

## Estudo da adição de fibras kraft (embalagens de cimento recicladas) nas propriedades químicas e microestruturais de matrizes cimentícias

Description of MS Wordstly lesused in the journal Matéria

Lilian de Sousa Alves<sup>1</sup>, Cláudio Henrique de Almeida Feitosa Pereira<sup>1</sup>, Enio José Pazini Figueiredo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil. Prédio SG12, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, DF, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental. Avenida Universitária, Quadra 86, Lote1488, Goiânia, GO, Brasil.

e-mail: lilian\_sousalves@hotmail.com, claudiochp@gmail.com, epazini@terra.com.br

### RESUMO

O trabalho tem como objetivo a caracterização química e microestrutural dos compósitos, verificando o índice de inibição das fibras vegetais com a matriz cimentícia, sua interferência na hidratação do cimento Portland, a composição química da fibra e do compósito, e possíveis processos de degradação da fibra na matriz. As matérias-primas utilizadas para formar os compósitos incluíram: cimento Portland, fibras kraft e água. Foram avaliados diferentes teores de adição de fibras kraft (referência, 0,5%, 1,0% e 3,0%) em relação a massa de cimento e três relações água/cimento (0,40; 0,45 e 0,50). Foi possível avaliar a interferência das fibras kraft na hidratação do cimento Portland, sendo essa classificada como baixa inibição, demonstrando a compatibilidade das fibras com a matriz cimentícia de acordo com as análises realizadas. Em relação à temperatura não foram constatadas grandes diferenças que evidenciassem um retardo da hidratação devido os componentes inibitórios da fibra vegetal, assim como não foi detectado processo de degradação das fibras kraft (mineralização).

**Palavras-chave:** Embalagem de cimento; Fibra kraft; matriz cimentícia; índice de inibição.

### ABSTRACT

The objective of the work is the chemical and microstructural characterization of the composites, verifying the inhibition index of the vegetable fibers with the cementitious matrix, its interference in the hydration of the Portland cement, the chemical composition of the fiber and the composite, and possible processes of degradation of the fiber in the matrix. The raw materials used to form the composites included: Portland cement, kraft fibers and water. Different levels of kraft fiber addition (reference, 0.5%, 1.0% and 3.0%) were evaluated in relation to cement mass and threewater/cement ratios (0.40; 0.45 and 0.50). It was possible to evaluate the interference of kraft fibers in the hydration of Portland cement, which was classified as low inhibition, demonstrating the compatibility of the fibers with the cementitious matrix according to the analyzes carried out. Regarding the temperature, no major differences were found that would show a delay in hydration due to the inhibitory components of the vegetable fiber, as well as no degradation process of the kraft fibers (mineralization) was detected.

**Keywords:** Cement packing; kraft fiber; cement matrix; inhibition index.

### 1. INTRODUÇÃO

Embora a construção civil contribua como um importante segmento para o desenvolvimento econômico e social do país, este setor também é responsável por impactos ambientais significativos oriundos de suas atividades PASCHOALIN [1]. No Brasil a construção civil consome grandes quantidades de recursos naturais, além de gerar um significativo volume de resíduos. No ano de 2018 foram gerados aproximadamente 84 milhões de metros cúbicos de resíduos de construção e demolição (RCC), demandando da indústria e entes públicos, sistemas de gerenciamento e gestão de resíduos eficientes e sustentáveis SINIR [2].

No ano de 2019, último ano de coleta de dados antes da pandemia do COVID, a produção brasileira de cimento Portland alcançou 50,7 milhões de toneladas SNIC [3]. Considerando que o consumo de cimento ensacado é maior que o de cimento a granel, no ano de 2019 aproximadamente 68% do produto foi comercializado na forma ensacada, o que equivale a 34,6 milhões de toneladas de cimento.

Para produzir as embalagens destinadas ao ensacamento do cimento utiliza-se o saco de papel kraft multifoliado, pois atendem as exigências dos fluxos de produção das ensacadeiras, permitindo o seu preenchimento com o cimento ainda bastante quente, recém saído do processo produtivo. Essa embalagem ainda apresenta boa resistência mecânica, compatível ao transporte e ao armazenamento correto, essencial para impedir perdas e alterações nas características do produto ensacado.

No Brasil, atualmente o cimento Portland é comercializado em embalagens de 50 kg, 40 kg e 25 kg, e conforme o Termo de Compromisso acordado pelo Ministério Público do Trabalho (MPT) [4] com 33 empresas produtoras de cimento, o prazo para os fabricantes adequarem a produção para o padrão de embalagem com 25 kg, iniciou em 31 de dezembro de 2018, tendo a data limite de 1º de janeiro de 2029 para a total proibição da produção e comercialização do cimento Portland em sacos de 50 kg no país.

Considerando que cada embalagem de papel kraft multifoliado, em sua maioria, serve para ensacar 50 Kg de cimento, estima-se que no Brasil, no ano de 2019, foram utilizadas aproximadamente 690 milhões de unidades, representando no pós-consumo uma parcelado resíduo sólido gerado pela construção civil SNIC [5].

Apesar das embalagens de cimento não se enquadram diretamente na lista de resíduos com obrigatoriedade de serem tratados pelo processo de logística reversa, está instituída na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, devendo existir um compromisso na gestão sustentável dessas embalagens por parte do setor público e privado e da sociedade sobre a destinação final dos resíduos.

As embalagens utilizadas para ensacar o cimento, após a utilização desse material são descartadas em aterros irregulares e bota foras, pois possuem uma baixa taxa de recuperação devido a dificuldade de sua reutilização causada pelas características do produto ensacado que acaba contaminando a embalagem, e da inviabilidade na operacionalização da destinação para fins de reciclagem na indústria produtora de papel e celulose, interferindo negativamente no enquadramento como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e de renda e, promotor de cidadania. O co-processamento dessas embalagens se apresenta, já que não possuem valor comercial representativo, como uma alternativa de recuperação, como substituto parcial e alternativo aos combustíveis fósseis empregados na fabricação do cimento (clínquer).

Considerando as propriedades mecânicas do papel kraft e visando um processo de valorização por meio de uma destinação adequada para esse resíduo, no próprio setor da construção civil, utilizando a logística reversa como ferramenta de gerenciamento, pode-se realizar um reprocessamento das embalagens de papel kraft para a extração das fibras dispersas, tratado neste trabalho como reciclagem, para o emprego em matrizes cimentícias.

Muitas vezes a durabilidade das fibras vegetais em compósitos cimentícios está limitada ao processo de degradação devido a elevada alcalinidade da matriz de cimento Portland, induzindo a mineralização das fibras, onde os produtos de hidratação do cimento, principalmente o hidróxido de cálcio, migram para a estrutura da fibra, ocasionando a diminuição da tenacidade do compósito a longo prazo FERREIRA *et al.* [6] e MÁRMOL *et al.* [7].

Além disso, os materiais ligno celulósicos possuem componentes inibitórios para a hidratação do cimento Portland, como a hemicelulose, amidos, açúcares, fenóis e outros extrativos, que a partir do contato com a água de amassamento tem início o processo de solubilização desses inibidores presentes nas fibras, ocasionando o retardo da pega do cimento CECHIN [8].

Diante do exposto, a pesquisa foi desenvolvida com o objetivo de contribuir com o entendimento das possíveis interferências da adição de fibras kraft, oriundas da reciclagem de embalagens de cimento usadas e coletadas em canteiros de obra, no estudo de compósitos de matriz cimentícia. Por meio de análises laboratoriais buscou-se avaliar o índice de inibição e a influência das fibras kraft acompanhando a variação da temperatura das pastas durante o processo de hidratação do cimento Portland. O entendimento da interferência da adição das fibras kraft no comportamento do compósito no estado fresco é de suma importância, pois estas poderão afetar as propriedades finais da matriz e conseqüentemente a aplicabilidade do material, além de contribuir na busca de evidências que possam fomentar a aptidão da reciclagem das embalagens de cimento pós-consumo.

## 2. MATERIAIS

### 2.1. Matriz cimentícia

Para a produção da matriz cimentícia do compósito foi utilizado o cimento Portland comum da classe 40 (CP I-40), fabricado pela Votorantim e comercializado em embalagens de 50 kg. Esse aglomerante foi escolhido

por ser um cimento sem qualquer adição além de sulfato de cálcio (utilizado como retardador da pega), conforme requisitos normativos apresentados na NBR 16697 [9], adotado com o intuito de avaliar o comportamento das fibras kraft na matriz cimentícia sem a interferência de adições.

São apresentadas na Tabela 1 a composição química do cimento adotado para a produção da matriz cimentícia, com a porcentagem em massa dos componentes determinada por espectrometria de fluorescência de raios-X, de acordo com a NBR 14656 [10]. Os ensaios foram realizados nos laboratórios da Universidade de Brasília.

A partir dos resultados do ensaio de fluorescência de raios X, foram verificados o atendimento aos requisitos normativos, onde verificou-se que o cimento Portland utilizado atende aos limites estabelecidos pela NBR 16697 [9] para o óxido de magnésio ( $\leq 6,5$ ) e trióxido de enxofre ( $\leq 4,5$ ). A superfície específica BET é de  $2,86 \text{ m}^2/\text{g}$  e a massa específica de  $3,32 \text{ g/cm}^3$ .

**2.2. Fibra kraft**

As fibras kraft utilizadas nesse trabalho para a produção dos compósitos são oriundas do processo de reciclagem em laboratório das embalagens de cimento Portland pós consumo ALVES [11] e BUSON *et al.* [12] coletadas em canteiro de obras.

Na Figura 1, é apresentado o fluxo das principais etapas do processo de reciclagem das embalagens de cimento Portland para obtenção das fibras kraft dispersas para utilização na matriz cimentícia.

