printing. **Journal of Building Engineering**, v. 45, p. 103599, 2022.

CICIONE, Antonio *et al.* An experimental study of the behavior of 3D printed concrete at elevated temperatures. **Fire Safety Journal**, v. 120, p. 103075, 2021

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Consulta Preços de Mercado**. Disponível em: <<https://consultaprecosdemercado.conab.gov.br/#/home>>. Acesso em: 8 jul. 2025.

DE SCHUTTER, Geert *et al.* Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials. **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 25–36, 2018.

DIAS, Leonardo de Souza *et al.* Evaluation of mix design parameters based on basic constitutive relationships for 3DCP printing. **Cerâmica**, v. 70, p. eZXBR6170, 2024a.

DIAS, Leonardo de Souza *et al.* Evaluation of mix design parameters based on basic constitutive relationships for 3DCP printing. **Cerâmica**, v. 70, p. eZXBR6170, 2024b.

DILAWAR RIAZ, Raja *et al.* Inclusive characterization of 3D printed concrete (3DPC) in additive manufacturing: A detailed review. **Construction and Building Materials**, v. 394, p. 132229, 2023.

DING, Tao *et al.* Anisotropic behavior in bending of 3D printed concrete reinforced with fibers. **Composite Structures**, v. 254, p. 112808, 2020.

DONG, Liang *et al.* Microstructure and mechanical behaviour of 3D printed ultra-high performance concrete after elevated temperatures. **Additive Manufacturing**, v. 58, p. 103032, 2022.

DONG, Liang *et al.* Interface bonding characteristics of 3D printed ultra-high performance concrete after elevated temperatures. **Journal of Building Engineering**, v. 93, p. 109801, 2024.

EN, British Standard. 197-1, Cement-Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. **London: European Committee For Standardisation**, 2011.

FERRAZ-ALMEIDA, Risely *et al.* Potential of Sisal (*Agave sisalana*) Residues for Improving Sisal Plant Growth and Soil Residue Stocks in Bahia's Circular Agriculture. **Agronomy**, v. 15, n. 6, 2025.

FERREIRA, Saulo Rocha *et al.* Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber–matrix bond in cement based systems. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 730–740, 2015.

FERREIRA, Saulo Rocha *et al.* Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 551–561, 2017.

FERREIRA, Saulo Rocha *et al.* Effect of elevated temperature on sisal fibers degradation and its interface to cement based systems. **Construction and Building Materials**, v. 272, p. 121613, 2021.

GARCÍA, Gilberto *et al.* Natural fibers as reinforcement of mortar and concrete: A systematic review from Central and South American regions. **Journal of Building Engineering**, v. 98, p. 111267, 2024.

GEORGALI, B.; TSAKIRIDIS, P. E. Microstructure of fire-damaged concrete. A case study. **Cement and Concrete composites**, v. 27, n. 2, p. 255-259, 2005.

HABIBI, Alireza *et al.* Sustainability principles in 3D concrete printing: Analysing trends, classifying strategies, and future directions. **Journal of Building Engineering**, v. 98, p. 111354, 2024.

HAGER, Izabela. Colour Change in Heated Concrete. **Fire Technology**, v. 50, n. 4, p. 945–958, 2014.

HALEEM, Abid; JAVAID, Mohd. Additive Manufacturing Applications in Industry 4.0: A Review. **Journal of Industrial Integration and Management**, v. 04, n. 04, p. 1930001, 28 ago. 2019.

HAMBACH, Manuel; VOLKMER, Dirk. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. **Cement and Concrete Composites**, v. 79, p. 62–70, 2017.

HAN, Nv *et al.* A microscale-based numerical model for investigating hygro-thermo-mechanical behaviour of 3D printed concrete at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 344, p. 128231, 2022.

HOU, Shaodan *et al.* A review of 3D printed concrete: Performance requirements, testing measurements and mix design. **Construction and Building Materials**, v. 273, p. 121745, 2021.

HOU, Shaodan *et al.* Rheology of fiber-reinforced mortar for 3D printing construction: Effect of recycled hybrid powder and polyethylene fiber. **Construction and Building Materials**, v. 447, p. 138126, 2024.

ISO/ASTM 52939. **A New Standard for Construction 3D Printing, 3D Printing Industry**, 2023.

JABBOUR, Ralph; ASSAAD, Joseph; HAMAD, Bilal. Cost-to-performance assessment of polyvinyl alcohol fibers in concrete structures. **Mechanics of Advanced Materials and Structures**, 5 fev. 2021.

JIA, Zijian *et al.* Printability and mechanical properties of 3D printing ultra-high performance concrete incorporating limestone powder. **Construction and Building Materials**, v. 426, p. 136195, 2024a.

JIA, Zijian *et al.* Effect of steel fiber shape and content on printability, microstructure and mechanical properties of 3D printable high strength cementitious materials. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, p. e03080, 2024b.

JIANG, Quan *et al.* Modification effect of nanosilica and polypropylene fiber for extrusion-based 3D printing concrete: Printability and mechanical anisotropy. **Additive Manufacturing**, v. 56, p. 102944, 2022.

JUBINVILLE, Dylan *et al.* Hemp hurd filled PLA-PBAT blend biocomposites compatible with additive manufacturing processes: Fabrication, rheology, and material property investigations. **Polymer Composites**, v. 44, n. 12, p. 8946–8961, 1 dez. 2023.

KAZEMIAN, Ali *et al.* Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 639–647, 2017.

KHAN, Mirza Aamish Hassan *et al.* Comprehensive review of 3D printed concrete, life cycle assessment, AI and ML models: Materials, engineered properties and techniques for additive manufacturing. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 43, p. e01164, 2025.

KHOURY, Gabriel Alexander. Effect of fire on concrete and concrete structures. **Progress in structural engineering and materials**, v. 2, n. 4, p. 429-447, 2000.

KRUGER, Jacques *et al.* Facilitating ductile failure of 3D printed concrete elements in fire. *In: Springer*, 2020.

KRUGER, Jacques; ZERANKA, Stephan; VAN ZIJL, Gideon. An ab initio approach for thixotropy characterisation of (nanoparticle-infused) 3D printable concrete. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 372–386, 2019.

LE, T. T. *et al.* Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. **Materials and Structures**, v. 45, n. 8, p. 1221–1232, 2012.

LI, Chao; SUN, Henghu; LI, Longtu. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 9, p. 1341–1349, 2010.

LI, Min; QIAN, ChunXiang; SUN, Wei. Mechanical properties of high-strength concrete after fire. **Cement and concrete research**, v. 34, n. 6, p. 1001-1005, 2004.

LI, Yan; MAI, Yiu-Wing; YE, Lin. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. **Composites Science and Technology**, v. 60, n. 11, p. 2037–2055, 2000.

