



MARCELLO MARTINS SOARES

**AVALIAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DE COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM PARTÍCULAS DE
PAPEL KRAFT REAPROVEITADAS *IN LOCO***

**LAVRAS - MG
2023**

MARCELLO MARTINS SOARES

**AVALIAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS
REFORÇADOS COM PARTÍCULAS DE PAPEL KRAFT REAPROVEITADAS *IN*
*LOCO***

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Mestre.

D.Sc. Saulo Rocha Ferreira
Orientador

**LAVRAS - MG
2023**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Soares, Marcello Martins.

Avaliação físico-mecânica de compósitos cimentícios reforçados com partículas de papel kraft reaproveitadas *in loco* / Marcello Martins Soares. - 2023.

54 p. : il.

Orientador(a): Saulo Rocha Ferreira.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Compósito cimentício. 2. Fibra kraft. 3. Reaproveitamento de resíduos. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

MARCELLO MARTINS SOARES

**AVALIAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS
REFORÇADOS COM PARTÍCULAS DE PAPEL KRAFT REAPROVEITADAS *IN
LOCO***

**PHYSICAL-MECHANICAL EVALUATION OF CEMENTARY COMPOSITES
REINFORCED WITH KRAFT PAPER PARTICLES REUSED *IN LOCO***

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 16 de dezembro de 2022.

D.Sc. Saulo Rocha Ferreira – Universidade Federal de Lavras (UFLA)

D.Sc. Keoma Defaveri do Carmo e Silva – Universidade Federal de Lavras (UFLA)

D.Sc. Rodolfo Giacomim Mendes de Andrade - Instituto Federal do Espírito Santo (IFES - Campus Vitória)

D.Sc. Saulo Rocha Ferreira
Orientador

**LAVRAS - MG
2023**

RESUMO

A construção civil é uma das atividades econômicas que mais geram resíduos, e grande parte desses são descartados de forma inadequada, provocando impactos ambientais. Um dos resíduos gerados em quase todas as obras de construção civil e em grande volume são as embalagens de cimento. A embalagem é feita de papel Kraft, a partir de polpas de fibras celulósicas longas, que possuem boas propriedades físicas e mecânicas. A presente pesquisa tem como proposta avaliar a adição de fibras de papel kraft provenientes de sacos de cimento em argamassa de revestimento. Associou-se a busca pela utilização de recursos renováveis para minorar os impactos negativos causados pela destinação incorreta deste resíduo com a necessidade de encontrar soluções para reduzir a incidência de fissuras em determinada argamassa de revestimento. Nesta investigação, foram desenvolvidas argamassas de revestimento, usando cimento Portland, com substituições de 0,5%, 1,0% e 1,5% de uma pré-massa composta por calcário e cal hidratada por fibras de papel kraft provenientes de sacos de cimento. Foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos, análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV), análises de calorimetria, e avaliação da aplicação e acabamento do revestimento. Entre as composições estudadas, o traço com 0,5% de fibras de papel Kraft nos corpos de prova proporcionou bom desempenho e promoveu a redução de fissuras. A proposta torna-se viável, considerando os resultados obtidos, redução de impactos ambientais e economia de materiais.

Palavras-chave: Compósito cimentício. Fibras kraft. Reaproveitamento de resíduo. Fibras celulósicas.

ABSTRACT

Civil construction is one of the dietary activities that generate the most waste, and most of it is discarded organically, causing environmental effects. One of the wastes generated in almost all civil construction works, and in large volumes, is cement packaging. The packaging is made of Kraft paper, from pulps of long cellulosic fibers, which have good physical and mechanical properties. This research aims to evaluate the addition of kraft paper fibers from cement bags in coating mortar. The search for the use of renewable resources to reduce the negative effects caused by the allocation of this result was associated with the need to find solutions to reduce the incidence of cracks in a given coating mortar. In this investigation, coating mortars were developed using Portland cement, with substitutions of 0.5%, 1.0% and 1.5% of a pre-mass composed of limestone and hydrated lime with kraft paper fibers from sacks of cement bags. The physical and mechanical properties of the composites, scanning electron microscopy (SEM) analysis, calorimetry analysis, and evaluation of the application and finish of the coating were evaluated. Among the compositions studied, the mix with 0.5% Kraft paper fibers in the test specimens administered performed well and promoted the reduction of cracks. The proposal becomes viable, considering the results obtained, reduction of environmental impacts and savings in materials.

Keywords: Cementitious composite. Kraft fibers. Waste reuse. Cellulosic fibers.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS.....	13
2.1 Objetivo geral.....	13
2.2 Objetivos específicos.....	13
3. REVISÃO DE LITERATURA	14
3.1 Resíduos da construção civil.....	14
3.2 Reaproveitamento de resíduos na construção civil	14
3.3 Utilização de resíduos de papel kraft.....	16
3.4 Reforços lignocelulósicos.....	20
3.5 Desafios na produção de compósitos com fibras ou materiais celulósicos	21
3.6 Revestimentos em argamassa	23
4. JUSTIFICATIVA.....	25
5. MATERIAIS E METODOS.....	27
5.1 Materiais.....	27
5.1.1 Cimento	27
5.1.2 Pré-massa	27
5.1.3 Fibras kraft	30
5.2 Métodos	32
5.2.1 Traço para argamassa.....	32
5.2.2 Ensaio de resistência a compressão	33
5.2.3 Ensaio físicos.....	34
5.2.4 Caracterização microestrutural (MEV)	35
5.2.5 Ensaio de Calorimetria.....	36
5.2.6 Aplicação de argamassa de revestimento	38
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39

6.1 Resistência a compressão	39
6.2 Ensaio físico.....	43
6.3 Caracterização microestrutural (MEV)	45
6.4 Calorimetria	48
6.5 Aplicação de argamassa de revestimento	48
7. CONCLUSÃO	50
REFERÊNCIAS	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Micrografia da fibra de celulose kraft	18
Figura 2: Superfície fibrilosa de fibra Kraft (ampliação de 5500x).....	19
Figura 3: Superfície de reboco com argamassa produzida com a pré-massa.....	25
Figura 4: Coleta de sacarias para incineração	26
Figura 5: Processo de produção e abastecimento de pré-massa. a) Controle automatizado da produção de pré-massa; b) Dosagem automatiza do traço; c) Abastecimento do caminhão betoneira; d) Abastecimento de pré-massa em obra; e) Armazenamento da pré-massa.	29
Figura 6: Embalagens de saco de cimento coletadas em fábrica	30
Figura 7: Embalagens de saco de cimento coletadas em obra	31
Figura 8: Triturador moinho martelo	31
Figura 9: Fibras kraft obtidas após processamento de trituração	32
Figura 10 - Etapas para ensaio de resistência à compressão. a) Moldagem de corpo de prova;	34
Figura 11: Preparação para caracterização microestrutural: a) preparação das amostras de argamassa com 0,5% de fibra com e sem contaminação por cimento, e das amostras de fibras com e sem contaminação; b) Preparação para banho de ouro das amostras; c) Realização de banho de ouro nas amostras; d) amostras preparadas para realização do MEV	36
Figura 12: Etapas do ensaio de calorimetria. a) Pesagem dos materiais; b) Homogeneização das misturas; c) vista interna da caixa térmica com o conjunto de caixas menores onde foi depositado o material ensaiado. d) Caixa térmica fechada e conectada ao sistema registrador de dados.....	37
Figura 13: Resistência à compressão. a) Valores médios de resistência à compressão traço 0,5% de resíduo com e sem contaminação por cimento aos 14, 28 e 90 dias; b) Valores médios de resistência à compressão traço 1,0% de resíduo com e sem contaminação por cimento aos 14, 28 e 90 dias; c) Valores médios de resistência à compressão traço 1,5% de resíduo com e sem contaminação por cimento aos 14, 28 e 90 dias; d) Valores médios de resistência à compressão traço de referência aos 14, 28 e 90 dias	41
Figura 14: Resistência à compressão. a) Valores médios de resistência à compressão traço referência, traço 0,5%, Traço 1,0% e traço 1,5% aos 14 dias de cura; b) Valores médios de resistência à compressão traço referência, traço 0,5%, Traço 1,0% e traço 1,5% aos 28 dias de cura. c) Valores médios de resistência à compressão traço referência, traço 0,5%, Traço 1,0% e traço 1,5% aos 90 dias de cura.	42

Figura 15: Absorção de água aparente para argamassas com teores de adição de fibra de 0%, 0,5%, 1,0% e 1,5% aos 90 dias de cura.....	43
Figura 16: Densidade aparente para argamassas com teores de adição de fibra de 0%, 0,5%, 1,0% e 1,5% aos 90 dias de cura	44
Figura 17: Porosidade aparente para argamassas com teores de adição de fibra de 0%, 0,5%, 1,0% e 1,5% aos 90 dias de cura	44
Figura 18: Micrografias das fibras: a) Fibra kraft contaminada com cimento (1000x); b) Fibra kraft contaminada com cimento (5.00kx); c) Fibra kraft sem contaminação (1000x); d) Fibra kraft sem contaminação (5.00kx)	45
Figura 19: Micrografias da argamassa com 0,5% de fibra, região da fratura após ensaios mecânicos. a) Argamassa com fibra contaminada por cimento, resolução 1000x; b) Argamassa com fibra sem contaminação por cimento, resolução 1000x; c) Argamassa com fibra contaminada por cimento, resolução 2.00kx; d) Argamassa com fibra sem contaminação por cimento, resolução 2.00kx; e) Argamassa com fibra contaminada por cimento, resolução 500x; f) Argamassa com fibra sem contaminação por cimento, resolução 500x; g) Argamassa com fibra contaminada por cimento, resolução 1.00kx. h) Argamassa com fibra sem contaminação por cimento, resolução 1.00kx.	47
Figura 20: Curva de temperatura no decorrer do tempo proveniente do ensaio de calorimetria	48
Figura 21: Aplicação de argamassa para reboco traço referência	49
Figura 22: Revestimento com argamassa com 5% fibras kraft.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Componentes da cal hidratada CH III	27
Tabela 2 - Análise quantitativa por espectrometria de fluorescência de raios X	28
Tabela 3 - Quantidade de materiais para produção de pré-massa	29
Tabela 4 - Traços em massa utilizados na confecção de argamassas.....	32
Tabela 5 - Quantidade em massa utilizados na confecção de argamassas	36
Tabela 6 - Resistência à compressão 14 dias	39
Tabela 7 - Resistência a compressão 28 dias	39
Tabela 8 - Resistência a compressão 90 dias	40

1. INTRODUÇÃO

A construção civil geralmente está associada à elevado desperdício de materiais, danos ambientais e técnicas construtivas tradicionais e defasadas. A necessidade de encontrar soluções para minorar os impactos negativos causados pela construção civil impulsiona estudos nas áreas de desenvolvimento de novos materiais, tecnologia de construção e otimização de processos. Pesquisadores vem desenvolvendo amplos estudos sobre o uso de produtos de cimento reforçados com fibras naturais na indústria da construção.

Os materiais de matriz cimentícia geralmente apresentam baixa resistência à tração, além de possuírem comportamento frágil com baixa resistência ao impacto. Uma forma de otimizar essas propriedades mecânicas de um compósito cimentício é utilizando fibras que podem ser metálicas, sintéticas ou naturais, de forma que a incorporação dessas fibras em proporções adequadas possa aumentar a resistência a tração, tenacidade e durabilidade do compósito, reduzindo a propagação de trincas e permeabilidade. (PAKRAVAN; OZBAKKALOGLU, 2019)

De acordo com Haigh *et al.* (2021), a indústria da construção civil é um dos principais geradores de resíduos na economia mundial. O uso de quantidades excessivas de insumos virgens para fabricar materiais de construção é um crescente dilema que requer atenção urgente.