Conforme apresentado na Figura 1 o processo de reciclagem ocorre a partir de uma limpeza prévia das embalagens para remover restos de materiais que podem vir junto com os sacos, tem início com fragmentação manual do papel em pedaços menores para facilitar o processo de dispersão aquosa com agitação mecânica. Após a retirada do excesso de água da polpa utiliza-se para a dispersão das fibras um triturador de folhas e galhos de pequeno porte, mesmo modelo utilizado em serviços de jardinagem, pois estas saem bastante aglomeradas da pré-secagem. Por fim, as fibras seguem para secagem ao ar, em ambiente protegido das intempéries, para que possam ser armazenadas até o momento de sua utilização.

O aspecto visual das fibras kraft dispersas após o processo de reciclagem das embalagens de cimento coletadas em canteiros de obras para uso nos compósitos de matriz cimentícia pode ser observado na Figura 2.

Na Tabela 2 são apresentados os percentuais, em massa, dos principais elementos químicos presentes nas fibras kraft determinados pelo ensaio de fluorescência de raios-X.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 2, o elemento presente nas fibras kraft com maior concentração é o cálcio, que representa 60,82% em massa e posteriormente encontra-se o ferro com 15,60% em massa. Outros elementos químicos também foram detectados na amostra com menores concentrações mássicas, entre eles apresenta-se o potássio, o qual desempenha influência no desenvolvimento da planta.

**Tabela 1:** Composição química do cimento Portland CP I, em percentual da massa da amostra, obtida pelo ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	SrO	Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	ZrO <sub>2</sub>
RESULTADOS (%)	16,25	6,23	3,71	4,05	4,03	0,64	3,52	0,24	0,19	0,07	0,06	0,02



**Figura 1:** Fluxo com as principais etapas do processo de reciclagem das embalagens de cimento Portland, coletadas em canteiros de obras, para obtenção das fibras kraft dispersas para utilização na matriz cimentícia ALVES [11].



**Figura 2:** Aspecto visual das fibras kraft obtidas pelo processo de reciclagem das embalagens de cimento Portland pós consumo.

**Tabela 2:** Composição das fibras kraft obtidas pela análise química quantitativa por espectroscopia de fluorescência de raios-X (EDX), percentual do teor em massa.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	Ca	Fe	Si	Al	S	Ti	K	Mn	Sr	Br	Cu
RESULTADOS (%)	60,82	15,60	8,73	5,73	2,75	2,38	1,48	0,83	0,77	0,46	0,42

De acordo com os autores KARADE *et al.* [13], o cálcio, assim como o potássio podem afetar a hidratação inicial do cimento Portland, ocasionando retardo na hidratação. IWAKARI *et al.* [14] ressaltam que a presença elevada de extrativos acarreta a diminuição da temperatura de hidratação do cimento, podendo ocasionar também uma inibição da pega do cimento Portland. Alguns elementos como alumínio e demais metais podem ser advindos do cimento por se tratar de fibras da embalagem kraft reciclada.

### 2.3. Produção das pastas cimentícias com adição de fibras kraft

As quantidades de materiais, em massa, utilizadas para a produção das misturas são apresentadas na Tabela 3, tendo como variáveis para esses traços diferentes teores de adição de fibras kraft, as quais foram determinadas em relação a massa de cimento, com três diferentes relações de água e cimento (a/c).

A proporção e a quantidade dos materiais para produção das pastas cimentícias utilizadas na pesquisa foram determinadas com base de estudos anteriores realizados para a avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido de compósitos com adição de fibras kraft ALVES [11], DIAS [15] e PEREIRA [16].

Os diferentes teores de adição de fibras kraft foram em pregados para verificar possíveis mudanças de comportamento dos compósitos em relação a mistura de referência sem fibras, assim como a variação na relação a/c, pois de acordo com STANCATO [17], estima-se que os polissacarídeos presentes nas fibras podem ser dissolvidos pela água de amassamento e interferir no tempo de pega do cimento.

As pastas foram produzidas em laboratório, seguindo os mesmos requisitos normativos descritos para a produção de pastas de consistência normal ABNT NBR 16606 [18], ressaltando que as fibras foram adicionadas nos 30 s iniciais, com a mistura realizada em velocidade lenta. A água de amassamento utilizada nas misturas foi proveniente da rede pública de abastecimento.

Após o procedimento de mistura, as pastas frescas foram acondicionadas em moldes plásticos cilíndricos descartáveis, para evitar a utilização de produtos desmoldante e contaminação das amostras, de dimensão 4 cm × 5 cm (altura/diâmetro) e adensados manualmente com auxílio de um soquete metálico.

Os corpos de prova foram mantidos em ambiente de laboratório, em cura ao ar, em temperatura ambiente durante as primeiras 24 horas pós-moldagem, antes de serem desmoldados, identificados e imersos em água para o processo de cura até a data do ensaio.

**Tabela 3:** Identificação dos traços, com as quantidades de materiais, em massa, utilizados na produção das pastas cimentícias para os ensaios da pesquisa.

AMOSTRAS	RELAÇÃO A/C	ÁGUA (g)	CIMENTO (g)	FIBRA (g)			
Referência	0,40	400	1000	-			
	0,45	450					
	0,50	500					
0,5% fibra kraft	0,40	400		1000	05		
	0,45	450					
	0,50	500					
1,0% fibra kraft	0,40	400			1000	10	
	0,45	450					
	0,50	500					
3,0% fibra kraft	0,40	400				1000	30
	0,45	450					
	0,50	500					

### 3. MÉTODOS DE ENSAIO

#### 3.1. Avaliação da interferência das fibras kraft no processo inicial de hidratação do cimento Portland

A avaliação do efeito da adição e da interferência do teor das fibras kraft na hidratação inicial do cimento Portland dos compósitos foi realizada de forma experimental com a finalidade de realizar comparativos entre os resultados obtidos como acompanhamento da evolução da temperatura das amostras de referência com os compósitos com adição de três teores de fibras kraft.

O objetivo do ensaio é verificar se a diluição de componentes presentes nas fibras kraft pode interferir no tempo de pega do cimento Portland. Desta forma, o princípio do ensaio está relacionado a cinética de hidratação do cimento Portland que consiste em uma reação exotérmica, logo, ao medir o calor gerado e posteriormente liberado ao longo do tempo, pode-se obter uma curva que representará o comportamento de hidratação do cimento das misturas, ou seja, esse experimento consiste em uma forma de avaliação da compatibilidade entre a matriz cimentícia e a fibra kraft.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília (LEM/UnB). Para a realização do ensaio, foram acondicionadas em recipientes metálicos (latas) envolvidos em isolantes térmicos individuais de EPS, com os termopares já fixados e posicionados de forma centralizada no interior da pasta, com o auxílio de um suporte de madeira na parte superior do recipiente, utilizado para guiar a saída da fiação de ligação dos sensores ao equipamento. Esse aparato foi posicionado no interior de uma caixa térmica de EPS, que permaneceu fechada até o término do ensaio para evitar interferências do ambiente externo (Figura 3).

O monitoramento experimental da temperatura das amostras foi realizado ao longo do período de hidratação da pasta de cimento Portland de cada uma das 12 amostras do estudo, em um sistema semi-adiabático. O monitoramento foi realizado com a utilização de termopares tipo K conectados ao receptor de sinais, *datalog* da marca PICO modelo TC-08, no qual os dados de temperatura das amostras coletados em intervalos de 1 minuto são convertidos em valores de temperatura e salvos no computador, no software PicoLog Recorder.

O ensaio foi iniciado logo após o processo de mistura, com as pastas no estado fresco, com dois corpos de prova para cada variável, sendo estas o teor de adição de fibras kraft (0%; 0,5%; 1,0%; e 3,0%), com o intuito de verificar os efeitos de uma possível diluição dos polissacarídeos presentes nas fibras na temperatura, durante todo o período de pega, finalizado com a estabilização da temperatura dos compósitos avaliados. Ao analisar a evolução da temperatura das amostras com diferentes relações água/cimento (0,40; 0,45 e 0,50) espera-se conseguir detectar alterações ocasionadas a partir do incremento de água de amassamento das misturas avaliadas, que poderá solubilizar em diferentes concentrações os açúcares presente nas fibras, entre outros inibidores e interferir no tempo e na intensidade do calor gerado durante a hidratação do cimento, conforme relatado por ZUCCO [19] e STANCATO [17]. Desta forma, ao aumentar o teor de fibras nos compósitos e alterar a relação a/c das pastas tem-se o objetivo de verificar se ocorrem mudanças no comportamento térmico das amostras avaliadas.



**Figura 3:** Aspecto do ensaio montado para avaliar a interferência das fibras kraft no processo inicial de hidratação do cimento Portland, com o sistema coletor de dados ligado a um computador e a caixa térmica com as amostras conectadas para acompanhamento da evolução da temperatura das pastas (a). Vista da caixa térmica de isopor, com os seis corpos de prova armazenados em seu interior, prontos para o início do acompanhamento da evolução da temperatura (b).

O método de WEATHERWAX e TARKOW [20] e MOLESMI *et al.* [21], utilizado para avaliar a compatibilidade química da fibra kraft com o cimento, através da Equação 1 que mensura a evolução da temperatura da mistura cimento/fibra kraft durante as primeiras 24 horas. O resultado do monitoramento da temperatura é utilizado como parâmetro para determinar índices de inibição de pega e endurecimento do cimento com a fibra kraft.

$$\left[ \frac{(T_{cim} - T_m)}{T_{cim}} \cdot \frac{H_m - H_{cim}}{H_{cim}} \cdot \frac{(S_{cim} - S_m)}{S_{cim}} \right] \quad (1)$$

Onde  $T_{cim}$  é a temperatura máxima da mistura de cimento/água (°C),  $T_m$  é a temperatura máxima da mistura fibra/cimento/água (°C),  $H_m$  é o tempo para atingir a temperatura máxima na mistura de fibra/cimento/água (h),  $H_{cim}$  é o tempo para atingir a temperatura máxima no cimento/água (h),  $S_{cim}$  é o aumento máximo de temperatura da curva na mistura cimento/água (°C.h-1), e  $S_m$  é o incremento máximo de temperatura da curva na mistura de fibra/cimento/água (°C.h-1).