LIU, Bing *et al.* Study on anisotropy of 3D printing PVA fiber reinforced concrete using destructive and non-destructive testing methods. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, p. e01519, 2022.

LIU, Chao *et al.* Influence of hydroxypropyl methylcellulose and silica fume on stability, rheological properties, and printability of 3D printing foam concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 122, p. 104158, 2021.

LIU, Dawei *et al.* 3D printing concrete structures: State of the art, challenges, and opportunities. **Construction and Building Materials**, v. 405, p. 133364, 2023.

LIU, Qiang *et al.* Porous diatomite promotes lightweight and low-carbon concrete 3D printing: An exploratory study. **Journal of Building Engineering**, v. 103, p. 112071, 2025.

LU, Yue; XIAO, Jianzhuang; LI, Yan. 3D printing recycled concrete incorporating plant fibres: A comprehensive review. **Construction and Building Materials**, v. 425, p. 135951, 2024.

LUO, Surong; LI, Wenqiang; WANG, Dehui. Study on bending performance of 3D printed PVA fiber reinforced cement-based material. **Construction and Building Materials**, v. 433, p. 136637, 2024.

LYU, Shaoxiong *et al.* Influence of sisal fibers on mechanical properties and thermal conductivity of fully recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 470, p. 140478, 2025.

M. SONEBI S. AMZIANE A. ABDALQADER AND A. PERROT, M. Dedenis. Effect of Red Mud, Nanoclay, and Natural Fiber on Fresh and Rheological Properties of Three-Dimensional Concrete Printing. **ACI Materials Journal**, v. 118, n. 6, 2021.

MA, Guowei *et al.* Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing. **Construction and Building Materials**, v. 202, p. 770–783, 2019.

MA, Jinyi *et al.* Effect of clay brick powder and recycled fine aggregates on properties of 3D printed concrete after high temperature exposure. **Construction and Building Materials**, v. 491, p. 142676, 2025.

MA, Lei *et al.* Pore structure, internal relative humidity, and fiber orientation of 3D printed concrete with polypropylene fiber and their relation with shrinkage. **Journal of Building Engineering**, v. 61, p. 105250, 2022a.

MA, Qianmin *et al.* Mechanical properties of concrete at high temperature—A review. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 371–383, 2015.

MA, Wei *et al.* Polyacrylonitrile fiber reinforced 3D printed concrete: Effects of fiber length and content. **Journal of Building Engineering**, v. 97, p. 110869, 2024.

MA, Xiaomeng *et al.* A review on cement-based materials used in steel structures as fireproof coating. **Construction and Building Materials**, v. 315, p. 125623, 2022b.

MALIK, Manisha; BHATTACHARYYA, S. K.; BARAI, Sudhirkumar V. Thermal and mechanical properties of concrete and its constituents at elevated temperatures: A review. **Construction and Building Materials**, v. 270, p. 121398, 2021.

MARCHON, Delphine *et al.* Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry. **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 96–110, 2018.

MECHTCHERINE, Viktor *et al.* Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing. **Automation in Construction**, v. 107, p. 102933, 2019.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014. 2. ed.

MOHAMED, Osama; MISHRA, Anamika; ISAM, Fida. An overview of 3D printed concrete for building structures: Material properties, sustainability, future opportunities, and challenges. **Structures**, v. 78, p. 109284, 2025.

MOREIRA, Tamara Nunes da C. *et al.* Self-healing of slag-cement ultra-high performance steel fiber reinforced concrete (UHPRFC) containing sisal fibers as healing conveyor. **Journal of Building Engineering**, v. 54, p. 104638, 2022.

MOULIN, E.; BLANC, P.; SORRENTINO, D. Influence of key cement chemical parameters on the properties of metakaolin blended cements. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, n. 6, p. 463–469, 2001.

MUHAMMAD SALMAN, Nazar *et al.* Importance and potential of cellulosic materials and derivatives in extrusion-based 3D concrete printing (3DCP): Prospects and challenges. **Construction and Building Materials**, v. 291, p. 123281, 2021.

MUKHERJEE, P. S.; SATYANARAYANA, K. G. Structure and properties of some vegetable fibres - Part 1 Sisal fibre. **Journal of Materials Science**, v. 19, n. 12, p. 3925–3934, 1984.

NERELLA, V. N. *et al.* Inline quantification of extrudability of cementitious materials for digital construction. **Cement and Concrete Composites**, v. 95, p. 260–270, 2019.

NETINGER GRUBEŠA, Ivanka *et al.* Effect of hemp fibers on fire resistance of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 184, p. 473–484, 2018.

NOVAK, Josef; KOHOUTKOVA, Alena. Mechanical properties of concrete composites subject to elevated temperature. **Fire Safety Journal**, v. 95, p. 66–76, 2018.

NUNES, Gabrielly M. *et al.* Evaluation of the mechanical behaviour of representative volumetric elements of 3DCP masonry mixtures with partial replacement of cement by limestone filler and metakaolin. **Journal of Building Engineering**, v. 78, p. 107650, 2023.

PANDA, Biranchi; CHANDRA PAUL, Suvash; JEN TAN, Ming. Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material. **Materials Letters**, v. 209, p. 146–149, 2017.

PARITALA, Spandana *et al.* Rheology and pumpability of mix suitable for extrusion-based concrete 3D printing – A review. **Construction and Building Materials**, v. 402, p. 132962, 2023.

PENG, Gai-Fei; HUANG, Zhi-Shan. Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 4, p. 593–599, 2008.

PHAM, Loan Thi; HUANG, Jie Yi. 3D printed artificial coral reefs: design and manufacture. **Low-carbon Materials and Green Construction**, v. 2, n. 1, p. 23, 2024.

PRADEEP, S.; RAMASWAMY, Ananth. Early age creep behavior of 3D printable mortar: Hydration and viscoelasticity coupling model. **Mechanics of Materials**, p. 105484, 2025.

POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L. Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 12, p. 2215–2222, 2004.

RAFI, Abdullah Al *et al.* Experimental investigation on mechanical and physical properties of sisal fiber reinforced hybrid composites with filler material. **Next Research**, v. 2, n. 3, p. 100509, 2025.

RAMAKRISHNAN, Sayanthan *et al.* Concrete 3D printing of lightweight elements using hollow-core extrusion of filaments. **Cement and Concrete Composites**, v. 123, p. 104220, 2021.

REITER, Lex *et al.* The role of early age structural build-up in digital fabrication with concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 86–95, 2018.

REN, Guosheng; GAO, Xiaojian; ZHANG, Hongzhi. Utilization of hybrid sisal and steel fibers to improve elevated temperature resistance of ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 130, p. 104555, 2022.