Uma das linhas de pesquisas que vem sendo desenvolvida é o reaproveitamento de materiais utilizados no próprio ciclo construtivo. Assim, um resíduo passa a adquirir valor na cadeia de construção. A reutilização de insumos no ciclo construtivo promove a redução de impactos negativos, favorece a diminuição do esgotamento de recursos, estimula o desenvolvimento e melhorias no setor de construção civil.

Haigh *et al.* (2021) destacaram que a indústria da construção civil consome aproximadamente 31% de todos os recursos naturais extraídos em todo o mundo e uma solução viável seria a economia circular. Este sistema elimina o “fim da vida útil” de um material, mantendo o material ou produto “em fluxo” por meio de estratégias e métodos eficazes de reutilização. O redirecionamento de resíduos para produtos e materiais de construção pode resolver significativamente os problemas de destinação de resíduos e reduzir a extração de materiais virgens. Podem ser citados exemplos de reciclagens de resíduos sólidos da construção civil, tais como: materiais cerâmicos, tijolos, azulejos, blocos de concreto, telhas, argamassa, concreto e papelão. Resíduos de papelão são considerados uma das maiores fontes de resíduos,

pois contém fibras naturais extraídas de madeira dura ou macia. (KHORAMI; GANJIAN, 2013)

Surgiram também pesquisas para a utilização de fibras lignocelulósicas como insumo de substituição ou melhoria em materiais primas tradicionais da construção. O uso destas fibras se destaca por ser de fonte renovável, pela elevada disponibilidade, baixo custo, economia de energia e pela necessidade de avanços tecnológicos em materiais sustentáveis. Porém, apesar de um grande número de pesquisa comprovarem a eficiência das fibras lignocelulósicas como reforço, o seu emprego na produção industrial é ainda em pequena escala.

Segundo Booya *et al.* (2018), atenção especial tem sido dada sobre o uso de fibras provenientes de fontes vegetais renováveis, como por exemplo, fibras de polpa de celulose. Essas fibras são alternativas ecológicas às fibras sintéticas convencionais e outras fibras petroquímicas. O reforço de materiais cimentícios frágeis com fibras de celulose melhora com sucesso o comportamento mecânico pós-fissuração de compósitos. A fibra de celulósica apresenta importantes propriedades físicas e mecânicas que estão relacionadas à sua composição, por exemplo, a resistência à tração e o módulo de elasticidade. As fibras vegetais, empregadas como reforço em geral, apresentam baixo módulo de elasticidade e grande resistência à tração.

Dentre os resíduos gerados pela construção civil, está o papel kraft, papel utilizado na confecção de sacos que embalam o cimento. As fibras das embalagens de papel kraft natural têm excelentes propriedades físicas e mecânicas. Esse papel é fabricado seguindo as especificações exigidas pela indústria do cimento, uma celulose sulfato de alta resistência, de fibra longa, que é geralmente empregada pura. Após a utilização do cimento, o saco, constituído por material com tão boas características físicas e mecânicas, acaba não sendo utilizado pelas empresas de reciclagem de papel por se encontrar contaminado pelo cimento. Há, porém, grande potencial para seu aproveitamento na produção de novos componentes para construções como reforço em materiais de matriz cimentícia.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo a avaliação físico-mecânica de compósitos cimentícios reforçados com partículas de papel kraft reaproveitadas in loco, visando promover a destinação adequada à embalagem de sacos de cimento, desenvolver novos materiais de construção, possibilitar a redução de custos e de impactos ambientais.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o comportamento das propriedades físicas e mecânicas de materiais cimentícios (argamassa), com adição da fibra kraft, proveniente de papel kraft utilizado como embalagem de sacos cimento, visando dar uma destinação ambientalmente adequada para resíduos de embalagem de sacos de cimento no próprio canteiro de obras, in loco.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o processamento e tratamento adequado para obtenção de partículas celulósicas de papel kraft proveniente das embalagens de cimento coletadas em obra;
- Avaliar por meio de um comparativo entre os compósitos, com e sem fibras, a influência da adição da fibra proveniente de papel kraft nas propriedades físicas e mecânicas, através dos ensaios de absorção de água, porosidade e resistência à compressão;
- Analisar a caracterização das fibras kraft com e sem contaminação por cimento, através da microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Avaliar a influência da utilização de fibras kraft provindas de embalagens de cimento coletadas em obra, comparado à compósitos com utilização de fibras de kraft provindas de embalagens de cimento retiradas de fábrica sem contaminação;
- Analisar a interface entre a matriz de cimento e as fibras kraft, através da caracterização da superfície de ruptura dos corpos de prova após os ensaios mecânicos na região da fratura, através da microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Avaliar o desempenho de argamassa cimentícia com incorporação de fibras kraft.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Resíduos da construção civil

Segundo o panorama da situação dos resíduos sólidos no Brasil, elaborado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais publicado em 2022, os resíduos de construção e demolição registraram aumento quantitativo, passando de 33 milhões de toneladas, gerados em 2010, para 48 milhões, gerados em 2021. Com isso, a quantidade coletada per capita cresceu de 174,3 kg para 227 kg por habitante, por ano. (ABRELPE, 2022)

A geração de resíduos causa danos ambientais significativos, diversas vezes são descartados de forma inadequada, mesmo com tecnologia existente para tratamento do resíduo. Diversos setores da indústria desenvolveram programas de gestão com o objetivo de destinar adequadamente resíduos sólidos produzidos em suas atividades. (BISPO DOS SANTOS *et al.*, 2018)

Oliveira Schweig *et al.* (2018) apontaram que a sustentabilidade se tornou extremamente importante para o desenvolvimento da indústria da construção civil, que começou a mudar o modelo atual de exploração e gerenciamento de resíduos sólidos com base na melhoria da tecnologia, materiais, técnicas construtivas e modelos de produção que empregam conceitos de ecologia.

Bispo dos Santos *et al.* (2018) indicaram que uma alternativa para solucionar os danos ambientais causados pela geração de resíduos é o processo de reciclagem, que trata os resíduos como potencial para a produção de novos produtos, com foco na redução de impactos ambientais e no descarte inadequado de resíduos.

3.2 Reaproveitamento de resíduos na construção civil

A reciclagem, reutilização e redução de resíduos na construção civil são pontos importantes para promover uma cultura de responsabilidade ambiental. O sucesso da reciclagem depende de três fatores: a capacidade de reutilizar o material para fabricar outro material; a capacidade de reutilizá-lo como matéria-prima externa ou interna; a capacidade de segregar materiais recuperáveis e valiosos. (BISPO DOS SANTOS *et al.*, 2018)

Chen *et al.* (2016) aplicaram concreto com agregado de concreto reciclado como um material estrutural em tubos de aço preenchidos com concreto e encontraram resultado viável e seguro levando em conta projeto e construção adequados.

Khan *et al.* (2020) analisaram propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassa e concreto usando resíduos de vidro como substituições de cimento e areia natural e concluíram que o uso de pó de vidro melhorou significativamente as propriedades mecânicas e de durabilidade da argamassa de cimento e concreto quando o tamanho da partícula do pó de vidro é inferior a 45 μm e a taxa de substituição do cimento é de cerca de 10-40%.

Booya *et al.* (2018) determinaram o desempenho mecânico e de durabilidade de compósitos cimentícios reforçado com fibras não modificadas, fibras mecanicamente modificadas e fibras tratadas quimicamente, submetidos às ações de intemperismo: secar e molhar, congelar e descongelar. Concluíram que as duas fibras projetadas tiveram um desempenho melhor do que a fibra não modificada em termos de resistência à compressão, permeabilidade ao íon cloreto e absorção de água.

Martínez-Lage *et al.* (2016) estudaram a viabilidade do uso de resíduos da indústria de papel: cinzas de caldeira de biomassa e resíduos de licor verde para fabricar argamassas e concretos. A resistência à compressão aumentou para as argamassas fabricadas com cinza de biomassa e diminuiu para a argamassa com resíduos. Para concretos, a resistência a compressão aumentou com a substituição de cimento por 10% de cinza de biomassa.

Franco De Carvalho *et al.* (2019) estudaram compósitos à base de cimento, com aumento na substituição de clínquer e consumo de resíduos. Foram avaliadas técnicas para otimização de desempenho de materiais de cimentação suplementares à base de resíduos em matrizes densamente compactadas usando escória de forno de oxigênio básico, rejeitos de minério de ferro de uma barragem de rejeitos, rejeitos de mineração de quartzo e rejeitos de mineração de quartzito. A eficácia da proposta foi evidenciada através do desempenho físico-mecânico e altas eficiências do aglutinante.

Prambauer *et al.* (2019) compararam três métodos de processamento diferentes para a produção de compósitos de polipropileno reforçado com papel. Como resultado, compósitos laminados com camadas de papel intactas apresentaram propriedades mecânicas significativamente maiores, devido à orientação das fibras na folha de papel e boa adesão entre a matriz e as fibras de papel. Compósitos compostos e moldados por injeção mostraram um alto grau de aglomeração de fibras com fibras menos orientadas no compósito, levando a

propriedades mecânicas reduzidas. O empilhamento e prensagem a quente de camadas de papel e polímero foi o método preferencial para a produção de tais compósitos, pois, o método consumiu menos tempo em comparação com o processo de pré-revestimento, com o qual foram obtidos resultados ligeiramente melhores para as propriedades de tração.

Segundo Oliveira Schweig *et al.* (2018), entre os resíduos de construção civil produzidos, a embalagem de papel kraft ganha notoriedade devido ao grande uso em embalagens de materiais, como cimento Portland e cal, pois apresenta alta taxa de produção e ainda não possui destinação correta viável e com logística de coleta consolidada.

De acordo com Reis *et al.* (2014), a maioria dos sacos de cimento usados na construção civil todos os anos são descartados sem tratamento, sendo associado um enorme impacto ambiental negativo. Portanto, a abordagem de reciclar embalagens de papel kraft usadas é de interesse como reforço em fibrocimento e requer técnicas de processamento e consequentes aplicação para a produção.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente, através da resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, expõe que os sacos de cimento são classificados como resíduo classe B, porém, ao serem contaminados com o cimento, este resíduo passa a ser classificado como classe D, devendo ser armazenado, transportado e destinados em locais adequados. (CONAMA, 2001)

Segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, em 2020 o consumo de cimento no Brasil foi de 60,7 milhões de toneladas. O despacho de comercialização na forma ensacada foi de 69%, equivalente a 37,829 milhões de toneladas, ou seja, 756 mil sacos de 50 kg consumidos. Como cada saco de cimento possui 150g, os resíduos de sacos de cimento chegaram a aproximadamente 113,4 mil toneladas em 2020. (SINDICATO NACIONAL DA INDUSTRIA DO CIMENTO, 2020)

3.3 Utilização de resíduos de papel kraft

Segundo Haigh *et al.* (2021), depois do vidro e do plástico, o papelão é considerado o resíduo reciclado mais proeminente que pode ter uso potencial em aplicações de argamassa e concreto, reduzindo assim a extração de material virgem.

De acordo com Khorami *et al.* (2013), as fibras de celulose Kraft apresentam potencial adequado para dispersão uniforme na matriz de cimento. Isso pode estar relacionado às características inerentes a este tipo de fibra, como densidade, capacidade de fibrilar e ligação com partículas de cimento.

O papel kraft é proveniente de madeiras macias e se caracteriza por alta resistência mecânica, a qual se dá pela sua composição de fibras celulósicas com teores mínimos de lignina, devido ao processo de polpação. Em função desta alta resistência, o papel kraft é largamente empregado na fabricação de embalagens, incluindo para materiais da construção civil como o cimento, cal e argamassa.

A produção do papel kraft consiste em descascar, lavar e picar os troncos de árvores em cavacos (que são pequenos pedaços de madeira). Os cavacos são transferidos por esteira transportadora aos digestores, onde passam por um processo de cozimento e são submetidos a reação de licor branco (sulfeto de sódio e hidróxido de sódio). Os digestores possuem altas temperaturas e pressões que dissolvem componentes da madeira que não interessam no produto final. Esse processo de cozimento, minimiza os danos em fibras da celulose e preserva sua uniformidade e resistência. Durante o cozimento, as fibras de celulose são separadas da lignina e resinas, obtendo a celulose não branqueada.