Os critérios que serão utilizados para classificar as possíveis interferência das fibras kraft no processo inicial de hidratação do cimento Portland, serão os mesmos utilizados para classificar o material lignocelulósico de acordo com índice de inibição calculado e conforme descritopor OKINO *et al.* [22].

### 3.2. Análise termogravimétrica (TGA)

O ensaio para avaliação termogravimétrica das amostras de referência e dos compósitos foi realizado na Central Analítica do Instituto de Química da Universidade de Brasília (CAIQ/UnB), no analisador termogravimétrico de marca Shimadzu, modelo DTG-60H. Os parâmetros de ensaio foram: tipo de amostra em pó, taxa de aquecimento de 10 °C/min, temperatura inicial de 35 °C, temperatura máxima de 1000 °C, em cadinho de platina. O aquecimento foi realizado sob atmosfera de nitrogênio (N<sub>2</sub>) com fluxo de 30 ml/min e massa da amostra analisada de aproximadamente 10 mg. O ensaio foi realizado para as pastas de referência e com adição de fibras kraft nos teores de 0,5% e 1,0%, com relação a/c de 0,50, para as idades de: 01 e 90 dias.

Para que o ensaio fosse realizado na idade desejada, a hidratação do cimento Portland foi paralisada com a imersão da amostra em álcool isopropílico durante 24 horas, com posterior secagem em estufa a 60 °C durante 24 horas, conforme descrito por QUARCIONI [23], KIRCHHEIM *et al.* [24], Galvão [25]. Após a paralisação da hidratação as amostras são mantidas em embalagens hermeticamente fechadas em temperatura ambiente com sílica gel e cal sodada para evitar o ingresso de umidade até a realização do ensaio. A análise termogravimétrica (TGA) e sua derivada (DTG) foram utilizadas para avaliar a perda de massa e a natureza dos produtos de hidratação das pastas com fibras kraft.

### 3.3. Difração de raios-X

Para a realização da difração de raios-X foi necessário preparar as amostras, o qual consiste em seccionar os corpos de prova, de forma que apenas a parte interna deste faça parte da amostra, evitando pegar um material

contaminado. Após essa etapa, com o auxílio de um almofa riza amostra foi transformada em um pó bem fino, de granulometria passante na peneira de número 200 de 0,075 mm, conforme ASTM C117 [26].

A análise qualitativa de difração de raios-x (DRX) foi realizada no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, para identificar as fases cristalinas das pastas cimentícias com adição de fibras kraft, com o intuito de verificar uma possível interferência da fibra kraft nos produtos de hidratação do cimento Portland.

O equipamento utilizado foi o difratômetro Goniometer Ultima IV, da marca Rigaku com tubo de cobre e filtro de níquel, com tensão de 30 kV e amperagem de 15 mA, sua varredura foi de 2° a 70° com 2° por minuto. Nesta análise foram utilizadas amostras de referência e amostras com adição de fibras kraft nos teores de 0,5% e 1,0% com relação a/c de 0,5 na idade de 91 dias, onde foram utilizados aproximadamente 4 gramas de amostra para cada amostra deste ensaio.

### 3.4. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O ensaio foi realizado no Laboratório de Microscopia e Microanálise LMM/UnB do Instituto de Ciências Biológicas no equipamento JEOL JSM 7001F. O MEV foi realizado nas idades de 01, 28 e 90 dias para as pastas de referência e com adição de fibras kraft nos teores de 0,5% e 1,0%, com relação a/c 0,55. As observações foram realizadas sob tensão de aceleração de 15 kV. A paralisação da hidratação do cimento foi realizada conforme descrito no ensaio de termo gravimetria. Após esse preparo os corpos de prova foram fraturados com tamanho compatível com o porta amostras do equipamento e receberam uma metalização com ouro para tornar o material condutor e permitir a obtenção das imagens.

A técnica de microscopia eletrônica de varredura foi utilizada aliada com a espectrometria de energia dispersiva (EDS), com o intuito de verificar a distribuição e dispersão das fibras, assim como o de visualizar a zona de transição entre a fibra kraft e a matriz cimentícia, uma vez que essa região pode apresentar uma porosidade elevada, pois esta permite o acúmulo de água e uma maior concentração de hidróxido de cálcio na cavidade central, paredes e vazios da fibra, caracterizando o fenômeno de mineralização das fibras, o qual influencia nas propriedades do compósito, e verificar a natureza química dos elementos presentes na amostra, bem como realizar medidas dimensionais das fibras.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Resultados da avaliação da interferência das fibras kraft no processo inicial de hidratação do cimento Portland

Os resultados apresentados na Tabela 4 são os valores médios da temperatura máxima obtida durante avaliação da interferência das fibras kraft no processo inicial de hidratação do cimento Portland de dois corpos de prova de cada um das amostras, o tempo médio em que ocorreu o pico de temperatura, em horas, e a classificação da inibição obtido a partir do índice de inibição de cada um dos compósitos da pesquisa.

**Tabela 4:** Resultados da avaliação da interferência das fibras kraft no processo inicial de hidratação do cimento Portland com os valores médios da temperatura máxima obtida durante o ensaio, com o tempo médio em que ocorreu o pico de temperatura, e a classificação do índice de inibição da fibra kraft após o teste de aptidão com o cimento Portland.

AMOSTRAS	RELAÇÃO a/c	T. MÁX. (°C)	TEMPO (h)	S MÁX. (°C/h)	I (%)	CLASSIFICAÇÃO DA INIBIÇÃO
Referência	0,40	71,29	7,28	17,10	–	–
	0,45	68,51	7,87	14,11	–	–
	0,50	66,85	8,30	13,94	–	–
0,5% fibra kraft	0,40	69,04	7,95	14,66	0,04	Baixa
	0,45	67,06	8,38	12,65	0,01	Baixa
	0,50	66,65	8,60	13,82	0,00	Baixa
1,0% fibra kraft	0,40	71,27	7,57	13,15	0,00	Baixa
	0,45	68,57	7,82	14,90	0,00	Baixa
	0,50	66,72	8,08	16,63	0,00	Baixa
3,0% fibra kraft	0,40	67,97	7,18	14,40	0,01	Baixa
	0,45	67,08	7,60	14,42	0,00	Baixa
	0,50	66,63	7,88	11,61	0,00	Baixa

De acordo com os critérios adotados para classificação da inibição de OKINO *et al.* [22], todas as pastas foram qualificadas como de baixa inibição, não apresentando interferência no processo de hidratação do cimento de forma detectável no acompanhamento da temperatura máxima. Mesmo assim, o maior índice de inibição foi obtido pela pasta com 0,5% de adição de fibra kraft e relação a/c de 0,40. De modo geral, coloca-se que todos os compósitos apresentam uma boa compatibilidade química entre fibra e matriz cimentícia, durante a variação da temperatura máxima obtida no processo inicial de hidratação do cimento Portland das amostras avaliadas.

As maiores temperaturas máximas foram alcançada pelas amostras com a menor relação a/c do estudo, sendo esta de 0,40; e os menores valores de temperatura máxima para as amostras com relação a/c de 0,50. Com base nos valores obtidos neste ensaio afirma-se que o aumento da relação a/c reduz a temperatura máxima das amostras no processo inicial de hidratação do cimento Portland CPI.

Com relação ao tempo de ocorrência do pico de temperatura das amostras foram registradas no intervalo de tempo entre 7,18 horas e de 8,6 horas. Para a obtenção da temperatura máxima o maior tempo foi registrado para as pastas com relação a/c de 0,50, seguido pelas relações de 0,45 e 0,40, ou seja, quanto maior a relação a/c, mais tempo será necessário para atingir a temperatura máxima.

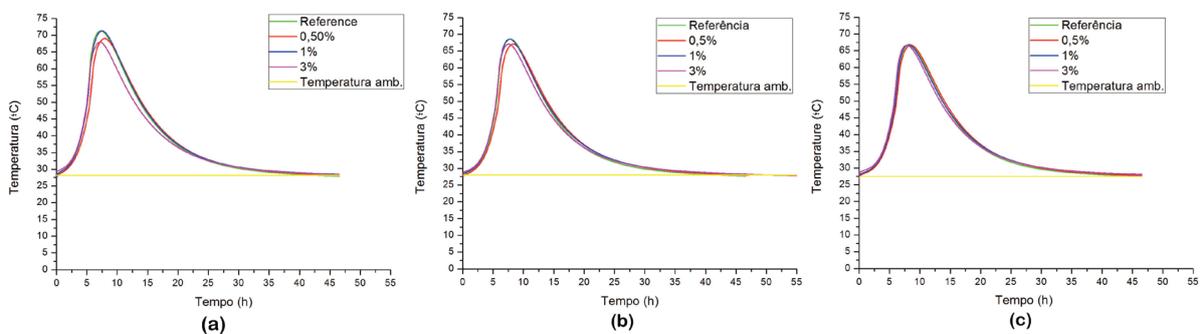
Nos gráficos da Figuras 4 são apresentadas as curvas de temperatura durante a fase de hidratação das pastas cimentícias de referência e com adição de fibras kraft (0,5%; 1,0% e 3,0%), obtidas para cada uma das diferentes relações a/c (0,40; 0,45 e 0,50) do estudo.