ROCHA, Joaquin Humberto Aquino; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. Microstructure, hydration process, and compressive strength assessment of ternary mixtures containing Portland cement, recycled concrete powder, and metakaolin. **Journal of Cleaner Production**, v. 434, p. 140085, 2024.

ROUSSEL, Nicolas. Rheological requirements for printable concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 76–85, 2018.

SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, n. 6, p. 441–454, 2001.

ŞAHİN, Hatice Gizem *et al.* Degradation of mechanical properties of 3D fiber reinforced printed concrete mixtures exposed to elevated temperatures. **Case Studies in Construction Materials**, v. 22, p. e04506, 2025.

SAPATA, Alise *et al.* Establishing benchmark properties for 3d-printed concrete: A study of printability, strength, and durability. **Journal of Composites Science**, v. 9, n. 2, p. 74, 2025.

SCHNEIDER, Ulrich. Concrete at high temperatures — A general review. **Fire Safety Journal**, v. 13, n. 1, p. 55–68, 1988.

SCRIVENER, Karen L.; JOHN, Vanderley M.; GARTNER, Ellis M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2–26, 2018.

SEGAL, L. *et al.* An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer. **Textile Research Journal**, v. 29, n. 10, p. 786–794, 1959.

SHEHATA, Nabila *et al.* Geopolymer concrete as green building materials: Recent applications, sustainable development and circular economy potentials. **Science of The Total Environment**, v. 836, p. 155577, 2022.

SHORT, N. R.; PURKISS, J. A.; GUISE, S. E. Assessment of fire damaged concrete using colour image analysis. **Construction and Building Materials**, v. 15, n. 1, p. 9–15, 2001.

SIDDIKA, Ayesha *et al.* 3D-printed concrete: applications, performance, and challenges. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 9, n. 3, p. 127–164, 3 maio 2020.

SIDDIQUI, M. A. Shadab *et al.* Biodegradable natural polymers and fibers for 3D printing: A holistic perspective on processing, characterization, and advanced applications. **Cleaner Materials**, v. 14, p. 100275, 2024.

SILVA, Flávio de Andrade *et al.* Physical and mechanical properties of durable sisal fiber–cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 5, p. 777–785, 2010.

SILVA, Flávio de Andrade *et al.* Effect of fiber shape and morphology on interfacial bond and cracking behaviors of sisal fiber cement based composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 8, p. 814–823, 2011.

SUN, Bochao *et al.* Evaluation of mechanical properties and anisotropy of 3D printed concrete at different temperatures. **Structures**, v. 51, p. 391–401, 2023.

TABASSUM, Toiba; AHMAD MIR, Ajaz. A review of 3d printing technology-the future of sustainable construction. **Materials Today: Proceedings**, v. 93, p. 408–414, 2023.

TEIXEIRA, R. S. *et al.* Extrudability of cement-based composites reinforced with curauá (*Ananas erectifolius*) or polypropylene fibers. **Construction and Building Materials**, v. 205, p. 97–110, 2019.

TEIXEIRA, Ronaldo Soares *et al.* Extruded cement based composites reinforced with sugar cane bagasse fibres. **Key Engineering Materials**, v. 517, p. 450–457, 2012.

THAJEEL, M. M.; BALÁZS, G. L. 3D Printed Concrete: Fresh and Hardened Properties. **Periodica Polytechnica-Civil Engineering**, v. 69, n. 1, p. 12–27, 2025.

THIERY, Mickaël *et al.* Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: Effects of the chemical kinetics. **Cement and concrete research**, v. 37, n. 7, p. 1047-1058, 2007

TING, Guan Heng Andrew *et al.* Utilization of recycled glass for 3D concrete printing: rheological and mechanical properties. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 21, n. 4, p. 994–1003, 2019.

TOLÊDO FILHO, Romildo D. *et al.* Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, n. 2, p. 127–143, 2000.

TOLEDO FILHO, Romildo Dias *et al.* Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 6, p. 2409–2420, 2009.

TRAN, Mien V; CU, Yen T. H.; LE, Chau V. H. Rheology and shrinkage of concrete using polypropylene fiber for 3D concrete printing. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 103400, 2021.

VAF AEI, Davoud *et al.* Microstructural and mechanical properties of fiber-reinforced seawater sea-sand concrete under elevated temperatures. **Journal of Building Engineering**, v. 50, p. 104140, 2022.

VARELA, Hugo *et al.* 3D printable cement-based composites reinforced with Sisal fibers: Rheology, printability and hardened properties. **Construction and Building Materials**, v. 450, p. 138687, 2024.

VILLAGRÁN-ZACCARDI, Yury Andrés *et al.* Calibrated quantitative thermogravimetric analysis for the determination of portlandite and calcite content in hydrated cementitious systems. **Materials and Structures**, v. 50, n. 3, p. 179, 2017.

WANG, Li *et al.* Mechanical and microstructural properties of 3D-printed aluminate cement based composite exposed to elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 353, p. 129144, 2022.

WANG, Xiaonan *et al.* Concrete 3D printing technology for sustainable construction: A review on raw material, concrete type and performance. **Developments in the Built Environment**, v. 17, p. 100378, 2024.

WARSI, Syed Bustan Fatima; PANDA, Biranchi; BISWAS, Pankaj. Exploring fibre addition methods and mechanical properties of fibre-reinforced 3D printed concrete: A review. **Developments in the Built Environment**, v. 16, p. 100295, 2023.

WEI, Jianqiang; MEYER, Christian. Improving degradation resistance of sisal fiber in concrete through fiber surface treatment. **Applied Surface Science**, v. 289, p. 511–523, 2014.

WENG, Yiwei *et al.* Printability and fire performance of a developed 3D printable fibre reinforced cementitious composites under elevated temperatures. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 14, n. 3, p. 284–292, 3 jul. 2019.

XIA, Zhenjiang *et al.* Comparative analysis of polypropylene, basalt, and steel fibers in 3D printed concrete: Effects on flowability, printability, rheology, and mechanical performance. **Construction and Building Materials**, v. 465, p. 140098, 2025.

XIAO, Jianzhuang *et al.* Mechanical and microstructural evolution of 3D printed concrete with polyethylene fiber and recycled sand at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 293, p. 123524, 2021a.

XIAO, Jianzhuang *et al.* Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities. **Cement and Concrete Composites**, v. 122, p. 104115, 2021b.

XIAO, Jianzhuang *et al.* Rheology of 3D printable concrete prepared by secondary mixing of ready-mix concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 138, p. 104958, 2023.

XIAO, Jianzhuang; KÖNIG, Gert. Study on concrete at high temperature in China—an overview. **Fire Safety Journal**, v. 39, n. 1, p. 89–103, 2004.

XUE, Jia-Chen *et al.* Development of Sustainable 3D Printing Concrete Materials: Impact of Natural Minerals and Wastes at High Replacement Ratios. **Journal of Building Engineering**, p. 114020, 2025.