O uso de fibra kraft em compósitos pode reter alta resistência à tração, melhorar a tenacidade à flexão, aumentar a resistência a trincas e reduzir o comportamento de fadiga. No entanto, a capacidade das fibras de atuar em um alto desempenho depende do ambiente em que são aplicadas. Dentro de uma matriz à base de cimento, a fibra kraft pode se deteriorar devido às propriedades minerais alcalinas do Cimento Portland. Portanto, a deterioração da fibra kraft deve ser mitigada para garantir que as propriedades mecânicas e de durabilidade do compósito sejam mantidas. (HAIGH *et al.*, 2021)

A pesquisa de Reis *et al.* (2014) utilizou papel kraft de sacos de cimento como reforço em compósitos de matriz de poliéster insaturados, resultando em aumento da resistência à tração e módulo de elasticidade com o aumento do conteúdo de resíduo de papel kraft triturado e resultados ainda maiores com a utilização de lâmina deste resíduo.

Oliveira Schweig *et al.* (2018) demonstraram a viabilidade técnica dos adobes de solo-cimento estabilizados com fibras celulósicas de papel kraft reciclado fornecido a partir de pacotes de cimento Portland, apresentando retração nula e aumento da resistência à compressão no estado fissurado, aumento da tenacidade e bom desempenho quanto à durabilidade.

Saki *et al.* (2019) produziram concreto de baixo custo com melhores propriedades, incorporando polpas de papel com cimento.

Mármol *et al.* (2013) adicionaram polpa celulósica em composições de cimento de baixa alcalinidade. Foram testadas matrizes cimentícias de baixa alcalina, reduzindo de 80 a 85% o teor de cimento Portland, para reduzir o uso de matérias-primas convencionais, o custo de energia e evitar uma possível degradação alcalina das polpas celulósicas. Esses compósitos

foram preparados em laboratório usando uma desidratação a vácuo de pasta, seguida da técnica de prensagem. Os compósitos de cimento de baixo teor alcalino apresentaram valores médios de módulo de ruptura de cerca de 10 MPa após os ciclos de envelhecimento, com a indicação de que sua resistência à flexão não foi significativamente afetada pelos testes de degradação. Além disso, os valores médios de energia específica desses compósitos também foram aceitáveis após 100 ciclos de imersão e secagem seca em comparação aos compósitos com a matriz plana de cimento Portland.

Ashori *et al.* (2011) afirma que ao contrário do processo de fabricação de papel, quando o papel reciclado é usado para a fabricação de compósitos de cimento, não requer uma preparação extensiva, especialmente se for usado o papel de jornal reciclado (RNP).

A pesquisa de Ashori *et al.* (2011) aponta que as fibras do papel de jornal reciclado (RNP) em placas de cimento podem ter efeitos significativos nas propriedades físicas e mecânicas do compósito. Porém um aumento no conteúdo de papel de jornal reciclado (RNP) pode acarretar efeitos adversos na amostra e resultar em redução nas propriedades de força. Portanto, é importante mapear a proporção do conteúdo para condição ótima do compósito.

Coutts (1989) demonstrou que o papel usado (revistas recicladas, papel de jornal e outros resíduos) é adequado para reforçar os compósitos de cimento mesmo que contenha uma quantidade indesejável de fragmentos de fibras devido ao processamento excessivo.

Khorami *et al.* (2013) apresentou estudo da microestrutura de fibras de polpa kraft e ilustrou através da Figura 1 que a presença de numerosas fibrilas ao redor da superfície externa da fibra principal pode aumentar o atrito e a ligação dentro da zona interfacial de fibrocimento.

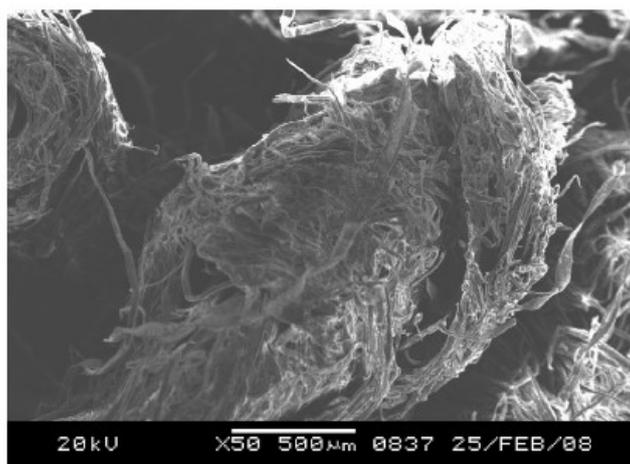


Figura 1: Micrografia da fibra de celulose *kraft*

Fonte: Khorami et al (2013)

Khorami *et al.* (2013) ilustrou também através da Figura 2, que as partículas de cimento hidratado são fixadas à área de circunferência irregular de cada fibrila. A seção transversal das

fibras Kraft é retangular (ou em forma de fita) com aproximadamente 20 μm de largura e 5 μm de espessura. Isso significa que a relação de aspecto para este tipo de fibra pode ser estimada por uma seção transversal circular equivalente de cerca de 9 μm de diâmetro. Como o comprimento médio das fibras Kraft é em torno de 0,95 mm, as relações de aspecto dessas fibras são em torno de 100. Esta grande relação de aspecto fornece uma excelente ligação em partículas e fibras de cimento hidratado.

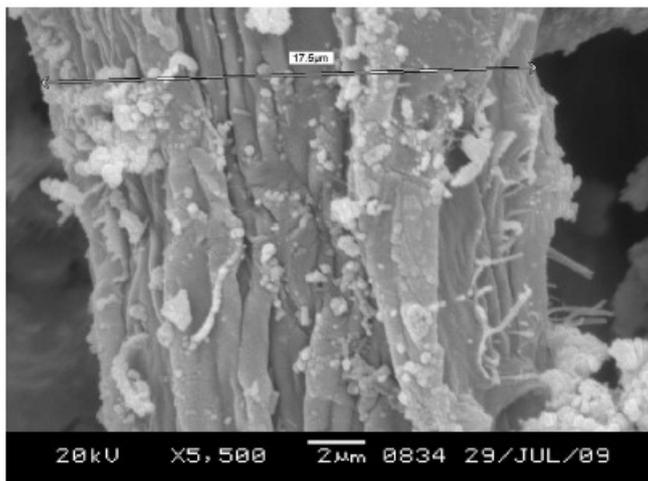


Figura 2: Superfície fibrilosa de fibra Kraft (ampliação de 5500x)

Fonte: Khorami et al (2013)

Castro Sales *et al.* (2021) utilizaram papel kraft a partir de sacos de cimento recuperado para a produção de painéis de fibra. A metodologia inclui o processo de polpação, onde o saco de cimento foi fragmentando e embebido em água com um liquidificador de cozinha. O processo incluiu lavagem e drenagem. A pasta resultante foi filtrada para separar as fibras lignocelulósicas da água e então seca em estufa por 24h a uma temperatura de 105 ° C para remover a umidade absorvida.

Haigh *et al.* (2021) através de uma extensa revisão de literatura, relacionaram informações de pesquisas sobre aplicação de celulose de fibra kraft em compósitos cimentícios com indicação da matriz do material, tipo de fibra kraft, proporção da polpa e aplicação da pesquisa. Para a produção de compósitos de concretos e argamassas com polpa de fibra kraft, o percentual de fibra referenciado é de 0,5% a 2,0%.

3.4 Reforços lignocelulósicos

De acordo com Fortunati *et al.* (2019), a celulose é um dos polímeros naturais mais importantes e é uma matéria-prima sustentável, barata e inesgotável, que representa uma fonte fundamental em muitos setores industriais diferentes. Por milênios, a celulose tem sido usada na forma de madeira e fibras vegetais como fonte de energia, para materiais de construção e roupas. A produção de fibras de celulose, também em nanoescala, e sua aplicação em compósitos e nanocompósitos, expandiram a atenção devido à sua alta resistência e rigidez combinadas com baixo peso, biodegradabilidade, renovabilidade e sustentabilidade.

Silva *et al.* (2009) destacaram que a elevada disponibilidade de fibras lignocelulósicas, somada à necessidade de uma fonte renovável para a produção de polímeros, abre uma grande oportunidade para avanços tecnológicos que agreguem valor aos produtos da agroindústria e, ao mesmo tempo, atuem na fixação de carbono na natureza.

De acordo com Ferreira *et al.* (2017), os compósitos reforçados com fibra vegetal têm o potencial de se tornarem a opção definitiva de material verde, minimizando o uso de recursos naturais e o impacto geral na vida útil. Devido à grande disponibilidade, principalmente em países tropicais, essas fibras têm baixo custo e apresentam a grande vantagem de serem renováveis.

Segundo Ashori *et al.* (2011), as fibras minerais são usadas com frequência na indústria de cimento para obter as propriedades desejadas ou reduzir o custo dos produtos finais.

As principais vantagens do uso de fibras lignocelulósicas como aditivos no cimento, de acordo com Ashori *et al.* (2011), são baixa densidade, baixo custo, natureza não abrasiva, altos níveis de possíveis enchimentos, baixo consumo de energia e grande variedade de fibras disponíveis em todo o mundo.

Para Ardanuy *et al.* (2022) a principal vantagem do reforço de fibra é o comportamento do compósito após o início da fissura, pois as fibras preenchem as fissuras da matriz e transferem as cargas. A tenacidade pós-fissuração pode permitir o uso mais intensivo de tais compósitos na construção. Fibras celulósicas fornecem rigidez, resistência e capacidade de ligação adequadas a matrizes à base de cimento para melhoria substancial de sua resistência à flexão, tenacidade e resistência ao impacto. Além disso, essas fibras podem reduzir a retração plástica livre; diminuir a condutividade térmica e melhorar o desempenho acústico aumentando a absorção sonora e o amortecimento específico e a densidade do compósito.

De acordo com Ojo *et al.* (2019), as propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras dependem da interface entre a matriz e a fibras, uma vez que a resistência desse compósito é obtida transferindo a tensão entre as fibras e a matriz.

Segundo Silva *et al.* (2009), as fibras lignocelulósicas são excelentes matérias-primas para a química de polímeros e compósitos, o que pode ser comprovado pelo elevado número de patentes nacionais e internacionais e o elevado número de produtos já comercializados.

Akhavan *et al.* (2017), descreveram que os compósitos de cimento reforçado com fibra podem ser classificados em dois tipos, com base no seu teor de fibra: compósitos de fibra de baixo e alto volume. Em compósitos de fibrocimento de baixo volume, após a falha da matriz, o número de fibras que existem na seção de falha não é suficiente para transferir a carga na seção de falha. Portanto, imediatamente após a matriz falhar, as fibras também falham e ocorre uma falha macroscópica do compósito. Em compósitos de fibrocimento de alto volume, após a matriz falhar, as fibras transferem a carga através da seção de falha, o que permite o compósito para transportar cargas mais altas. Há um conteúdo limite de fibra que distingue esses dois comportamentos diferentes. Esse limiar é conhecido como fração crítica do volume da fibra e depende de vários parâmetros, como resistência da ligação fibra-matriz, resistência da fibra e módulo elástico e resistência e módulo da matriz.

3.5 Desafios na produção de compósitos com fibras ou materiais celulósicos

De acordo com Machado *et al.* (2020), a melhoria das propriedades físico-mecânicas dos compósitos a base de cimento Portland a médio e longo prazo depende de fatores como o conhecimento das características dos materiais utilizados, dosagem, condições de cura e tipo de meio exposto, a relação água-cimento. Pode ser considerada uma tarefa complexa e sistemática, sendo necessário considerar, por exemplo, a interação entre fibras, matriz e método de processamento.