Os gráficos da Figura 4 apresentam o tempo que cada pasta levou para atingir a temperatura máxima de hidratação inicial do cimento Portland de cada uma das amostras. As curvas apresentam um comportamento padrão para as diferentes pastas avaliadas. Essa tendência das curvas indica que as variáveis analisadas, relação a/c e teor de fibras, não interferiram de forma expressiva na hidratação inicial do aglomerante utilizado na matriz dos compósitos, embora as temperaturas máximas e os tempos para atingir essa temperatura apresentem pequenas diferenças.

Analisando as curvas para os diferentes teores de adição de fibra kraft apresentadas na Figura 4, coloca-se que no gráfico (a) com a relação a/c de 0,40 as curvas de referência e da amostra com adição de 1,0% de fibra kraft ficaram bem próximas uma da outra, e as dos demais teores apresentaram uma discreta diferença entre elas, sendo essa relação a que visualmente apresentou maior discrepância entre as curvas obtidas neste ensaio. Para a relação de a/c igual a 0,50 praticamente não se nota a diferenciação entre as curvas das amostras de referência com as dos demais compósitos independente do teor de adição de fibras kraft.

Os materiais ligno celulósicos possuem componentes inibitórios para a hidratação do cimento Portland, porém no estudo realizado, nota-se que a fibra kraft utilizada não interferiu de forma considerável no processo de hidratação do cimento Portland como esperado, onde a inibição da fibra kraft com a matriz cimentícia foi classificada como baixa e não houve um retardo na hidratação. Com esses resultados, três hipóteses são levantadas para o comportamento dos compósitos avaliados.

A primeira é referente ao processo industrial de fabricação das embalagens de papel kraft, que ocorre pelo processo kraft ou sulfato, que consiste no cozimento dos cavacos de madeira no licor branco (solução de hidróxido de sódio e sulfeto de sódio), promovendo a individualização das fibras pela dissolução da lignina, remoção de hemicelulose (possui várias unidades de açúcares) BASSA [27] e decomposição de componentes não celulósicos. Desta forma, esse processo de produção das embalagens remove substâncias da madeira, que poderiam influenciar a cinética de hidratação e gerar uma conseqüente inibição da pega do cimento.



**Figura 4:** Gráficos com as curvas obtidas como variação da temperatura no processo de hidratação do cimento Portland, para as pastas cimentícias de referência e com adição de fibras kraft nos teores de 0,5%; 1,0%; 3,0%, para as relações a/c de 0,40 (a); de 0,45 (b) e de 0,50 (c).

Outro ponto consiste no processo de reciclagem realizado em laboratório com as embalagens, após a utilização de seu conteúdo, para obtenção das fibras dispersas para utilização nas matrizes cimentícias. Uma das etapas utilizadas na metodologia para obtenção das fibras kraft, consiste em uma lavagem das embalagens de cimento com água, para remoção de partículas de cimento que ainda podem estar presentes. Além desta etapa, as embalagens são inseridas em um tambor com água, por onde passam por um processo mecânico de agitação para dispersão das fibras. Este pode ser outro fator para a baixa inibição das fibras kraft com a matriz cimentícia, uma vez que estudos KARADE [28] e CASTRO [29] sugerem a lavagem das fibras em água fria ou quente ou ainda em uma solução alcalina para remoção dos componentes retardadores.

Por último, ressalta-se a relação a/c, pois pode ocorrer uma incompatibilidade química entre o cimento e a fibra, relacionada a solubilização de açúcares e outros inibidores pela água de amassamento, que em contato com o cimento, inibem sua pega ZUCCO [19] e STANCATO [17]. No estudo foram utilizadas três relações a/c (0,40; 0,45 e 0,50), onde as menores temperaturas máximas foram notadas para a maior relação a/c de 0,50, e o tempo foi maior para atingir a temperatura máxima. Os efeitos não foram acentuados para as diferentes relações a/c, tiveram discretas mudanças de valores, mas o material obteve uma tendência no comportamento, o qual consiste em uma menor temperatura máxima para maiores relações a/c e um maior tempo para atingir essa temperatura, onde o efeito poderia ser acentuado ao elevar o teor de adição de fibras.

#### 4.2. Análise termogravimétrica (TGA)

Para as análises termogravimétricas os resultados dos ensaios são apresentados em forma de gráficos com as curvas de TG e DTG para a matriz cimentícia de referência (sem fibras kraft) nas idades de 01 dia (Figura 5-a) e de 90 dias (Figura 5-b); para o compósito com adição de 0,5% de fibra kraft, nas idades de 01 dia (Figura 5-c) e de 90 dias (Figura 5-d); e para o compósito com adição de 1,0% de fibra kraft, nas idades de 01 dia (Figura 5-e) e de 90 dias (Figura 5-f).

A partir dos gráficos de TG/DTG, nota-se que as curvas foram similares para as pastas de referência e com adição de fibras kraft, onde são observados três eventos de perda de massa, que de acordo com a literatura, são referentes à decomposição da etringita e silicato de cálcio hidratado (C-S-H) na faixa de temperatura de 50 °C a 200 °C; entre 380 °C e 450 °C ocorre a decomposição do hidróxido de cálcio e entre 600 °C e 700 °C a decomposição do carbonato de cálcio, conforme FIDELIS [30].

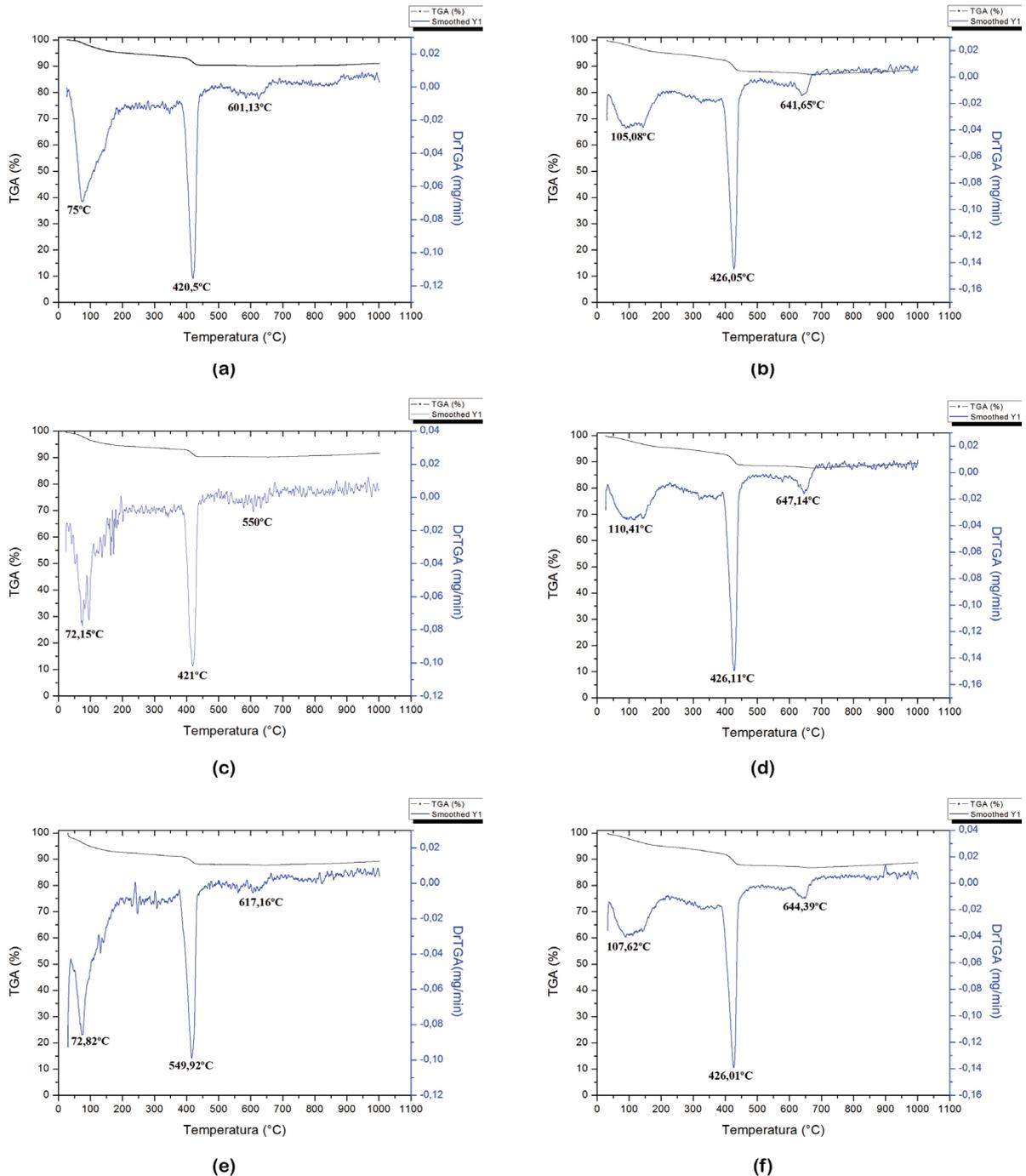
As perdas de massa das pastas de referência e com adição de fibras kraft ocorrem em faixas de temperatura similares. Na curva de DTG da decomposição da etringita e C-S-H, foi observado um aumento da temperatura e diminuição do pico para os termogramas de 90 dias. Para as curvas no intervalo de temperatura de 600 °C e 700 °C ressalta-se que a perda de massa foi inferior a 5%, não havendo assim, a carbonatação do carbonato de cálcio significativa nas amostras SOARES [31].

Os valores referentes à perda de massa e teor de hidróxido de cálcio são crescentes, ou seja, ao avançar a idade de hidratação da amostra ocorre uma maior perda de massa (Tabela 5). Ressalta-se que os maiores valores obtidos de perda de massa e teor de CH foram para a idade de 60 dias, pois aos 90 dias houve uma pequena redução. Os maiores valores obtidos foram para as amostras de referência.