YERMAK, N. *et al.* Influence of steel and/or polypropylene fibres on the behaviour of concrete at high temperature: Spalling, transfer and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 132, p. 240–250, 2017.

ZAT, Tuani *et al.* Rheological properties of high-performance concrete reinforced with microfibers and their effects on 3D printing process. **Journal of Building Engineering**, v. 105, p. 112406, 2025.

ZHANG, Chao *et al.* Mix design concepts for 3D printable concrete: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 122, p. 104155, 2021.

ZHANG, Jingchuan *et al.* A review of the current progress and application of 3D printed concrete. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 125, p. 105533, 2019.

ZHANG, Kaijian *et al.* Evaluation of anisotropy and statistical parameters of compressive strength for 3D printed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 440, p. 137417, 2024.

ZHANG, Yi *et al.* Comparison of printability and mechanical properties of rigid and flexible fiber-reinforced 3D printed cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 400, p. 132750, 2023.

ZHANG, Yi *et al.* A potential active rheology control approach for 3D printable cement-based materials: Coupling of temperature and viscosity modifiers. **Cement and Concrete Composites**, v. 149, p. 105496, 2024.

ZHANG, Yi *et al.* Layer interface characteristics and adhesion of 3D printed cement-based materials exposed to post-printing temperature disturbance. **Cement and Concrete Composites**, v. 155, p. 105837, 2025.

ZHAO, Zengfeng *et al.* A critical review on reducing the environmental impact of 3D printing concrete: Material preparation, construction process and structure level. **Construction and Building Materials**, v. 409, p. 133887, 2023.

ZHOU, Biao *et al.* Mechanical and microstructure evolution of 3D printed concrete interlayer at elevated temperatures. **Journal of Building Engineering**, v. 107, p. 112706, 2025.

ZHOU, Boyu; ZHANG, Mo; MA, Guowei. An experimental study on 3D printed concrete reinforced with fibers recycled from wind turbine blades. **Journal of Building Engineering**, v. 91, p. 109578, 2024.

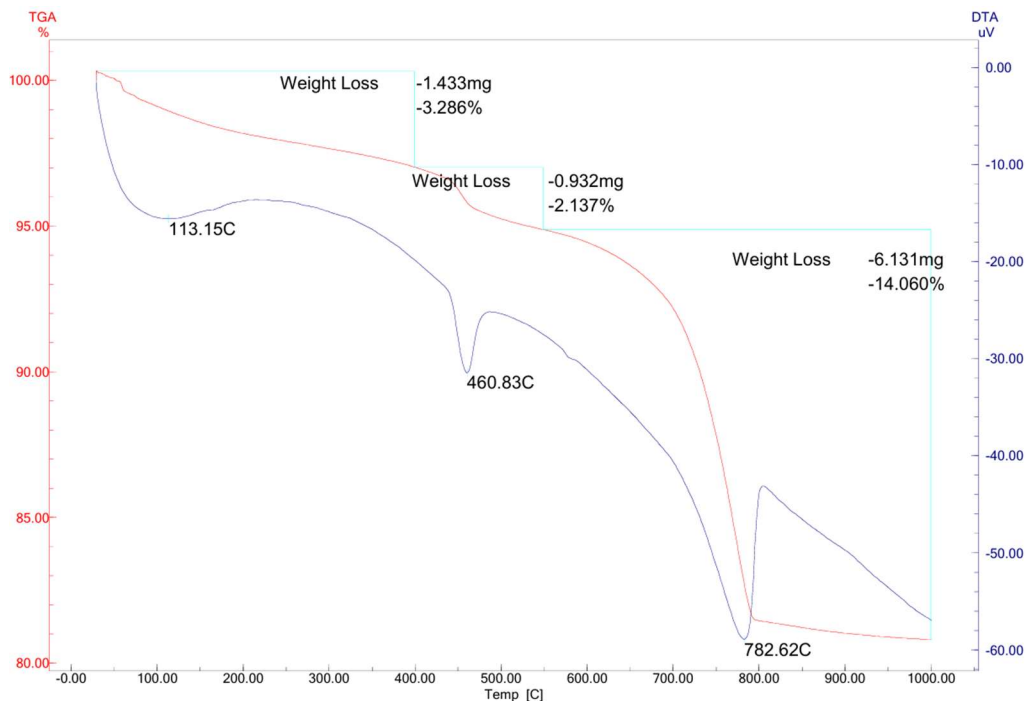
ZHOU, Jiehang *et al.* Effect of directionally distributed steel fiber on static and dynamic properties of 3D printed cementitious composite. **Construction and Building Materials**, v. 318, p. 125948, 2022.

ZHOU, Yiyi *et al.* Enhancement of 3D printed cementitious composite by short fibers: A review. **Construction and Building Materials**, v. 362, p. 129763, 2023.

ZHU, Wenxuan *et al.* Rheological performance regulation and material optimization of manufactured sand concrete in 3D printing. **Construction and Building Materials**, v. 483, p. 141735, 2025.

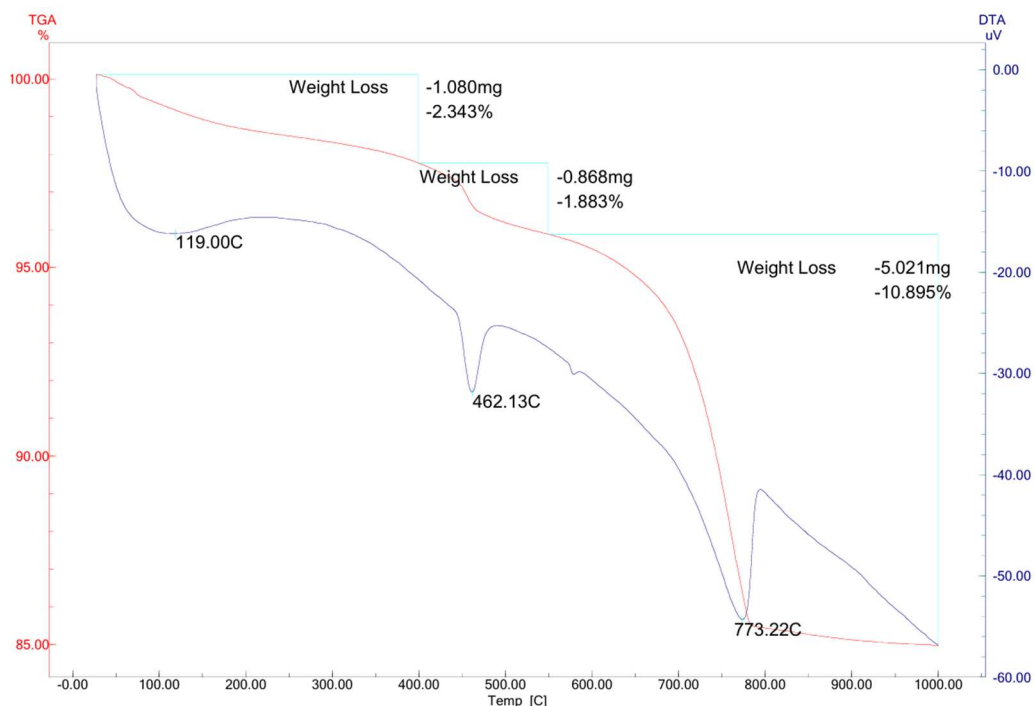
APÊNDICE - Curvas TG e DTG das amostras dos blocos aquecidos

Figura 44 - Curvas TG e DTA referentes à amostra coletada no ponto interno do bloco REF-LFMK, após aquecimento a 400 °C.