Em relação às desvantagens do uso de fibras vegetais como reforço em compósitos, tratamentos têm sido estudados para reduzir o impacto de uma baixa ligação química e da alta capacidade de absorção de água que causa uma instabilidade volumétrica. Esta instabilidade volumétrica resulta em uma perda parcial do contato físico fibra-matriz danificando a zona de transição interfacial. (FERREIRA *et al.*, 2017).

Da Glória *et al.* (2020) enfatiza que de acordo com diversas evidências experimentais disponíveis na literatura, uma das principais questões relacionadas ao uso de bioagregados em

argamassas e/ou concretos é a sua compatibilidade com a matriz cimentícia. Por esse motivo, antes de serem empregadas como agregados alternativos, as biopartículas requerem algum tipo de tratamento que permita reduzir/remover substâncias inorgânicas e extrativos hidrossolúveis para aumentar sua durabilidade quando embebidas em uma matriz cimentícia e, ao mesmo tempo, mitigar o possível retardamento /inibição da hidratação do cimento.

Rostami *et al.* (2020) destacaram que o concreto é altamente alcalino, o que pode transmitir facilmente diferentes níveis de degradação às fibras com várias composições poliméricas. Assim, a investigação do desempenho de várias fibras adicionadas ao concreto é altamente recomendável e necessária. Algumas fibras são quimicamente inertes e, portanto, altamente estáveis em comparação com outras fibras.

Segundo Banyhussan *et al.* (2016), as fibras vegetais degradam-se facilmente na matriz cimentícia devido a vários fatores, como variação volumétrica por absorção de água, ataque alcalino e mineralização de suas paredes internas devido à passagem do produto de hidratação presente na solução de poros da matriz de cimento para dentro as fibras. Para reduzir este efeito de fragilidade das fibras naturais, modificações podem ser feitas na matriz para reduzir a alcalinidade por meio da adição de materiais pozolânicos como, por exemplo, o metacaulim.

Em compósitos de cimento, as fibras naturais são expostas à umidade e a um ambiente alcalino, o que influencia na degradação e mineralização das fibras na matriz cimentícia. O movimento da água ocorre ao longo da fibra, da matriz para a fibra e da fibra para a matriz. Por causa desse movimento, a fibra pode inchar e encolher na matriz, o que pode deteriorar a ligação fibra-matriz. A mineralização é causada pela precipitação de hidróxido de cálcio na célula da fibra e na superfície da fibra. A degradação da celulose, hemicelulose e lignina ocorre devido à adsorção de íons cálcio e hidroxila. Uma das possibilidades de evitar a degradação da fibra natural é a imersão das fibras em pasta de sílica ativa antes do vazamento. Outros tratamentos de fibra podem melhorar a durabilidade da fibra, como agentes repelentes de água ou revestimento de polímero. (TOLEDO FILHO *et al.* 2018) De acordo com Rostami *et al.* (2020), algumas fibras são suscetíveis à deterioração quando em contato com umidade, álcalis ou outros ingredientes de misturas químicas. A degradação química leva à rápida perda de resistência da fibra devido à alta alcalinidade dos compósitos à base de cimento. Assim, compatibilidade química das fibras de reforço com o ambiente alcalino de compósitos cimentícios é enfatizado.

Segundo Ardanuy *et al.* (2022) os compósitos de cimento com fibras vegetais exibem maior tenacidade, ductilidade, capacidade de flexão e resistência a fissuração em comparação com materiais à base de cimento não reforçados com fibras. Apesar de todas estas vantagens, a

produção industrial de compósitos à base de cimento reforçados com fibras vegetais é atualmente limitada pela durabilidade a longo prazo desses materiais. O problema de durabilidade está associado a um aumento na fratura da fibra e uma diminuição no arrancamento da fibra devido a uma combinação de enfraquecimento das fibras por ataque alcalino e variação de espaço e volume devido à sua elevada absorção de água. Isso faz com que o material tenha uma redução na resistência e tenacidade pós-fissuração. O papel das fibras celulósicas como reforço consiste em combinar de maneira adequada a adequada ligação interfacial entre a fibra e a matriz, bem como garantir a durabilidade do material.

A reciclagem de resíduo de papel kraft proveniente das embalagens de cimento não é trivial, como é para outros tipos de papel. De acordo com Pavasars *et al.* (2003), a dificuldade é uma consequência do conteúdo residual de cimento nos sacos, que pode ser altamente abrasivo e, conseqüentemente, indesejável para o processamento da reciclagem. Pavasars *et al.* (2003) citaram que com a adição de polpa celulósica em matrizes de cimento, podem ocorrer alguns mecanismos de degradação progressiva, como a destruição de cadeias macromoleculares durante a hidrólise alcalina parcial da celulose, que causam sua ruptura e a conseqüente diminuição do grau de polimerização. Além disso, a degradação das fibras ocorre pelo fácil movimento da água dos poros em direção à superfície das fibras. Os núcleos internos das fibras vegetais podem se encher gradualmente com os produtos de hidratação que levam a fragilização das fibras, reduzindo seu desempenho mecânico.

Portanto, a abordagem da reciclagem de qualquer embalagem de cimento Portland é interessante como reforço no fibrocimento, entretanto, requer técnicas para processamento e conseqüente aplicação na fabricação de compósitos. Considerando a resistência à tração conferida pela fibra celulósica, sua incorporação em argamassas pode tornar uma medida de melhoramento para o compósito. Pode também auxiliar na redução de microfissuras.

3.6 Revestimentos em argamassa

Os revestimentos e acabamentos das paredes constituem parte significativa das edificações contribuindo para a proteção das mesmas contra as ações climáticas, mecânicas e/ou ambientais. Um dos revestimentos tradicionais de presença obrigatória é o revestimento à base de argamassa. Este elemento construtivo tem como principal função proteger as estruturas de vedação, conferindo isolamento termo-acústico, estanqueidade à água e aos gases além de regularizar a superfície para receber outros revestimentos e o acabamento final. Para que uma

argamassa cumpra as suas funções adequadamente é necessário que apresente tanto no estado fresco como no endurecido, algumas propriedades notadamente o índice de trabalhabilidade, a resistência à compressão e a aderência sob tração. (CINTRA; PAIVA; BALDO, 2014).

A NBR 13281 (ABNT, 2005) - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Requisitos, define que a argamassa é uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).

O principal aglomerante usado em traços de argamassas é o cimento Portland. No Brasil são produzidos vários tipos de cimento Portland, sendo que cada um deles possui uma classificação distinta para utilização, feita com as especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), definida na norma NBR 16697 (ABNT, 2018). Dentre os cimentos fabricados e utilizados nas obras brasileiras destaca-se o CP II (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC, 2019), que representa mais de 60% dos cimentos disponíveis no mercado nacional (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP, 2018).

Mohamad, Rizzatti e Roman (2011) descreveram que as principais propriedades mecânicas que as argamassas de revestimento devem apresentar são as resistências à compressão, à tração, à flexão e ao cisalhamento.

Cintra, Paiva e Baldo (2004) destacaram que a trabalhabilidade de argamassas avalia qualitativamente a facilidade para o manuseio. É uma propriedade complexa, que depende de variáveis interrelacionadas que conjuntamente concorrem para a boa qualidade e produtividade durante a aplicação. Algumas destas variáveis são: adesão inicial, plasticidade, consistência, retenção de água, início e final de pega. Várias propriedades das argamassas no estado endurecido estão diretamente relacionadas a trabalhabilidade inicial.

4. JUSTIFICATIVA

Esta pesquisa associa a busca pela utilização de recursos renováveis para minorar os impactos negativos causados pela construção civil com a necessidade de encontrar soluções para reduzir a incidência de fissuras em determinada argamassa de revestimento e desenvolver novos compósitos.

O uso de recursos naturais renováveis, como as fibras vegetais, pela indústria da construção civil, pode contribuir para o desenvolvimento de outros materiais de construção sustentáveis.

Os revestimentos de argamassa são frequentemente objeto de fissuras no decorrer de sua vida útil, comprometendo seu desempenho. Como referência, a argamassa produzida com cimento e pré-massa da Industrial de Cal SN, composta por calcário, cal virgem e água, apresenta incidência de fissuras. A Figura 3 ilustra a superfície de reboco com argamassa produzida através da pré-massa, aplicada em parede de alvenaria de bloco cerâmico preparada com chapisco.



Figura 3: Superfície de reboco com argamassa produzida com a pré-massa

Fonte: Do autor

Segundo Haigh et al. (2021) a utilização de fibras em compósitos cimentícios pode combater as fissuras, aumentar a resistência a tração e flexão, além de reduzir o comportamento de fadiga.

A sacaria de papel kraft destinada à embalagem de cimento e de cal, está presente em grande quantidade em quase todos os tipos de obras, sem práticas viáveis de reaproveitamento. O procedimento com relação aos sacos de cimento utilizados na maioria das obras tem sido a destinação incorreta em aterros não licenciados ou a contratação de empresa especializada para coleta e realização de incineração das embalagens, conforme registrado em uma obra em fase de construção em Lavras MG, ilustrado na Figura 4.



Figura 4: Coleta de sacarias para incineração

Fonte: Do autor

Tendo em vista as necessidades da construção civil, as necessidades por destinações corretas de resíduos, e a busca por técnicas e materiais mais sustentáveis, este trabalho buscou a inserção de fibras de papel Kraft reaproveitadas de embalagens de cimento na confecção de argamassas.

5. MATERIAIS E METODOS

5.1 Materiais

Os materiais utilizados na confecção das argamassas foram: cimento, pré-massa, água e papel kraft proveniente de embalagens de cimento.

5.1.1 Cimento

O cimento Portland utilizado no decorrer da pesquisa foi o Cimento Portland CP II - E 32. Este cimento foi escolhido por ser a classe de cimento mais utilizada no Brasil.

5.1.2 Pré-massa

Para produção de argamassas, foi utilizada a pré-massa, produzida pela empresa Industria de Cal SN Ltda e fornecida em obras através de caminhão betoneira. A pré-massa é composta por calcário, cal hidratada CH III e água.

A composição e faixa de concentração da cal hidratada CH III, fornecida pelo fabricante, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Componentes da cal hidratada CH III

Composição	Faixa de Concentração (%)
Hidróxido de Cálcio	65 - 78
Hidróxido de Magnésio	15 - 25
Carbonato de Cálcio	<15
Óxido de Cálcio	<15

Para análise da composição química do calcário, foi disponibilizado pela Industria de Cal SN o resultado do ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Análise quantitativa por espectrometria de fluorescência de raios X

Ensaio	Resultados (%)	Ensaio	Resultados (%)
SiO ₂	0,28	Teor de CaCO ₃	98,81
Al ₂ O ₃	0,03	Teor de MgCO ₃	0,67
Fe ₂ O ₃	0,05	Ca (Cálcio)	39,58
TiO ₂	0,01	Mg (Magnésio)	0,2
CaO	55,37	MnO	0,02
MgO	0,33	P ₂ O ₅	0,11
Na ₂ O	< 0,01	SrO	0,19
K ₂ O	0,01		

A extração, moagem e expedição do calcário utilizado para produção da pré-massa é realizada pela Indústria de Cal SN em Ijaci MG. O material possui caracterização granulométrica especificada como malha 9, ou seja, passantes na peneira de 2 mm.

A produção da pré-massa é realizada na Usina de Concreto da Indústria de Cal SN, em Lavras MG. A Usina conta com um sistema automatizado para dosagem do traço e abastecimento do caminhão betoneira. Ao fornecer a pré-massa para obras, a mistura homogênea fica armazenada em recipientes localizados em ambientes cobertos. Para aplicação, faz-se necessário a adição de cimento e água conforme traços definidos pela própria obra para cada utilização. A Figura 5 ilustra algumas etapas do processo de produção da pré-massa na Usina e abastecimento em obra.