No geral, nota-se que houve uma pequena redução nos teores de CH (inferior a 1%) para as pastas com adição de 1,0% de fibra kraft, podendo ter ocorrido pelo aumento da zona de transição entre a fibra e matriz, acarretando em acúmulo de CH, o qual pode gerar carbonatação dos produtos hidratados e a mineralização das fibras RAABE [32]. O teor de CH das amostras foi maior para as pastas de referência em todas as idades analisadas. De modo geral o teor de CH foi aumentando conforme aumentava a idade de hidratação do compósito, exceto para a idade de 90 dias que comparada com o teor obtido para a idade de 60 dias, apresentou uma redução no teor de CH de 0,11% (referência), 1,69% (adição de 0,5%) e 0,14 (1,0% de adição).

A celulose e a hemicelulose sofrem um processo de degradação na faixa de temperatura de 250 °C a 400 °C, com perda de massa superior a 75% e a lignina se decompõe em torno de 200 °C a 500 °C [33] (GONZALEZ-LOPEZ *et al.*, 2021). De acordo com SCRIVENER *et al.* [34], ao estudar matrizes cimentícias com adição de fibras vegetais é difícil obter uma análise precisa, pois podem ocorrer sobreposições de efeitos nos gráficos devido à grande quantidade de minerais e hidratos presentes. Na faixa de temperatura de 380 °C a 450 °C, em que ocorre o processo de decomposição da celulose, hemicelulose e lignina presente na fibra kraft, pode ter se sobreposto aos sinais de decomposição do hidróxido de cálcio, representado no termograma pelo pico mais acentuado, e dificultando a identificação dos eventos, assim como a quantificação do hidróxido de cálcio ÇAVDAR *et al.* [35].

Desta forma, neste estudo não é possível afirmar que ocorre uma interferência da fibra kraft na matriz cimentícia, devido a sobreposição dos eventos de decomposição da fibra e do hidróxido de cálcio. Porém, a redução do teor de CH das pastas com adição de fibras kraft em relação a pasta de referência é favorável, pois



**Figura 5:** Curvas de TG e DTG para a matriz cimentícia de referência (sem fibras kraft) nas idades de 01 dia (a) e de 90 dias (b); para o compósito com adição de 0,5% de fibra kraft, nas idades de 01 dia (c) e de 90 dias (d); e para o compósito com adição de 1,0% de fibra kraft, nas idades de 01 dia (e) e de 90 dias (f).

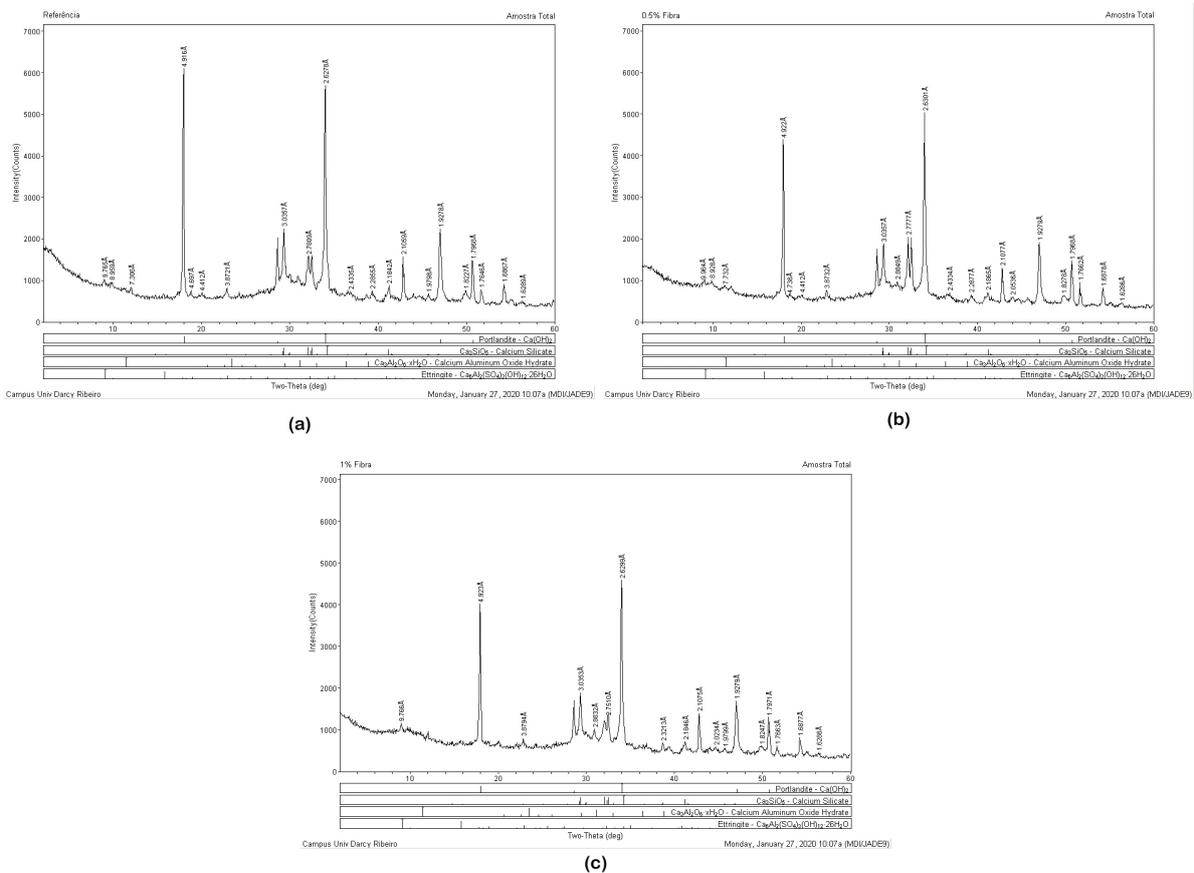
esse composto eleva o pH da matriz cimentícia e pode migrar para as estruturas da fibra acarretando em um processo de degradação da fibra pela mineralização.

### 4.3. Difração de raios-X

De acordo com os difratogramas foi possível identificar as fases cristalinas a partir da hidratação da amostra de referência (sem fibras) e das amostras com adição de fibras kraft nos teores de 0,5% e 1,0%. Os resultados mostram que a amostra de referência apresenta fases cristalinas semelhantes às amostras com adição de fibras kraft, pois observam-se os dois principais picos mais acentuados e característicos de portlandita (hidróxido de cálcio) e silicato de cálcio.

**Tabela 5:** Teor de hidróxido de cálcio (CH) e perda de massa para as pastas de referência e com adição de fibras kraft nos teores de 0,5% e 1,0%, nas idades de 01, 03, 07, 28, 60 e 90 dias.

IDADE DO ENSAIO (DIAS)	REFERÊNCIA		0,5% DE FIBRA KRAFT		1,0% DE FIBRA KRAFT	
	PERDA DE MASSA	CH (%)	PERDA DE MASSA	CH (%)	PERDA DE MASSA	CH (%)
01	2,88	11,83	2,64	10,85	2,85	11,71
03	2,83	11,64	2,84	11,66	2,76	11,35
07	3,38	13,87	3,30	13,58	3,19	13,12
28	3,80	15,63	3,50	14,40	3,67	15,09
60	4,32	17,76	4,42	18,17	4,21	17,29
90	4,21	17,32	4,01	16,48	4,17	17,15



**Figura 6:** Difratomogramas de raios X das amostra de referência (a); com adição de 0,5% de fibra kraft (b) e adição de 1,0% de fibra kraft (c).

Foi possível perceber uma interferência das fibras kraft nos produtos de hidratação do cimento, pois ao adicionar as fibras os picos de portlandita e silicato de cálcio são reduzidos, logo para a adição de fibras no teor de 1,0% (Figura 6 c) esse pico foi menor se comparado com a amostra de referência (Figura 6 a) e para a adição de fibras kraft no teor de 0,5% (Figura 6 b).

Em trabalho realizado por RAABE [32] com fibras de *Eucalyptus* sp. modificada com nano-sílica e adição de fibras nos teores de (1%, 3%, 5%, 7% e 9%) em matriz cimentícia, para o ensaio de DRX, este relata que a interferência do tipo de fibra e seus conteúdos nos padrões dos difratogramas são nulos, podendo utilizar as fibras sem alterar a conformação cristalina das fases mineralógicas da matriz cimentícia.

Assim como apresentado na Figura 5, RAABE [32] notou que houveram alterações nos picos de portlandita e calcita devido a adição de fibras, sendo a intensidade dos picos menores para os difratogramas contendo fibras. Tem-se como hipótese que a utilização de tratamento com nano-sílica pode haver potencializado

a interação das fibras com a matriz cimentícia, reduzindo a quantidade de espaços vazios na região de interface e gerado interferência na diminuição do percentual de hidróxido de cálcio, com conseqüente redução dos picos de portlandita.

De acordo com os resultados obtidos, conclui-se que a adição de fibras karft na matriz cimentícia é positiva, pois reduz os teores de hidróxido de cálcio do compósito, o qual pode prejudicar as propriedades mecânicas do cimento, pois a portlandita não contribui de forma efetiva para a resistência do material e sendo o produto de hidratação mais suscetível a deterioração RAABE [32], como por exemplo, gerando a mineralização das fibras, que ocorre quando os produtos de hidratação, principalmente o hidróxido de cálcio migram para as estruturas das fibras e provocam perda das propriedades dos compósitos MELO FILHO *et al.* [36] e SILVA *et al.* [37]. Além disso, a portlandita contribui para a redução de pH da matriz, sendo este benéfico, pois as fibras vegetais apresentam baixa durabilidade em meios alcalinos RAABE [32].

#### 4.4. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Na Figura 7, observa-se a microestrutura da pasta de referência com 90 dias de hidratação, onde nota-se um aspecto microestrutural mais denso da pasta, não apresentando assim uma superfície com elevada porosidade. Na análise de EDS foram identificados os seguintes produtos químicos: oxigênio, magnésio, alumínio, silício, cálcio e ouro, resultante do processo de metalização da amostra para torná-la condutora.