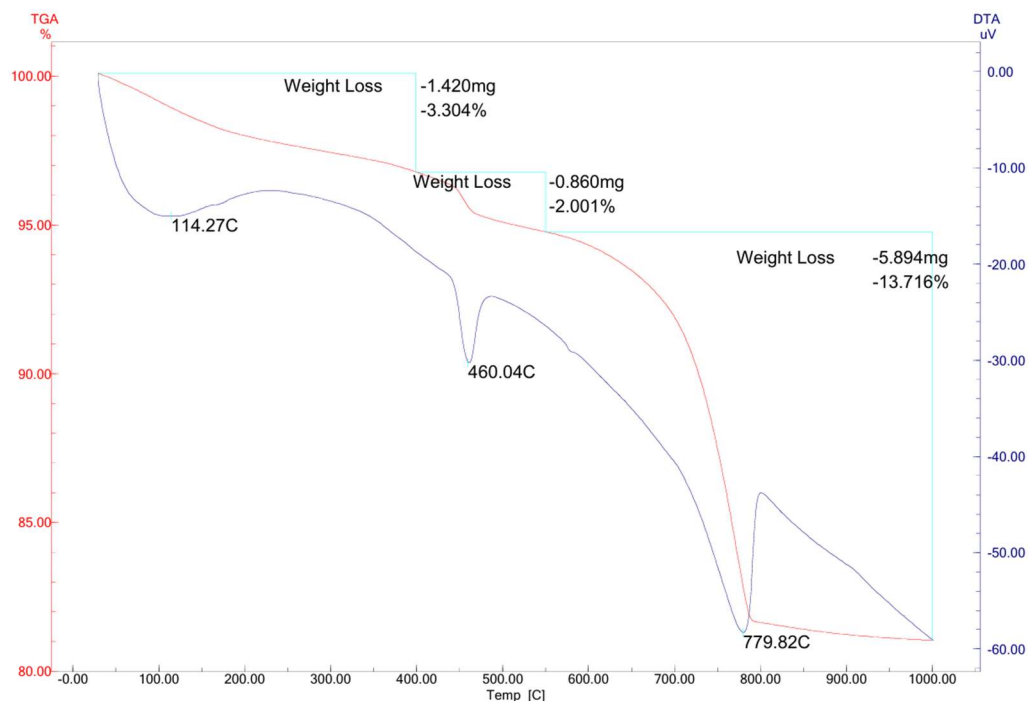
Fonte: Autoria própria.

Figura 45 - Curvas TG e DTA referentes à amostra coletada no meio da camada do bloco REF-LFMK, após aquecimento a 400 °C.



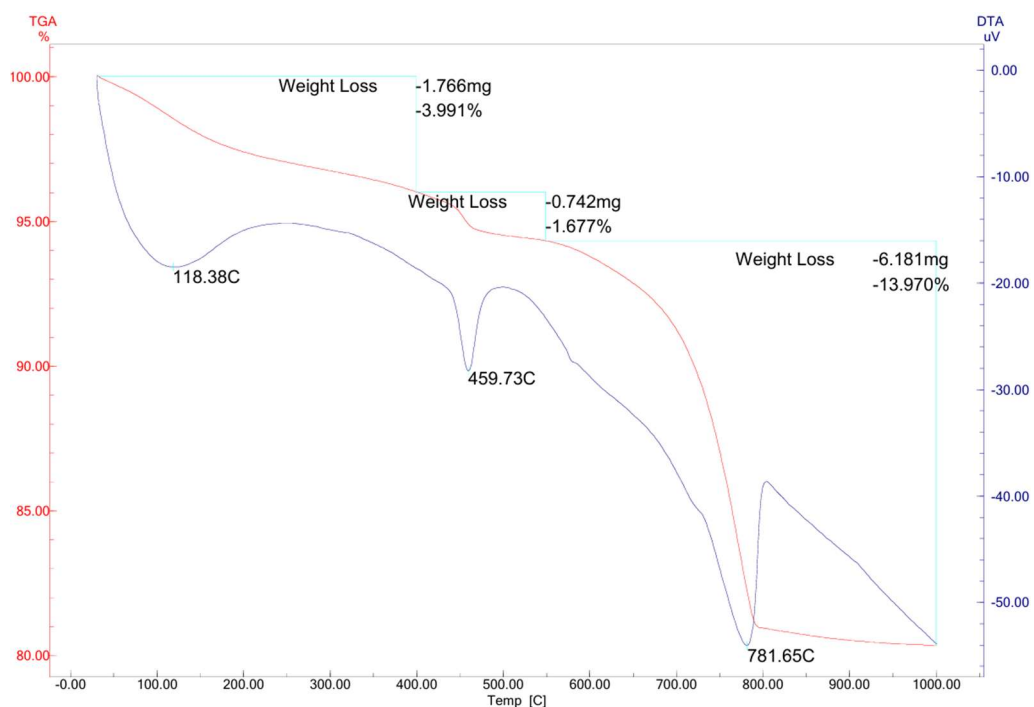
Fonte: Autoria própria.

Figura 46 - Curvas TG e DTA referentes à amostra coletada no ponto externo do bloco REF-LFMK, após aquecimento a 400 °C.