Figura 5: Processo de produção e abastecimento de pré-massa. a) Controle automatizado da produção de pré-massa; b) Dosagem automatiza do traço; c) Abastecimento do caminhão betoneira; d) Abastecimento de pré-massa em obra; e) Armazenamento da pré-massa.

Fonte: Do autor

A Tabela 3 a seguir mostra a quantidade de material usado para produção da pré-massa, para cada metro cúbico:

Tabela 3 - Quantidade de materiais para produção de pré-massa

Material	Quantidade em kg (para 1m ³)
Cal	60
Calcário	1750
Água	250

5.1.3 Fibras kraft

As fibras de celulose utilizadas no reforço da argamassa foram obtidas através de sacos de cimento vazios provenientes de duas fontes e formas:

- a) Embalagens de saco de cimento retiradas direto da fábrica sem contaminação de cimento, apresentada na Figura 6.



Figura 6: Embalagens de saco de cimento coletadas em fábrica

- b) Embalagens de saco de cimento coletadas no canteiro de obras ilustrada na Figura 7, sem realização de tratamento ou limpeza. As embalagens estavam armazenadas em local adequado, sem exposição a chuva ou incidência solar. Fora a contaminação por cimento, estas embalagens não possuíam outra contaminação. O cimento remanescente no fundo da embalagem foi retirado.



Figura 7: Embalagens de saco de cimento coletadas em obra

Fonte: Do autor

O mecanismo utilizado para a preparação das fibras kraft foi um processo físico, ou seja, os componentes utilizados na fabricação do mesmo não foram separados. O papel kraft foi cortado em tiras e posteriormente submetido a um processo mecânico à seco em um equipamento triturador contendo martelos e peneira com abertura de 3 mm, conforme ilustrado nas Figura 8.



Figura 8: Triturador moinho martelo

Fonte: Do autor

As fibras kraft obtidas após processamento de trituração estão evidenciadas na figura 9, provindas de embalagens de cimento retiradas de fábrica sem contaminação de cimento e fibras kraft provindas de embalagens de cimento coletadas em obra.



Figura 9: Fibras kraft obtidas após processamento de trituração

Fonte: Do autor

5.2 Métodos

5.2.1 Traço para argamassa

Foram produzidos traços para avaliar as argamassas, sem adição de fibras denominado como traço de referências e com adição de fibras considerando substituição em massa de parte da pré-massa, nas proporções de 0,5%, 1,0% e 1,5%.

Os traços em massa utilizados na produção das argamassas estão apresentados na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 - Traços em massa utilizados na confecção de argamassas

Material	Traço referência	Traço 0,5%	Traço 1,0%	Traço 1,5%
Cimento	1,00	1,00	1,00	1,00
Pré-massa	9,05	9,00	8,66	8,62
Fibra kraft	-	0,05	0,09	0,14
Água	0,50	0,50	0,50	0,50

Os traços com adição de fibras kraft foram produzidos considerando as fibras provenientes de embalagens obtidas direto de fábrica sem contaminação e embalagens coletadas no canteiro de obras que estavam armazenadas após consumo do cimento.

Após a pesagem, os materiais foram misturados em uma betoneira, obedecendo à seguinte ordem: inicialmente foi adicionada a pré-massa, em seguida o cimento e, em sequência, a fibra (quando aplicável). Após a homogeneização da mistura, a água foi adicionada com fator água cimento de 0,5.

5.2.2 Ensaio de resistência a compressão

Este ensaio teve como objetivo analisar a resistência das argamassas no estado endurecido quanto ao uso da fibra kraft em substituição parcial à pré-massa. Para esse ensaio, foi utilizada a norma NBR 13279 (ABNT, 1995), por meio da qual foram elaborados traços de argamassa, descritos na Tabela 1, mencionada acima.

Os moldes foram confeccionados conforme a norma NBR 7215 (ABNT, 1996a), que consiste na determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, conforme ilustrado na Figura 10. O ensaio de resistência à compressão (com e sem adição de fibra kraft) foram realizados ao atingir as idades de 14, 28 e 90 dias considerando a velocidade de deformação de 0,1 mm/min.



(c)

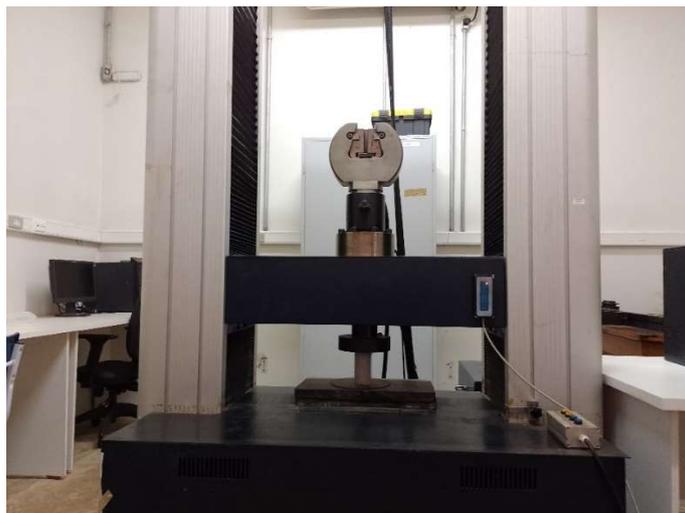


Figura 10 - Etapas para ensaio de resistência à compressão. a) Moldagem de corpo de prova; b) Corpos de prova desmoldados; c) Ensaio de resistência a compressão axial

Fonte: Do autor

5.2.3 Ensaio físicos

Baseado no princípio de Arquimedes foram determinadas a absorção de água (AA), a densidade aparente (DA) e a porosidade aparente (PA) aos 90 dias de cura dos corpos de prova, com contaminação. A metodologia utilizada seguiu a descrição indicada na norma ASTM C-948-81 (2016).

A massa seca (M_s) foi obtida. Em seguida os corpos de prova foram submersos em água por 24 h, a temperatura ambiente (~ 23 °C), sendo medida a sua massa imersa (M_i). Após a retirada da amostra imersa, sua superfície foi levemente enxugada com pano limpo e seco para retirar o excesso de água, e medido a sua massa úmida (M_u). As Equações 1, 2 e 3 foram utilizadas para a determinação das propriedades físicas citadas.

$$\text{Absorção de água aparente (\%)} = \frac{M_u - M_s}{M_s} \quad (\text{Equação 1})$$

$$\text{Densidade aparente } \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{M_s}{M_u - M_i} * d \quad (\text{Equação 2})$$

$$\text{Porosidade aparente (\%)} = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} * 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde, d – densidade da água = 1g/cm^3 ; M_s - massa seca; M_i - massa imersa; M_u - massa úmida.

5.2.4 Caracterização microestrutural (MEV)

Foi realizada a caracterização microestrutural por meio de um microscópio eletrônico de varredura modelo LEO EVO 40 XVP Zeiss, localizado no Departamento de Fitopatologia da UFLA.

Foram utilizadas para amostragem as fibras kraft provenientes de embalagens de cimento, com e sem contaminação por cimento. O ensaio de caracterização microestrutural também foi realizado para as argamassas compostas por 0,5% de fibras kraft provenientes de embalagens de concreto, com e sem contaminação, para caracterizar a superfície de ruptura dos corpos de prova após os ensaios mecânicos na região de fratura, com o objetivo de analisar a interface entre a matriz de cimento e a fibra kraft.

O preparo e análise das amostras foram realizados nas regiões de fratura no ensaio de resistência a compressão, com o propósito de avaliar a interação das partículas de kraft. Para isso, foram utilizadas amostras da linha de cola com dimensões de 1 cm^3 , que foram secas por 24 horas em estufa de circulação de ar com temperatura de $105\text{ }^\circ\text{C}$. Para isso, as amostras foram fixadas sobre o porta amostras de alumínio (stubs) e recobertas com ouro, conforme ilustrado na Figura 11.



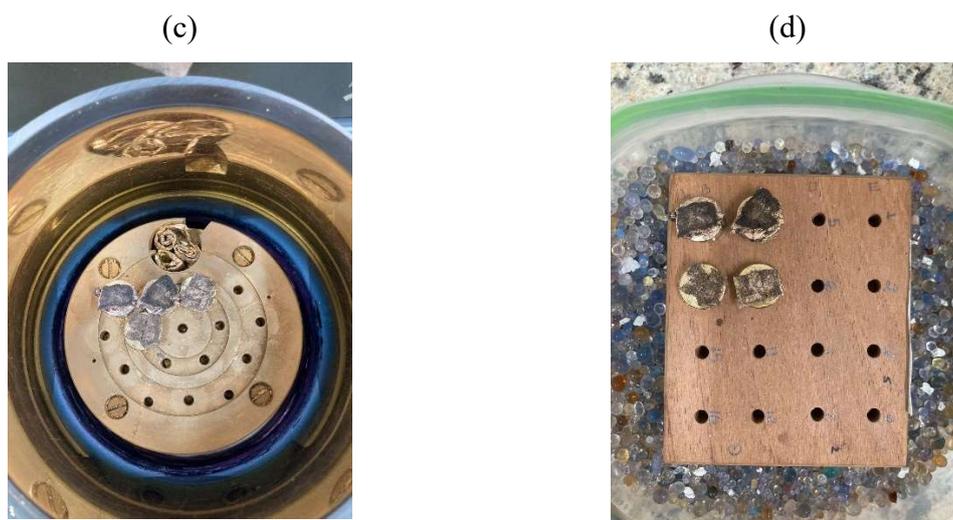


Figura 11: Preparação para caracterização microestrutural: a) preparação das amostras de argamassa com 0,5% de fibra com e sem contaminação por cimento, e das amostras de fibras com e sem contaminação; b) Preparação para banho de ouro das amostras; c) Realização de banho de ouro nas amostras; d) amostras preparadas para realização do MEV

5.2.5 Ensaios de Calorimetria

O ensaio de calorimetria foi realizado para definir a evolução da hidratação do cimento, considerando as influências das fibras kraft, com e sem contaminação por cimento. O calor liberado, medido em função do tempo, podem ser usados para descrever e avaliar a cinética de hidratação e propriedades correlacionáveis como reatividade, resistência mecânica e tempos de pega. Utilizou-se pasta com 2% de fibras kraft e relação a/c igual a 0,40, e quantidades conforme Tabela 5 abaixo.

Tabela 5 - Quantidade em massa utilizados na confecção de argamassas

Material	Referência	Fibra não contaminada 2%	Fibra contaminada 2%
Cimento	811,20	809,80g	806,62g
Fibra kraft	-	16,20g	16,13g
Água	324,48g	323,91g	322,65g

Um sistema foi projetado para colocar a mistura (cimento, material testado e água), possuindo apenas um orifício para acoplamento do cabo do termopar para evitar a dissipação

do calor da reação exotérmica do cimento para o ambiente. Para isso, foram utilizadas três caixas térmicas com capacidade de 430 ml. A figura 12 apresenta as etapas do ensaio.