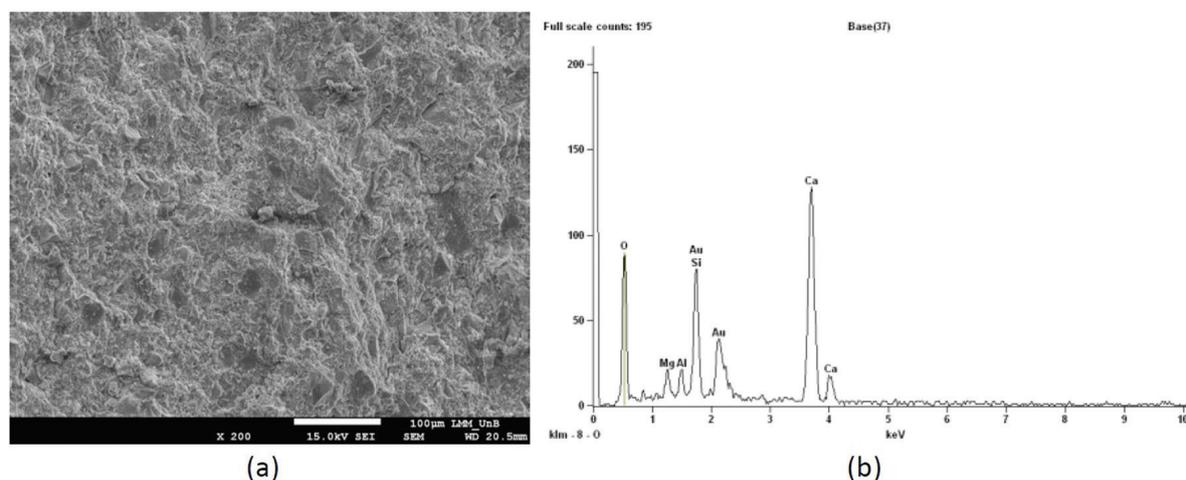
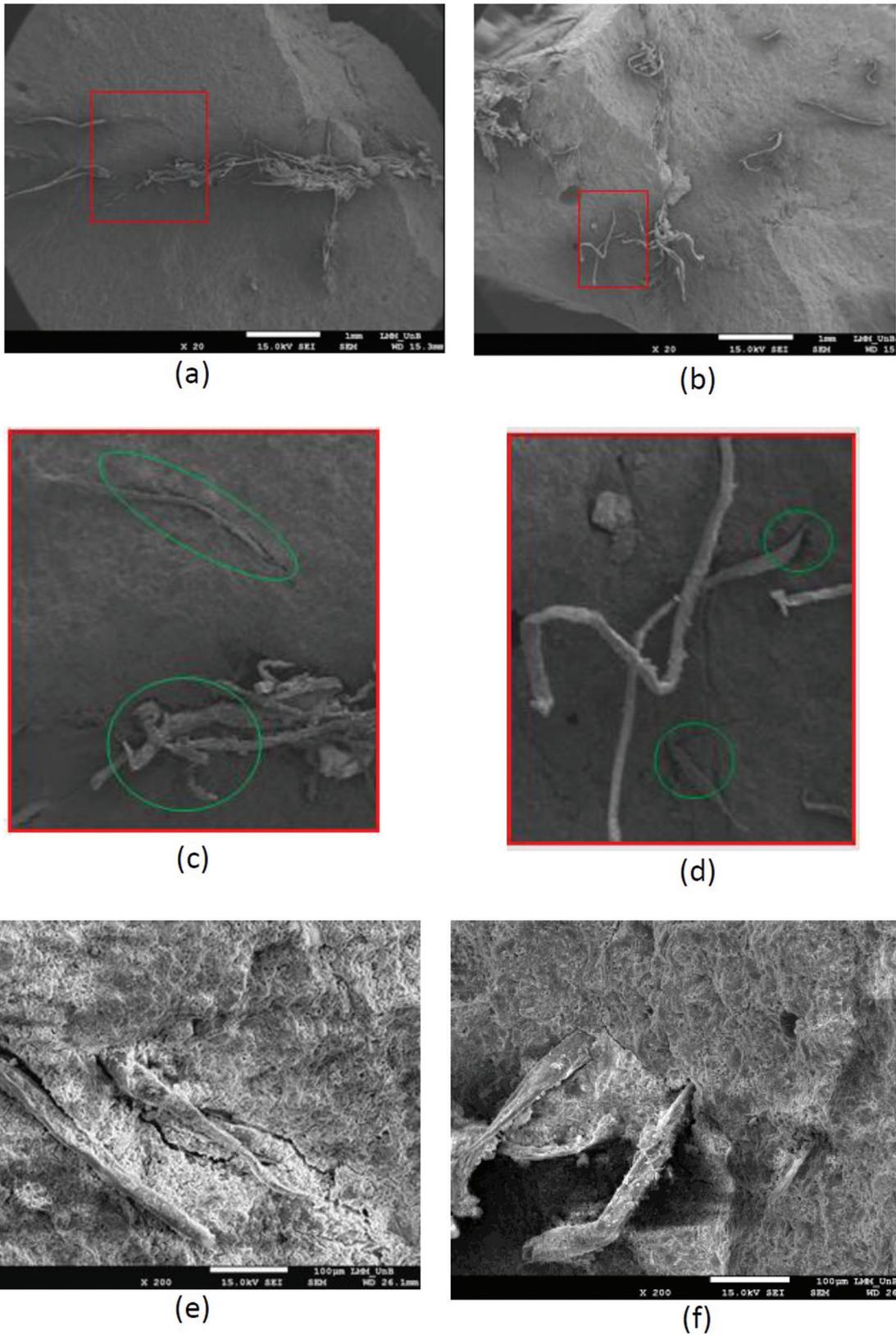


Figura 7: Micrografia da pasta de referência (sem adição de fibras kraft) com idade de 90 dias (a) e EDS da matriz cimentícia para identificação dos compostos químicos (b).

Tabela 6: Composição em porcentagem dos elementos presentes nos compósitos de referência e com adição de fibras kraft nosteriores de 0,5% e 1,0% para as idades de 03, 07, 60 e 90 dias, obtidos na análise de energia dispersiva – EDS.

AMOSTRA	IDADE ENSAIO (DIAS)	MASSA ATÔMICA (%)							
		O	Mg	Al	Si	Ca	Au	K	C
Referência	03	53,60	1,87	1,56	7,91	29,81	5,24		
	07	60,99	1,76	1,41	7,43	23,54	4,01	0,85	
	60	55,52	1,3	1,62	8,3	30,12	2,27		
	90	58,01	1,91	1,57	8,84	27,76	1,92		
0,5% fibra kraft	03	85,05				12,41		2,54	
	07	89,73				4,88	3,13	2,27	
	60	66,76		2,07	4,97	22,55	3,66		
	90	72,69	1,56	5,04		19,13			1,58
1,0% fibra kraft	03	74,64		1,31	4,67	13,21	4,15	2,01	
	07	78,64			3,37	16,39		1,60	
	60	83,48			2,34	12,93			1,26
	90	70,41	1,29	0,96	4,20	16,50	3,84		2,82



**Figura 8:** Pasta com adição de fibra kraft no teor de 0,5% com 28 dias (a). Pasta com adição de fibra kraft no teor de 1,0% aos 28 dias (b). Ampliação das imagens (a/b) para os compostos com adição de 0,5% e 1,0% de fibra kraft aos 28 dias de hidratação. Composto com 0,5% (e) e 1,0% (f) de adição de fibra kraft com 1 dia de hidratação.

A partir da análise, ressalta-se que o oxigênio faz parte da composição das fibras vegetais, assim como o cálcio é comum nas fibras vegetais e na matriz cimentícia, já o magnésio, alumínio, silício são advindos do cimento Portland.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos na análise de energia dispersiva (EDS) para os compósitos estudados (referência e adição de fibras kraft 0,5% e 1,0%) nas idades de 03, 07, 60 e 90 dias.

Os elementos químicos encontrados na análise de EDS são: carbono, oxigênio, magnésio, alumínio, cálcio, potássio e silício. Tendo em vista que a fibra kraft é um material orgânico, o alto teor de oxigênio e carbono são comuns, assim como a presença de potássio. Já o silício é proveniente da matriz cimentícia, assim como o cálcio presente na matriz e nas fibras vegetais.

Na Figura 8 podem ser vistas as micrografias obtidas com ampliação de 20x da pasta cimentícia com adição de 0,5% e 1,0% de fibra kraft aos 28 dias de hidratação.

Na micrografia (Figura 8 (a e b)), nota-se que a fibra não está dispersa na matriz, ela se concentra em uma região, mostrando uma aglomeração, para os dois teores de adição estudados. A aglomeração das fibras interfere na transferência de tensões entre a fibra e a matriz durante a sollicitação de estresse, prejudicando as propriedades físicas e mecânicas do compósito. RAABE [32]; ZHOU *et al.* [38]. A partir das imagens também é possível observar, assim como na Figura 8 que a matriz cimentícia é densa, não apresentando poros (vazios).

A partir das micrografias apresentadas na Figura 9 (c, d, e, f) nota-se o processo de decomposição da fibra denominado peeling-off, o qual se refere ao descolamento da fibra na zona de transição entre a fibra kraft e a matriz cimentícia, onde podem ser notadas fissuras nessa região. O processo de descolamento da fibra pode ter ocorrido pela variação higroscópica da fibra e retração da matriz cimentícia BALLESTEROS *et al.* [39] e LAVERDE *et al.* [40].