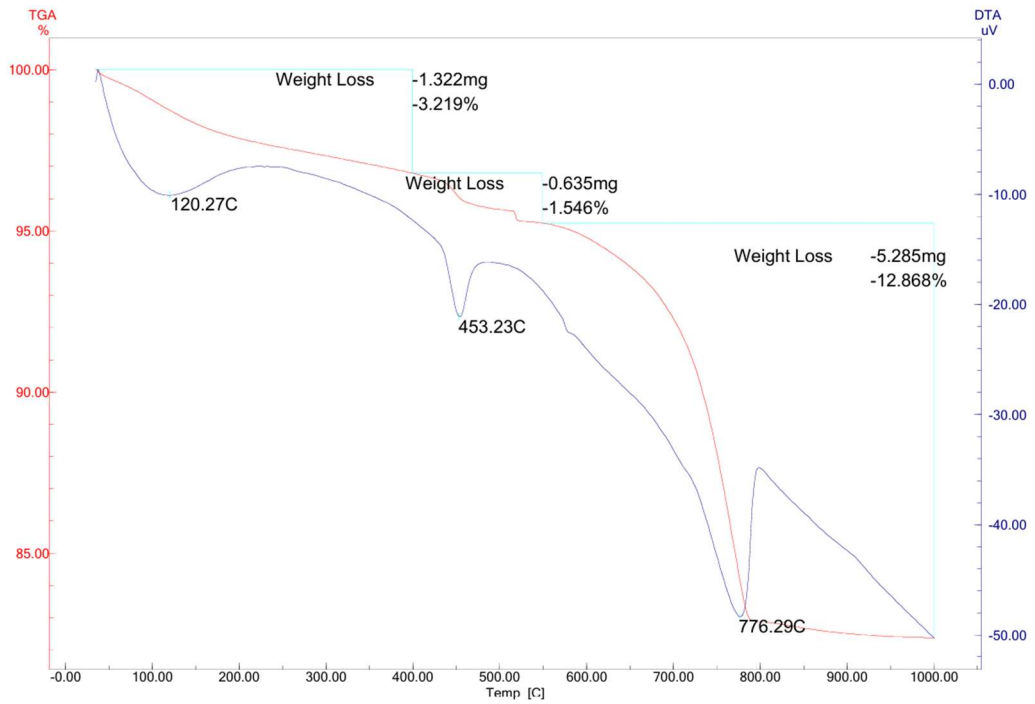
Fonte: Autoria própria.

Figura 47 - Curvas TG e DTA referentes à amostra coletada no ponto interno do bloco SF05%12, após aquecimento a 400 °C.



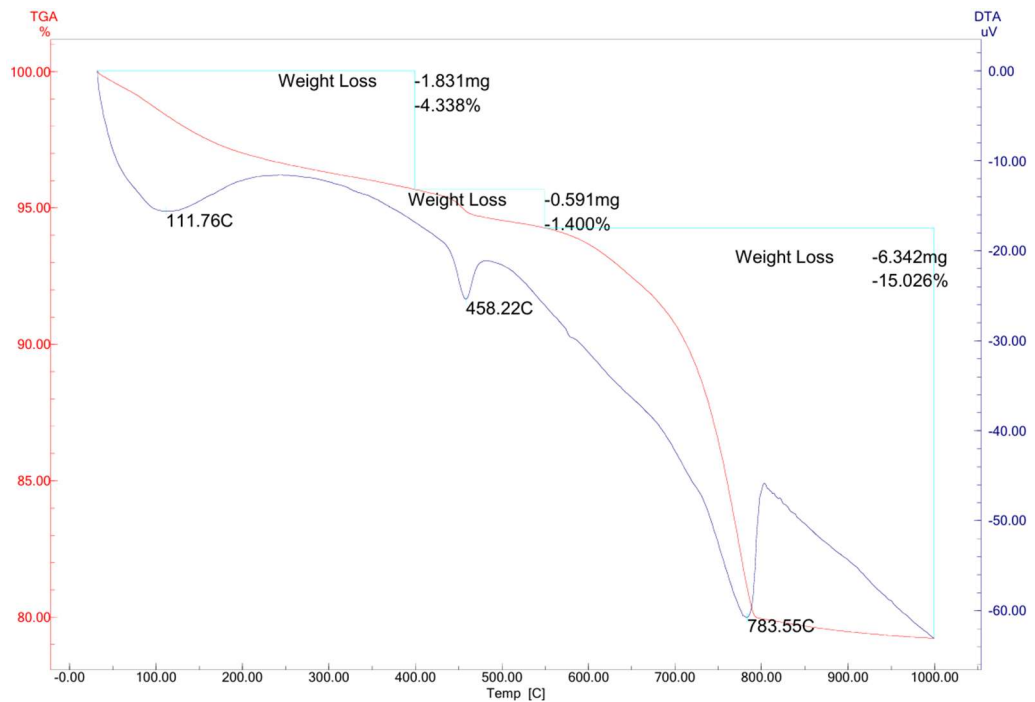
Fonte: Autoria própria.

Figura 48 - Curvas TG e DTA referentes à amostra coletada no meio da camada do bloco SF05%12, após aquecimento a 400 °C.



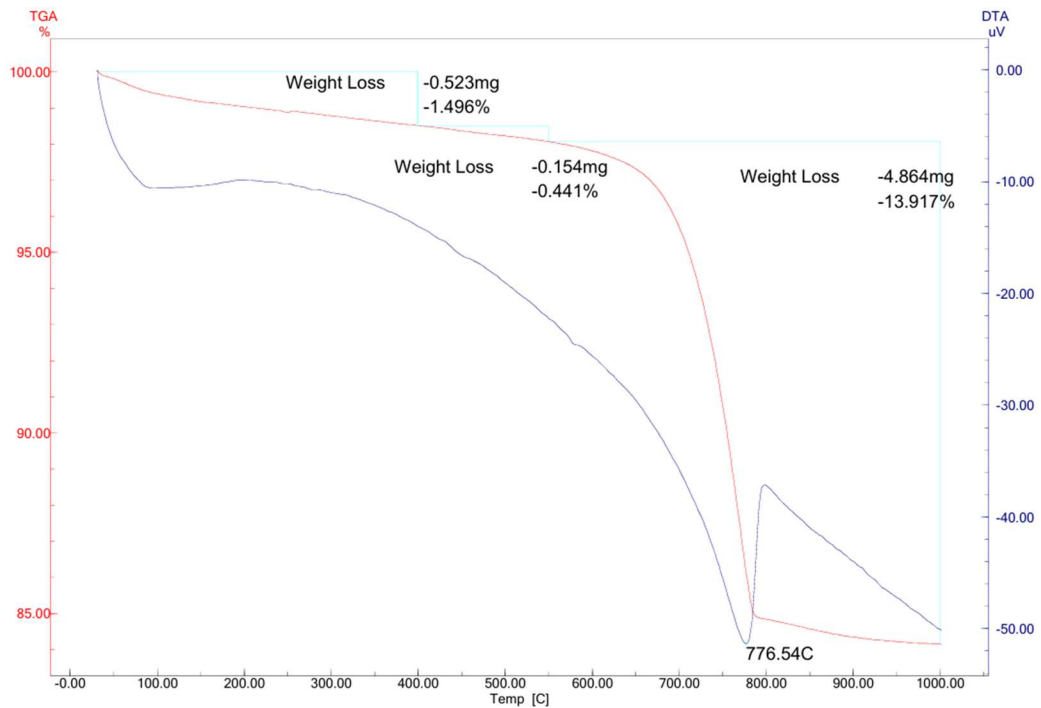
Fonte: Autoria própria.