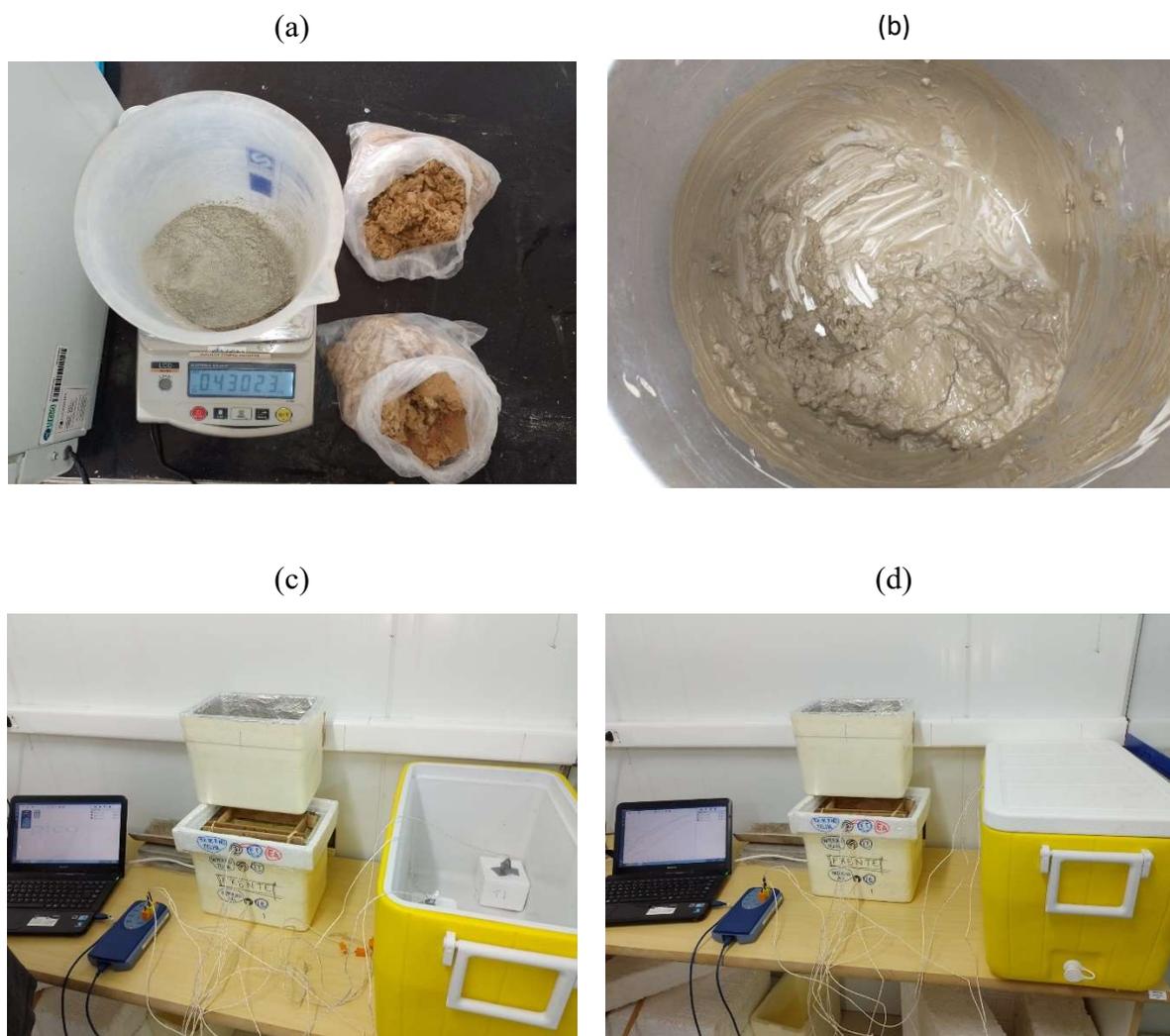


Figura 12: Etapas do ensaio de calorimetria. a) Pesagem dos materiais; b) Homogeneização das misturas; c) vista interna da caixa térmica com o conjunto de caixas menores onde foi depositado o material ensaiado. d) Caixa térmica fechada e conectada ao sistema registrador de dados.

O aparelho de calorimetria possui canais de entrada para amostras, equipados com termopares nas suas extremidades. O perfil da liberação de calor na hidratação do cimento e das misturas de cimento e fibra com e sem contaminação por cimento, foi monitorado até 66 horas.

5.2.6 Aplicação de argamassa de revestimento

As argamassas produzidas com traço de referência e traço com 0,5% de fibra kraft contaminada com cimento foram aplicadas para revestimento de parede de alvenaria cerâmica, em área de aproximadamente 1 m², com a finalidade de comparar o acabamento final, avaliar a trabalhabilidade durante a aplicação e analisar as fissuras.

A base foi limpa antes da aplicação do revestimento, com execução previa de chapisco. Foram adotados revestimentos de reboco em argamassa com espessura de 2 cm, garantida pelo uso de régua de sarrafeamento.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Resistência a compressão

São apresentados nas Tabelas 6, 7 e 8 as médias dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassa, com 14, 28 e 90 dias respectivamente. Os resultados obtidos mostram que quanto maior a proporção de fibras kraft em substituição à pré-massa, menor foi a resistência à compressão da argamassa de revestimento.

Tabela 6 - Resistência à compressão 14 dias

Resistência à compressão (MPa) – Média dos valores					
Traço	Teor de adição	Descrição da Matriz	14 dias	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
Referência	0%	Referência	2,05	0,33	8,12
Traço 0,5 %	0,50%	Com contaminação	1,68	0,55	16,73
		Sem contaminação	1,27	0,16	6,44
Traço 1,0 %	1,00%	Com contaminação	1,28	0,15	5,83
		Sem contaminação	1,00	0,29	15,01
Traço 1,5 %	1,50%	Com contaminação	0,82	0,10	6,49
		Sem contaminação	0,79	0,09	5,51

Tabela 7 - Resistência a compressão 28 dias

Resistência à compressão (MPa) – Média dos valores					
Traço	Teor de adição	Descrição	28 dias	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
Referência	0%	Referência	2,24	0,59	13,37
Traço 0,5 %	0,50%	Com contaminação	1,83	0,40	11,08
		Sem contaminação	1,32	0,05	1,98
Traço 1,0 %	1,00%	Com contaminação	1,28	0,34	13,65
		Sem contaminação	1,03	0,29	14,36
Traço 1,5 %	1,50%	Com contaminação	0,88	0,36	20,65
		Sem contaminação	0,86	0,29	14,36

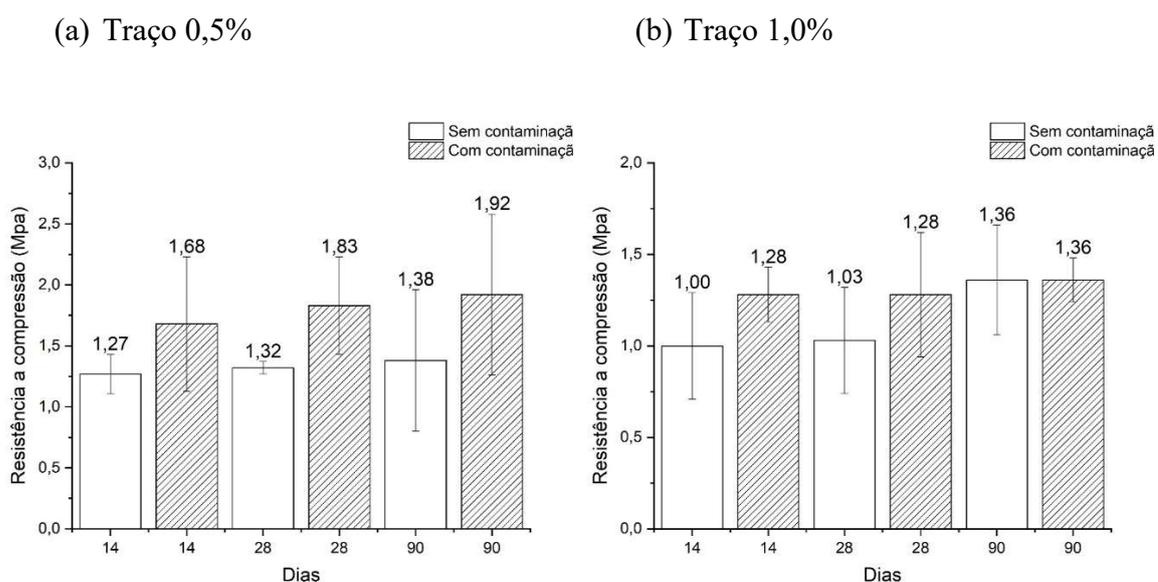
Tabela 8 - Resistência a compressão 90 dias

Resistência à compressão (MPa) – Média dos valores					
Traço	Teor de adição	Descrição	90 dias	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
Referência	0%	Referência	2,80	0,86	15,61
Traço 0,5 %	0,50%	Com contaminação	1,92	0,66	17,41
		Sem contaminação	1,38	0,58	21,60
Traço 1,0 %	1,00%	Com contaminação	1,36	0,12	4,30
		Sem contaminação	1,36	0,30	11,38
Traço 1,5 %	1,50%	Com contaminação	0,88	0,01	0,72
		Sem contaminação	0,89	0,14	8,12

Baixos valores de desvio padrão das amostras representam valores mais uniformes e consequentemente uma menor dispersão dos valores obtidos. O coeficiente de variação é uma medida da dispersão relativa dos resultados obtidos, um baixo coeficiente de variação indica uma menor dispersão dos resultados.

Pode-se observar que a adição de 0,5% de fibra *kraft* nesse traço exerceu pouca interferência na resistência à compressão, pois os valores obtidos estão próximos aos resultados obtidos pelo traço da argamassa de referência. Já os traços com 1,0% e 1,5 % de fibra *kraft* promoveram grande interferência na resistência à compressão.

A Figuras 13 relaciona os resultados da resistência a compressão aos 14, 28 e 90 dias de cura, para cada teor de fibra aplicado.



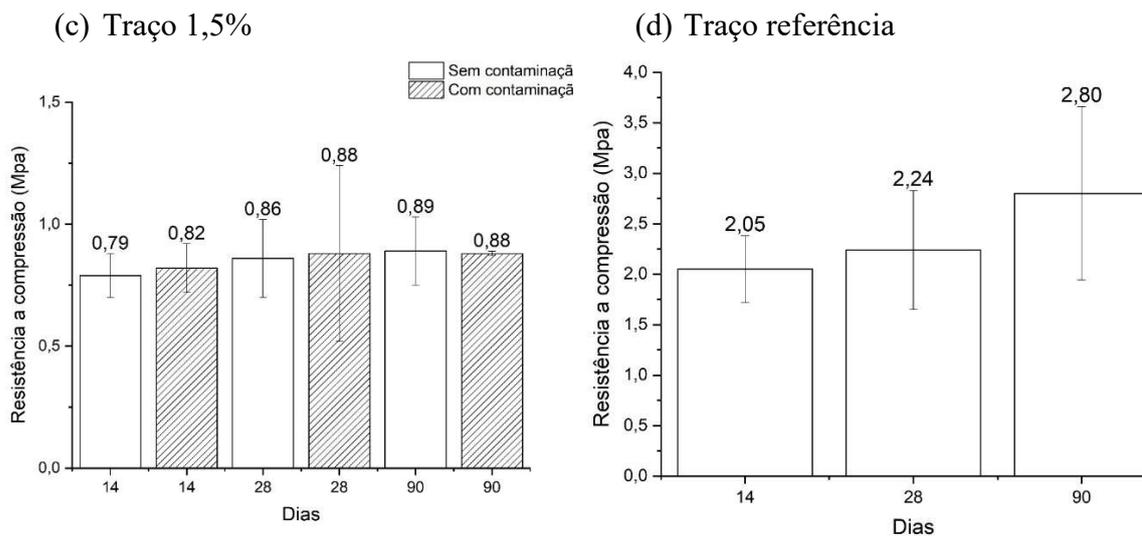


Figura 13: Resistência à compressão. a) Valores médios de resistência à compressão traço 0,5% de resíduo com e sem contaminação por cimento aos 14, 28 e 90 dias; b) Valores médios de resistência à compressão traço 1,0% de resíduo com e sem contaminação por cimento aos 14, 28 e 90 dias; c) Valores médios de resistência à compressão traço 1,5% de resíduo com e sem contaminação por cimento aos 14, 28 e 90 dias; d) Valores médios de resistência à compressão traço de referência aos 14, 28 e 90 dias

Fonte: Do autor

A Figura 14 relaciona os resultados da resistência a compressão aos teor de fibra utilizado, para cada tempo de cura adotado. A argamassa de referência mostrou uma resistência à compressão aos 28 dias de 2,24 MPa. A substituição de 0,5% de pré-massa por fibra kraft promoveram uma redução na resistência à compressão de 18% para o traço com fibras kraft contaminadas e 41% para o traço com fibra kraft sem contaminação, apresentando valores de 1,83 MPa e 1,32 MPa aos 28 dias de cura, respectivamente.