Com o objetivo de observar a microestrutura das pastas e o processo de hidratação do cimento Portland, apresentam-se as micrografias da Figura 9 referentes à pasta de referência e com adição de 0,5% de fibra kraft para a idade de 01 de hidratação.

Na Figura 9, foi possível observar a presença de produtos de hidratação do cimento Portland, como a etringita (1), compostos de hidróxido de cálcio (2) e partículas de silicato de cálcio hidratado, C-S-H (3). Esses produtos também podem ser observados na superfície da fibra kraft (Figura 9 (b)) que tendem a enfraquecer o compósito, principalmente o hidróxido de cálcio, quando migra para a estrutura interna da fibra e gera o processo de mineralização, porém este também mostra que houve uma ligação entre a fibra e a matriz cimentícia

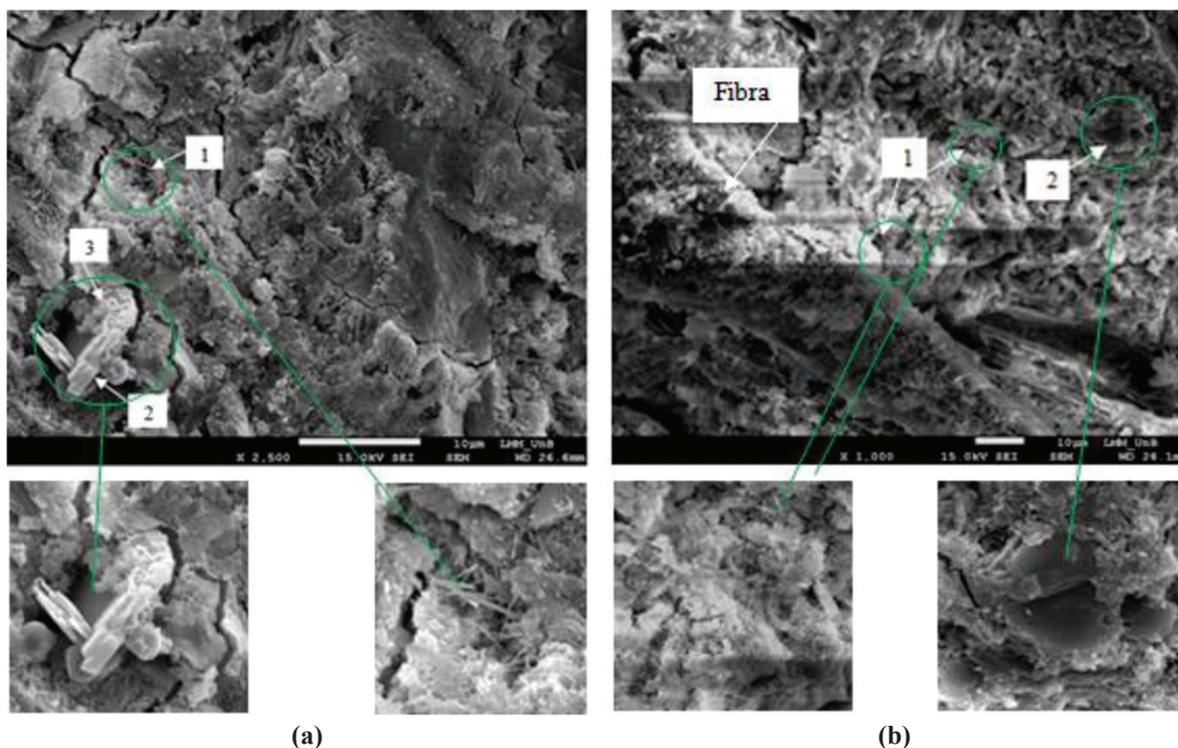
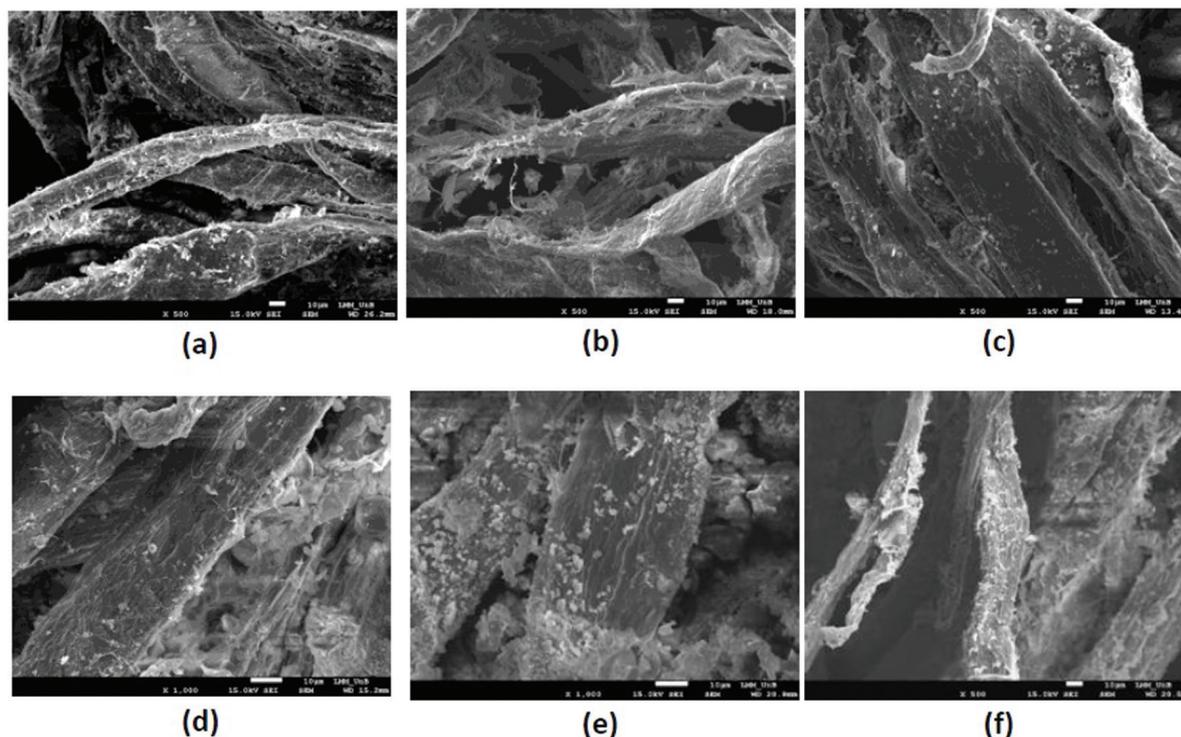


Figura 9: Micrografia da pasta de referência (sem adição de fibra kraft) com idade de 01 dia (a). Pasta com adição de fibra kraft no teor de 0,5% com 01 dia (b).



**Figura 10:** Micrografias do aspecto das fibras na matriz cimentícia com adição de 0,5% de fibras kraft para as idades de 01 (a), 03 (b), 07 (c), 28 (d), 60 (e) e 90 (f) dias.

FONSECA [41] e MACHADO [42]. Ressalta-se que as fissuras presentes na micrografia são resultantes do processo de preparo para o ensaio, onde foi necessário fraturar a amostra com auxílio de uma marreta para adequá-las ao porta amostra do MEV. Na Figura 10 são apresentadas micrografias para as idades de 01, 03, 07, 28, 60 e 90 dias de hidratação do cimento Portland.

A fibra kraft possui uma estrutura em formato de fita, com aspecto achatado. Foi possível observar que em idades iniciais a fibra kraft apresenta uma maior quantidade de produtos de hidratação na sua superfície (Figura 10 (a)) e para as demais idades a fibra apresenta um aspecto mais “limpo”, sem tantos produtos de hidratação do cimento Portland na superfície, porém a fibra com 90 dias (Figura 10 (f)) se assemelha mais a apresentada com 01 dia de hidratação, demonstrando assim uma re-precipitação dos produtos de hidratação do cimento Portland na sua estrutura.

Observa-se a presença de produtos de hidratação do cimento Portland na superfície das fibras em todas as idades estudadas, o que pode ser benéfico e demonstrar uma interação da fibra com a matriz cimentícia FONSECA [41]. Quando produtos de hidratação, principalmente hidróxido de cálcio, são identificados no interior das fibras indica o processo de mineralização, o qual compromete o desempenho mecânico do compósito, sendo assim responsável pela fragilização das fibras ARDANUY *et al.* [43].

Para as imagens de MEV obtidas neste estudo não foi possível observar com clareza a parte interna das fibras kraft para verificação de produtos de hidratação no seu interior e possível mineralização das fibras. De acordo com as micrografias analisadas a fibra kraft não apresenta processo de mineralização.

## 5. CONCLUSÃO

As fibras kraft provenientes do processo de reciclagem realizado nessa pesquisa podem ser utilizadas em matrizes cimentícias, uma vez que essas apresentaram: um baixo índice de inibição, não ocasionando alterações expressivas perceptíveis na hidratação do cimento Portland (CP I-40) utilizado na preparação da matriz cimentícia dos compósitos em comparação as amostras sem adição de fibras (referência); redução no teor de hidróxido de cálcio na matriz cimentícia, onde o CH pode gerar o processo de mineralização da fibra através da migração desse produto para as estruturas da fibra. Porém alguns aspectos microestruturais devem ser tratados/melhorados, para que haja uma melhor interação da fibra com a matriz e comportamento do compósito, sendo assim, recomenda-se aprimorar o processo de inserção das fibras para evitar sua aglomeração; redução da alcalinidade da matriz cimentícia com a utilização de materiais pozolânicos, metacaulim, cinzas volantes ou

escória, e também tratamentos das fibras kraft para melhorar o seu caráter hidrofílico. Desta forma, destacam-se os aspectos positivos que incidem na parcela da sustentabilidade socioambiental sob a responsabilidade da cadeia produtiva da construção civil, que podem ser gerados com a utilização de fibras kraft para confecção de compósitos cimentícios, uma vez que o seu uso pode contribuir para a redução do resíduo gerado no pós-uso das embalagens de cimento Portland descartado irregularmente no meio ambiente, propiciando uma destinação adequada para este resíduo e reduzindo o uso do solo destinado para aterros sanitários, pois consiste em um material com boas propriedades, ampla disponibilidade e baixo custo.