Figura 49 - Curvas TG e DTA referentes à amostra coletada no ponto externo do bloco SF05%12, após aquecimento a 400 °C.



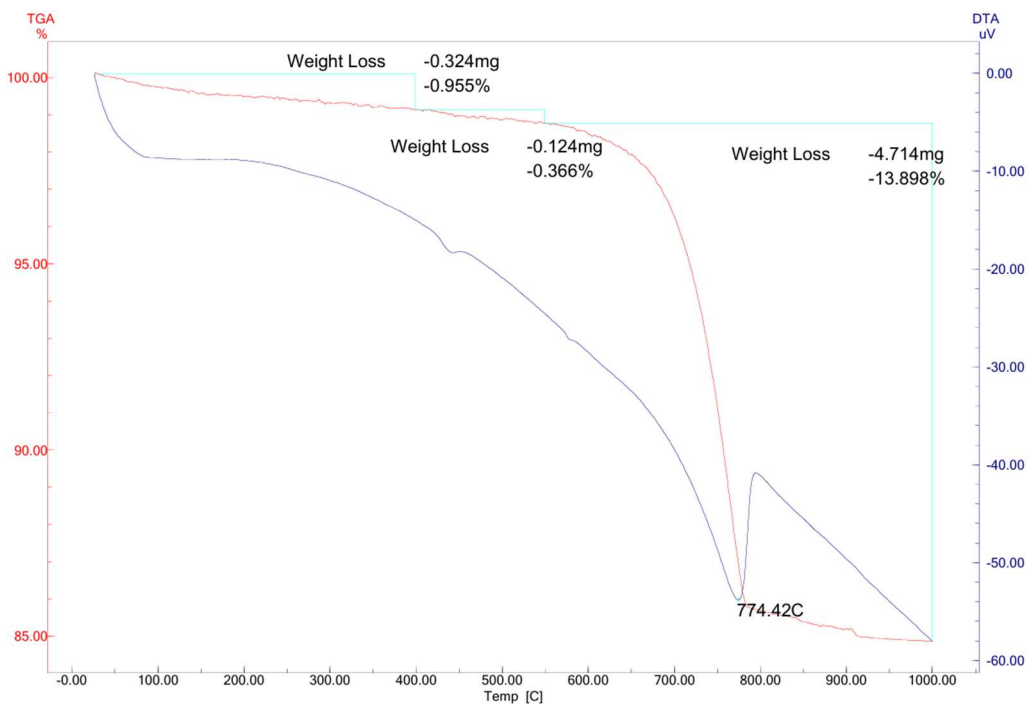
Fonte: Autoria própria.

Figura 50 - Curvas TG e DTA referentes à amostra coletada no ponto interno do bloco REF-LFMK, após aquecimento a 600 °C.



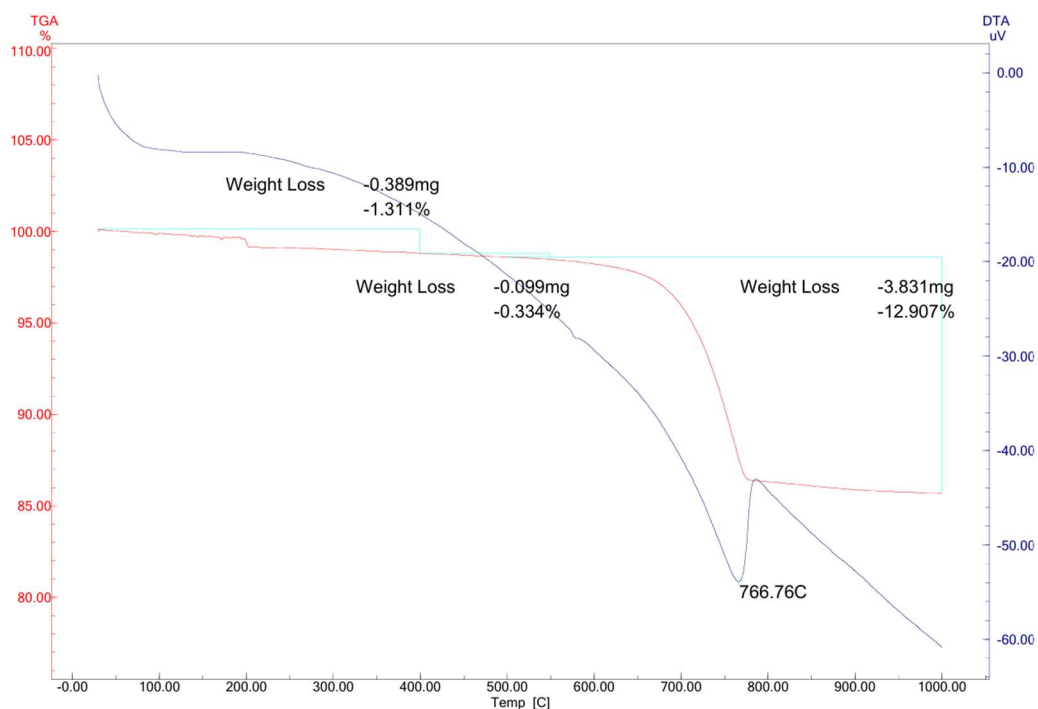
Fonte: Autoria própria.

Figura 51 - Curvas TG e DTA referentes à amostra coletada no meio da camada do bloco REF-LFMK, após aquecimento a 600 °C.