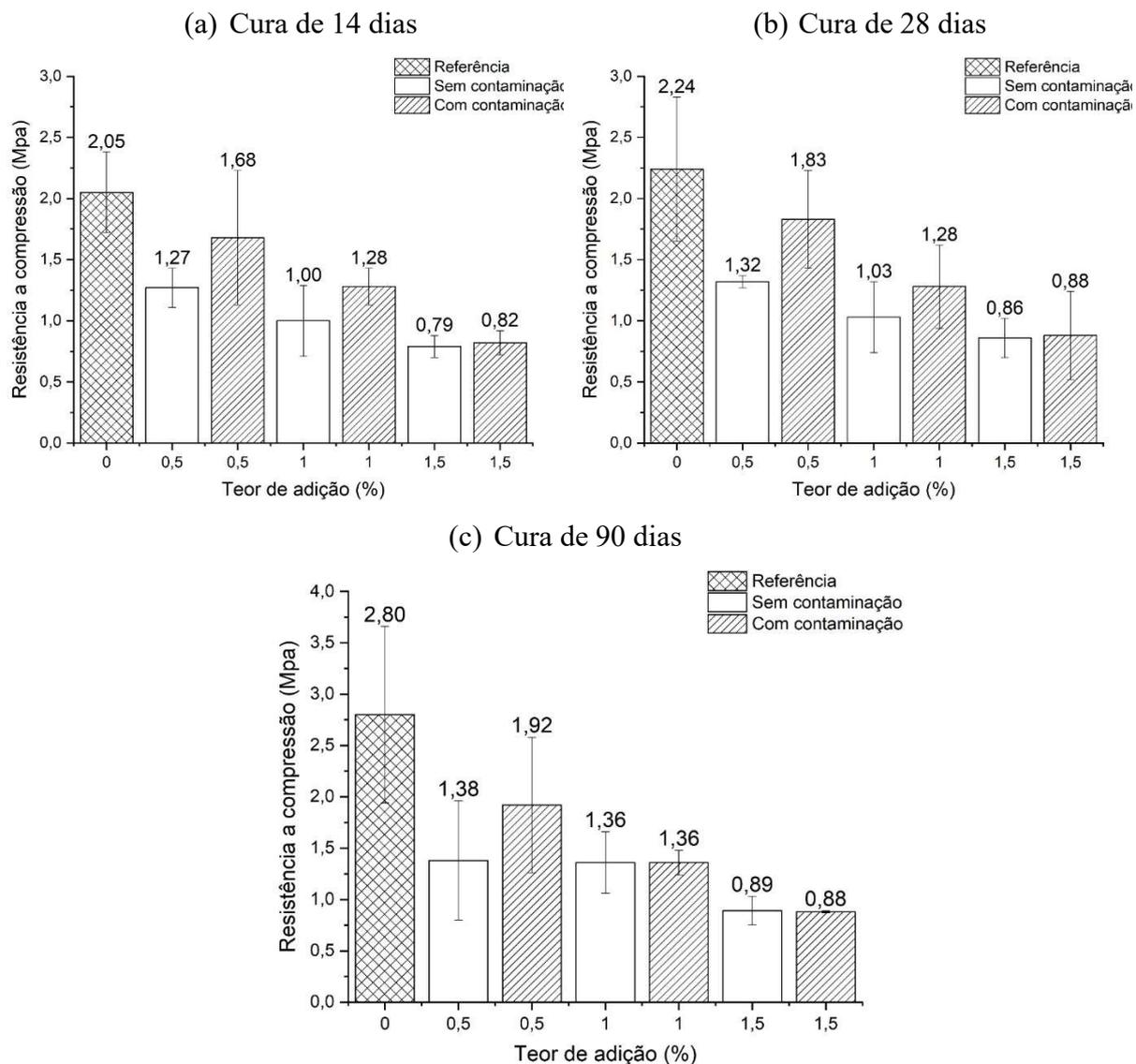


Figura 14: Resistência à compressão. a) Valores médios de resistência à compressão traço referência, traço 0,5%, Traço 1,0% e traço 1,5% aos 14 dias de cura; b) Valores médios de resistência à compressão traço referência, traço 0,5%, Traço 1,0% e traço 1,5% aos 28 dias de cura. c) Valores médios de resistência à compressão traço referência, traço 0,5%, Traço 1,0% e traço 1,5% aos 90 dias de cura.

Fonte: Do autor

Os resultados dos ensaios mecânicos demonstram que há uma tendência de diminuição das resistências à compressão conforme aumenta o teor de fibras na argamassa. Este comportamento é esperado, devido à baixa resistência mecânica da fibra em comparação com os agregados e maior porosidade da argamassa (SANTOS; CARVALHO, 2011). A redução destas resistências também pode ser explicada devido à dispersão das fibras, que conforme o

teor aumenta, há um acréscimo de regiões nos corpos de prova com concentração de fibras, ocasionado pela dispersão inadequada das mesmas (MARTINS; SOARES, 2016).

6.2 Ensaios físicos

Nas Figuras 15, 16 e 17 estão apresentados os valores médios da absorção de água aparente, densidade aparente e porosidade aparente das argamassas aos 90 dias de cura, para cada um dos traços com embalagens com e sem contaminação por cimento.

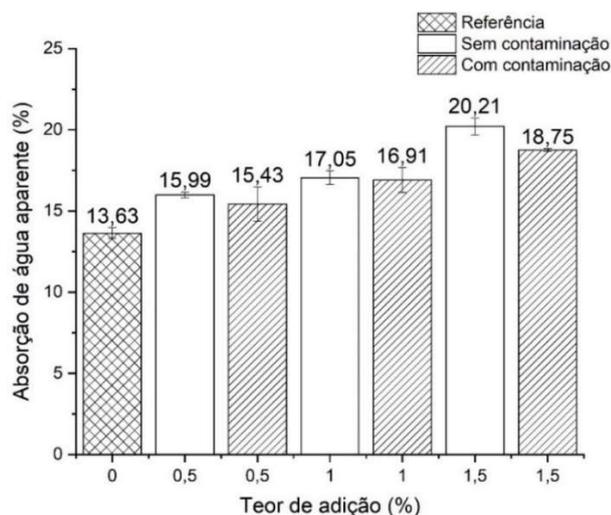


Figura 15: Absorção de água aparente para argamassas com teores de adição de fibra de 0%, 0,5%, 1,0% e 1,5% aos 90 dias de cura

Fonte: Do autor

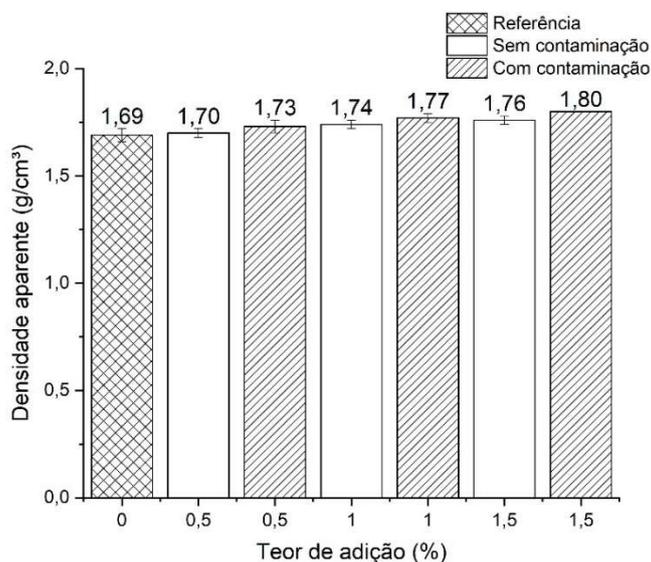


Figura 16: Densidade aparente para argamassas com teores de adição de fibra de 0%, 0,5%, 1,0% e 1,5% aos 90 dias de cura

Fonte: Do autor

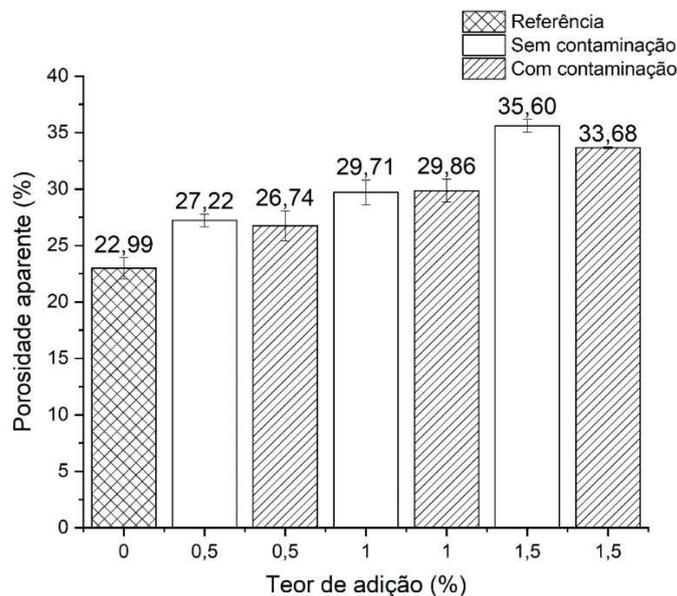


Figura 17: Porosidade aparente para argamassas com teores de adição de fibra de 0%, 0,5%, 1,0% e 1,5% aos 90 dias de cura

Fonte: Do autor

Para absorção de água aparente, assim como ocorreu na resistência à compressão dos corpos de prova de argamassa, foi perceptível a interferência do incremento de fibra kraft. Neste caso, quanto maior o teor de fibra empregado, maior foi a absorção de água dos moldes avaliados, variando de 13,63 % a 20,21%. Os moldes de referência e os moldes com adição de fibra kraft no teor de 0,5% atenderam aos requisitos normativos para os valores de absorção, logo esse fato demonstra a possibilidade de utilização das fibras frente a essa propriedade.

A porosidade aparente e densidade aparente também aumentaram de acordo com incremento de teor de fibra empregado, variando de 22,99% a 35,60% para a porosidade e 1,69 g/cm³ a 1,80 g/cm³ para a densidade aparente.

6.3 Caracterização microestrutural (MEV)

A figura 18 apresenta o resultado do ensaio de caracterização microestrutural executado com a fibra kraft proveniente de embalagens de cimento com e sem contaminação.