## 6. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro para desenvolvimento da pesquisa e aos laboratórios da Universidade de Brasília (UnB).

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] PASCHOALIN, J.A., *Setor da construção e a geração de resíduos: a necessidade de discussão de um novo paradigma*, <http://socioambientalonline.com.br/setor-da-construcao-e-a-geracao-de-residuos-a-necessidade-de-discussao-de-um-novo-paradigma/>, acessado em setembro de 2017.
- [2] SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS, *Resíduos sólidos da construção civil*, <https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-solidos-da-construcao-civil/>, acessado em maio de 2023.
- [3] SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, *Despacho total por forma de apresentação (t) – 2019 (Janeiro a Novembro)*, <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1595425086.pdf>, acessado em janeiro de 2020.
- [4] MINISTÉRIO PÚBLICO DO TRABALHO EM SÃO PAULO, *MPT assina acordo com empresas para reduzir pela metade o peso do saco de cimento no país*, <https://www.prt2.mpt.mp.br/572-mpt-assina-acordo-com-empresas-para-reduzir-pela-metade-o-peso-do-saco-de-cimento-no-pais>, acessado em maio de 2023.
- [5] SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, *Produção nacional de cimento por regiões e estados (t)2019*, <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1595425060.pdf>, acessado em janeiro de 2020.
- [6] FERREIRA, S.R., LIMA, P.R.L., SILVA, F.A., *et al.*, “Influência de ciclos de molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 17, n. 2, pp. 1024–1034, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-70762012000200008>.
- [7] MÁRMOL, G., SAVASTANO JÚNIOR, H., MONZÓ, J.M., *et al.*, “Portland cement, gypsum and flyash binder systems characterization for lignocellulosic fiber-cement”, *Construction & Building Materials*, v. 124, pp. 208–218, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.083>.
- [8] CECHIN, L., “*Análise da viabilidade de produção de painéis de cimento reforçados com biomassa vegetal e escória de alto forno*”, Dissertação de M.Sc., Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2017.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMASTÉCNICAS, *NBR 16697:2018 Cimento Portland – Requisitos: Classificação*, Rio de Janeiro, ABNT, 2018.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMASTÉCNICAS, *NBR 14656:2001 Cimento Portland e Matérias-primas – Análise Química por Espectrometria de Raios X – Método de Ensaio: Classificação*, Rio de Janeiro, ABNT.
- [11] ALVES, L.S., “*Influência da adição de fibras de celulose (papel kraft) nas características dos blocos de concreto não estrutural*”, Dissertação de M.Sc., Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 2016.
- [12] BUSON, M.A., ALVES, L.S., SANTANA, T.S., *et al.*, “Estudo da viabilidade e de uma metodologia de reciclagem de embalagens de cimento, cal e argamassa visando o emprego de suas fibras compósitos cimentícios”, In: *6th Amazon & Pacific Green Materials Congress and Sustainable Construction Materials LAT-RILEM Conference*, pp. 304–312, Colômbia, 2016.
- [13] KARADE, S.R., IRLÉ, M., MAHER, K., “Influence of granule properties and concentration on cork-cement compatibility”, *Holz als Roh- und Werkstoff*, v. 64, n. 4, pp. 281–286, 2006. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-006-0103-2>.
- [14] IWAKIRI, S., ALBUQUERQUE, C.E.C., PRATA, J.G., *et al.*, “Utilização de madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* para produção de painéis de partículas orientadas – OSB”, *Ciência Florestal*, v. 18, n. 2, pp. 265–270, 2008. doi: <http://dx.doi.org/10.5902/19805098463>.

- [15] DIAS, R.A., “Avaliação da interferência da adição de fibras de papel kraft em argamassas”, Monografia de Graduação, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil, 2017.
- [16] PEREIRA, F.T.M., “Avaliação da influência da adição de fibras kraf tem argamassas”, Monografia de Graduação, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 2018.
- [17] STANCATO, A.C., “Caracterização de compósitos à base de resíduos vegetais e argamassa de cimento modificada pela adição de polímeros para a fabricação de blocos vazados”, Tese de D.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2006. doi: <http://dx.doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2006.370064>.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMASTÉCNICAS, *NBR 16606:2018 Cimento Portland – Determinação da Pasta de Consistência Normal: Classificação*, Rio de Janeiro, ABNT, 2018.
- [19] ZUCCO, L.L., “Estudo da viabilidade de fabricação de placas de compósitos à base de cimento e casca de arroz”, Dissertação de M.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 1999.
- [20] WEATHERWAX, R.C., TARKOW, H., “Effect of wood on setting of Portland cement”, *Forest Products Journal*, v. 14, pp. 567–570, 1964.
- [21] MOLESMI, A.A., GARCIA, J.F., HOFSTRAND, A.D., “Effect of various treatments and additives on wood-Portland cement-water systems”, *Wood and Fiber Science*, v. 15, pp. 164–176, 1982.
- [22] OKINO, E.Y.A., SOUZA, M.R., SANTANA, M.A.E., *et al.*, “Cement bonded Wood particle borad with a mixture of eucalypt and rubberwood”, *Cement and Concrete Composites*, v. 26, n. 6, pp. 729–734, 2004. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00061-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00061-1).
- [23] QUARCIONI, V.A., “Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland: estudo em pasta”, Tese de D.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 2008.
- [24] KIRCHHEIM, A.P., SOUZA, R.B., DAL MOLIN, D.C.C., *et al.*, “Álcalis incorporados ao aluminato tricálcio: efeitos na hidratação”, *Ambiente Construído*, v. 10, n. 1, pp. 177–189, 2010. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212010000100011>.
- [25] GALVÃO, S.P., “Estudo microestrutural de pastas de cimento modificadas por emulsões de base acrílica e acrílica-estirenada”, Tese de D.Sc., Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, 2011.
- [26] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM C117-17:2017 – Standard Test Method for Materials Finer Than 75-µm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing*, West Conshohocken, ASTM.
- [27] BASSA, A., “Processo de polpação kraft convencional e modificado com madeiras de *E. grandis* e híbrido (*E. grandis* x *E. urophylla*)”, Dissertação de M.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- [28] KARADE, S.R., “Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes”, *Construction & Building Materials*, v. 24, n. 8, pp. 1323–1330, 2010. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.003>.
- [29] CASTRO, V.G., “Espécies da Amazônia na produção de compósitos madeira-cimento por vibrocompactação”, Tese de D.Sc., Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2015.
- [30] FIDELIS, M.E.A., “Desenvolvimento e Caracterização Mecânica de Compósitos Cimentícios Têxteis reforçados com fibras de Juta”, Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- [31] SOARES, E.N.C., “Avaliação da atividade pozolânica das cinzas do capim elefante por análise termogravimétrica e ensaio de variação de condutividade elétrica em solução de hidróxido de cálcio”, Tese de D.Sc., Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2017.
- [32] RAABE, J., “Compósitos de fibrocimento com fibras de polpa celulósica modificada com nano-sílica”, Tese de D.Sc., Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 2019.
- [33] GONZALEZ-LOPEZ, L.G., CLARAMUNT, J., HAURIE, J., VENTURA, L., ARDANUY, H.M., “Study of the fire and thermal behaviour of façade panels made of natural fibre-reinforced cement-based composites”, *Construction and Building Materials*, v. 302, pp. 124195, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124195>.
- [34] SCRIVENER, K., SNELLINGS, R., LOTHENBACH, B.A., *Practical guide to microstructural analysis of cementitious materials*, 1ª ed., Boca Raton, CRC Press, 2017.
- [35] ÇAVDAR, A.D., YEL, H., TORUN, S.B., “Micro crystalline cellulose addition effects on the properties of wood cement boards”, *Journal of Building Engineering*, v. 48, pp. 103975, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2021.103975>.

- [36] MELO FILHO, J.A., SILVA, F.A., TOLEDO FILHO, R.D., “Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems”, *Cement and Concrete Composites*, v. 40, pp. 30–39, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.04.003>.
- [37] SILVA, F.A., TOLEDO FILHO, R.D., MELO FILHO, J.A., *et al.*, “Physical and mechanical properties of durable sisal fiber–cement composites”, *Construction & Building Materials*, v. 24, n. 5, pp. 777–785, 2010. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.030>.
- [38] ZHOU, Y., FAN, M., CHEN, L., “Interface and bonding mechanisms of plant fiber composites: An overview”, *Composites. Part B, Engineering*, v. 101, pp. 31–45, Set.2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.055>.
- [39] BALLESTEROS, J.E.M., SANTOS, S.F., MÁRMOL, G., *et al.*, “Evaluation of cellulosic pulps treated by hornification as reinforcement of cementitious composites”, *Construction & Building Materials*, v. 100, pp. 83–90, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.044>.
- [40] LAVERDE, V., MARIN, A., BENJUMEA, J.M., *et al.*, “Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composite materials: a review”, *Construction & Building Materials*, v. 340, pp. 127729, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127729>.
- [41] FONSECA, R.P., “Influência de diferentes tipos de fibras vegetais amazônicas no desempenho de uma argamassa a base de cimento Portland e Metacaulim”, Tese de D.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2021.
- [42] MACHADO, P.J.C., “*Estudo da durabilidade de compósitos cimentícios com polpa de eucalipto modificados com microssilica e látex*”, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2019.
- [43] ARDANUY, M., CLARAMUNT, J., TOLEDO FILHO, R.D., “Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: a review of recent research”, *Construction & Building Materials*, v. 79, pp. 115–128, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035>.