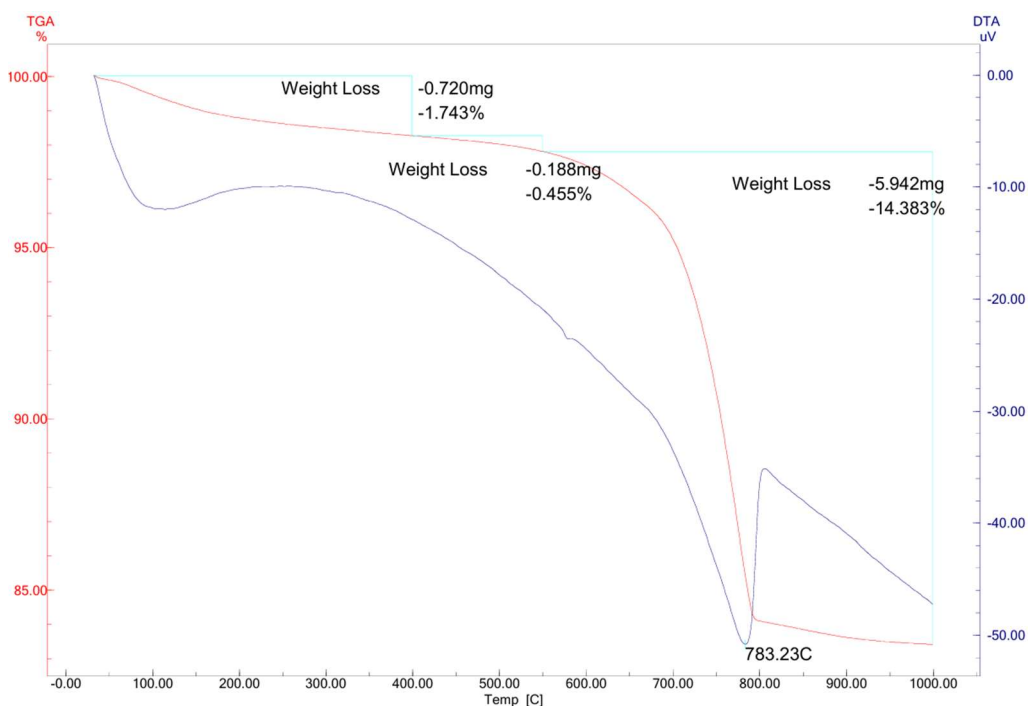
Fonte: Autoria própria.

Figura 52 - Curvas TG e DTA referentes à amostra coletada no ponto externo do bloco REF-LFMK, após aquecimento a 600 °C.



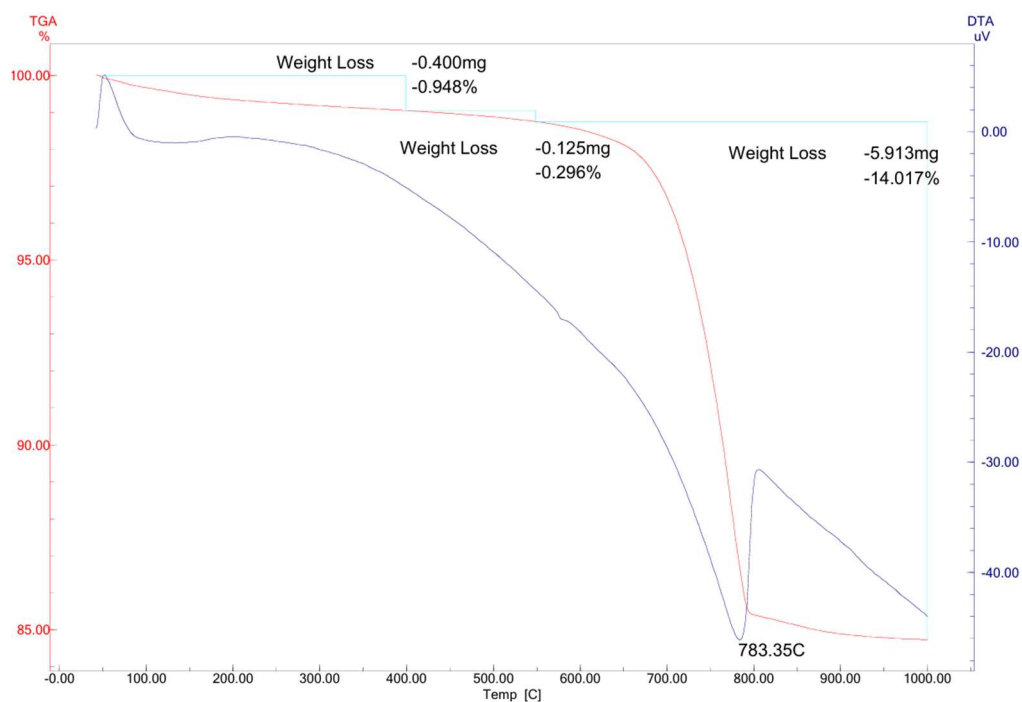
Fonte: Autoria própria.

Figura 53 - Curvas TG e DTA referentes à amostra coletada no ponto interno do bloco SF05%12, após aquecimento a 600 °C.



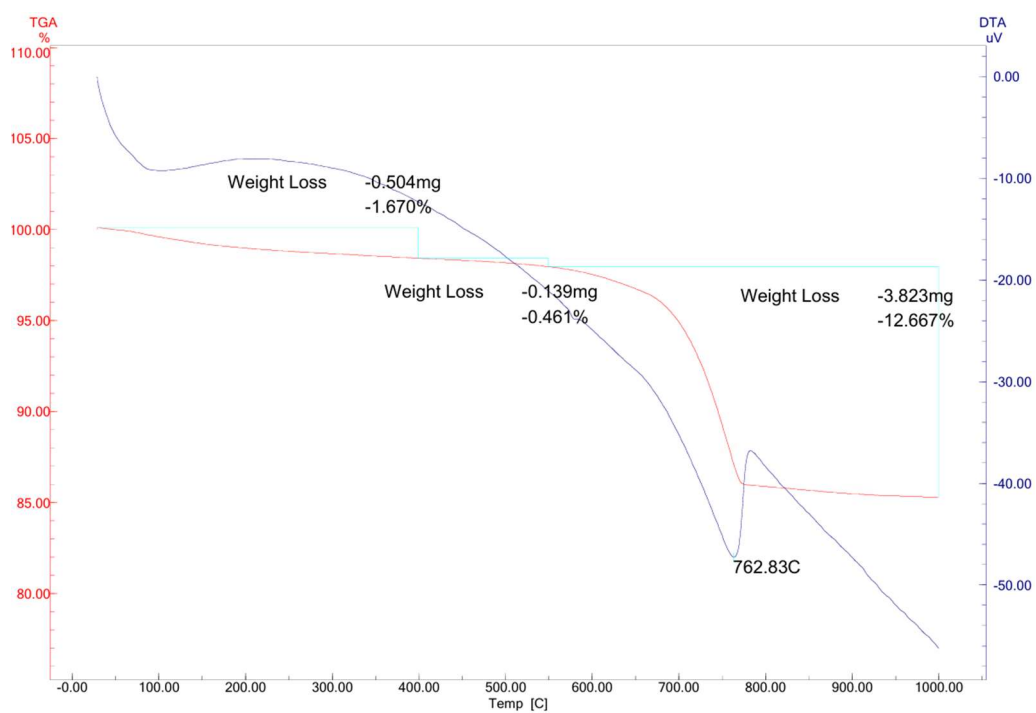
Fonte: Autoria própria.

Figura 54 - Curvas TG e DTA referentes à amostra coletada no meio da camada do bloco SF05%12, após aquecimento a 600 °C.



Fonte: Autoria própria.

Figura 55 - Curvas TG e DTA referentes à amostra coletada no ponto externo do bloco SF05%12, após aquecimento a 600 °C.



Fonte: Autoria própria.