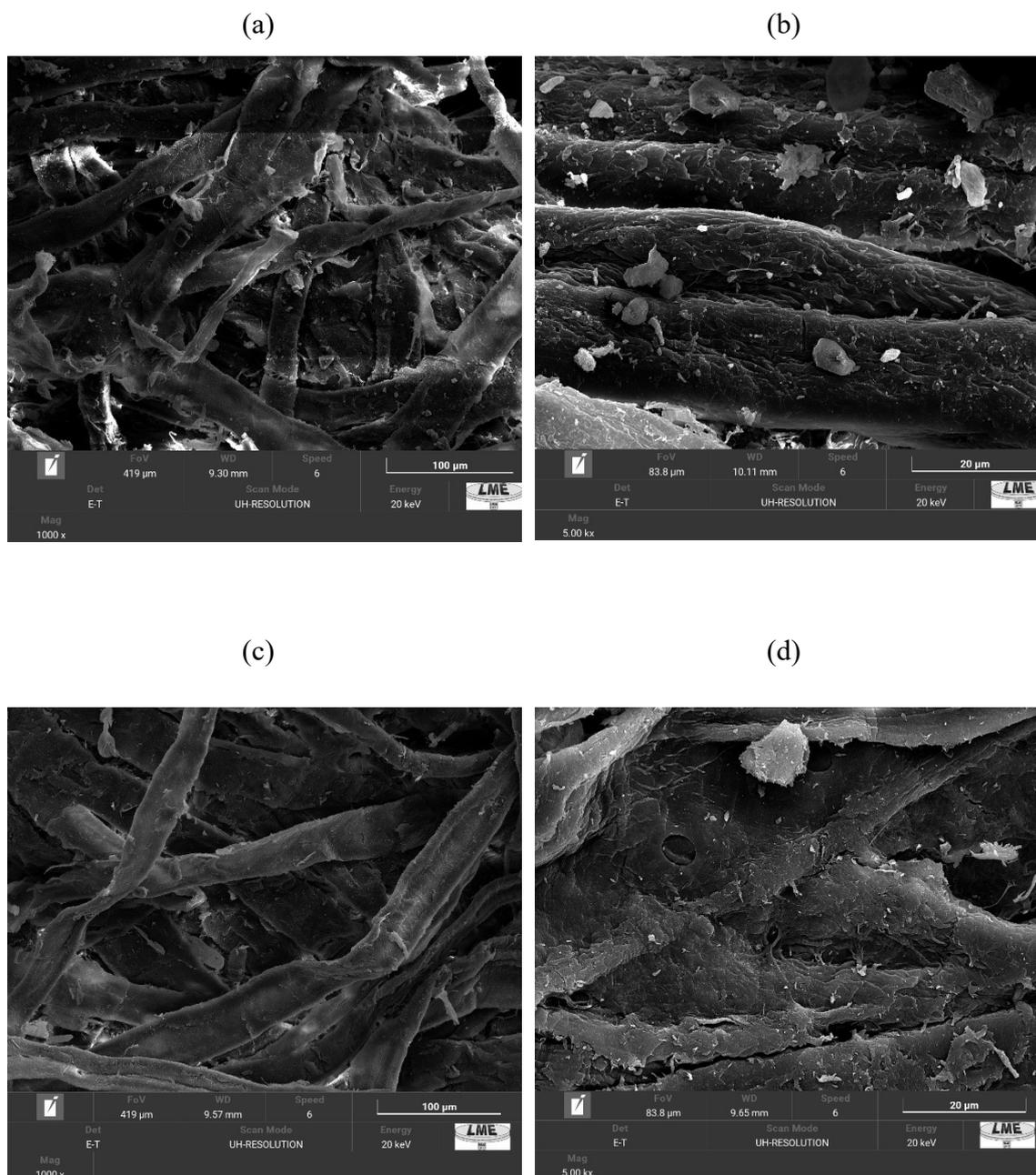
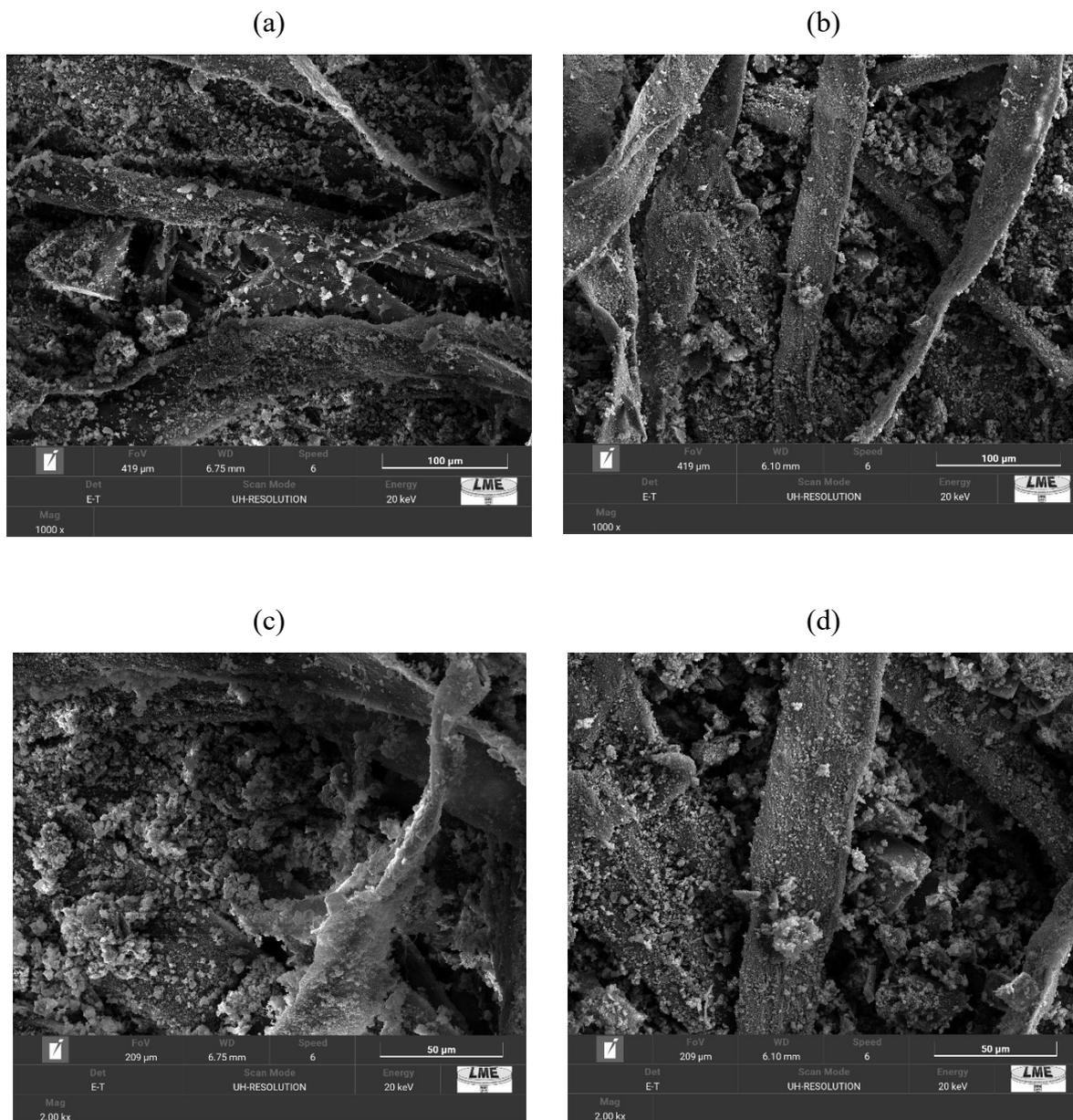


Figura 18: Micrografias das fibras: a) Fibra kraft contaminada com cimento (1000x); b) Fibra kraft contaminada com cimento (5.00kx); c) Fibra kraft sem contaminação (1000x); d) Fibra kraft sem contaminação (5.00kx)

Fonte: Do autor

A Figura 19 apresentam as micrografias do ensaio de caracterização microestrutural realizado para as argamassas compostas por 0,5% de fibras kraft provenientes de embalagens de concreto, com e sem contaminação por cimento.



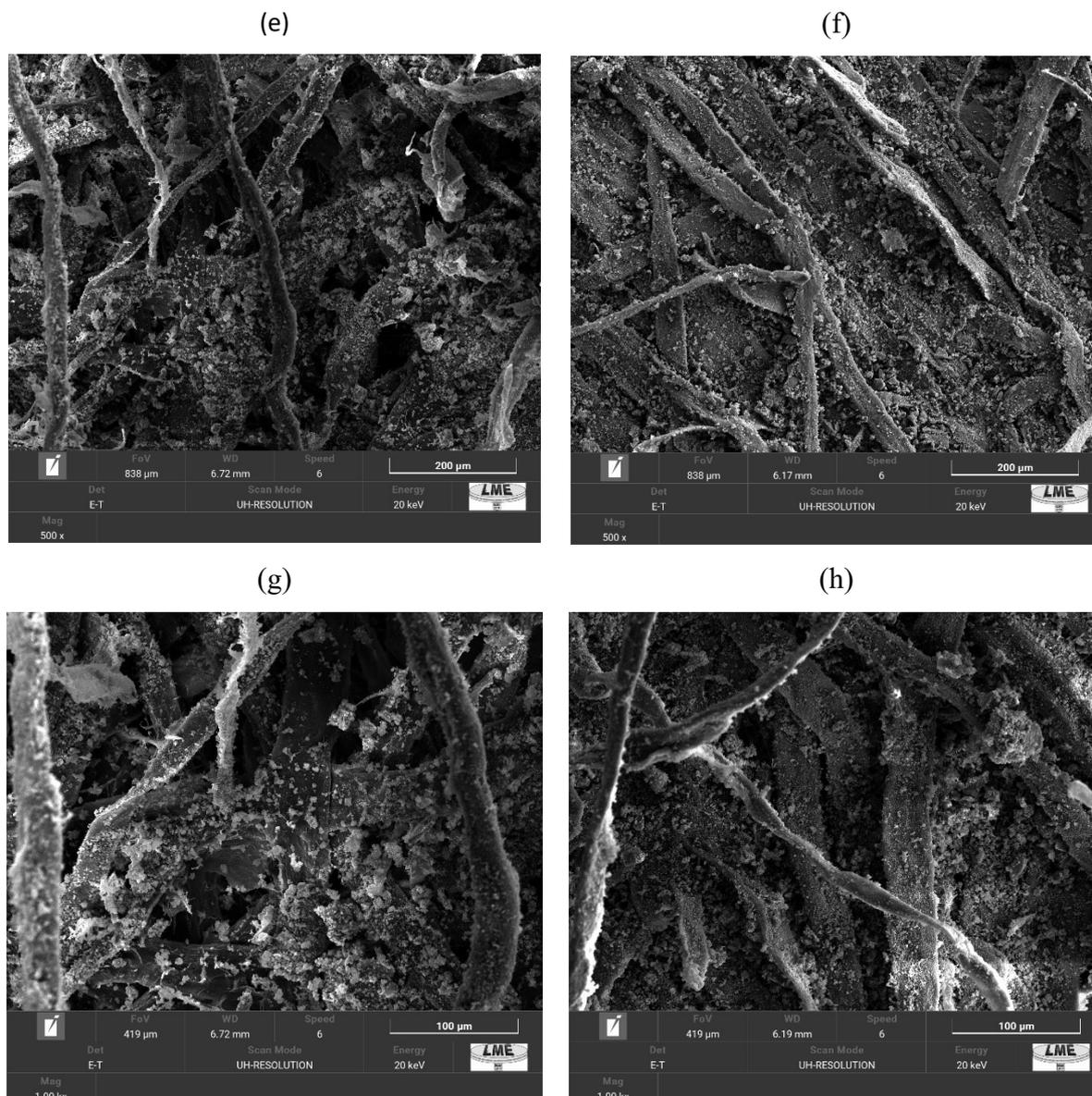


Figura 19: Micrografias da argamassa com 0,5% de fibra, região da fratura após ensaios mecânicos. a) Argamassa com fibra contaminada por cimento, resolução 1000x; b) Argamassa com fibra sem contaminação por cimento, resolução 1000x; c) Argamassa com fibra contaminada por cimento, resolução 2.00kx; d) Argamassa com fibra sem contaminação por cimento, resolução 2.00kx; e) Argamassa com fibra contaminada por cimento, resolução 500x; f) Argamassa com fibra sem contaminação por cimento, resolução 500x; g) Argamassa com fibra contaminada por cimento, resolução 1.00kx. h) Argamassa com fibra sem contaminação por cimento, resolução 1.00kx.

Fonte: Do autor

6.4 Calorimetria

Os resultados registrados no calorímetro permitiram traçar as curvas de temperatura produzida pelas reações no decorrer do tempo, conforme Figura 20, onde estão correlacionadas as curvas às pastas de cimento com 0% de fibra, 2% de fibra não contaminada e 2% de fibra contaminada.

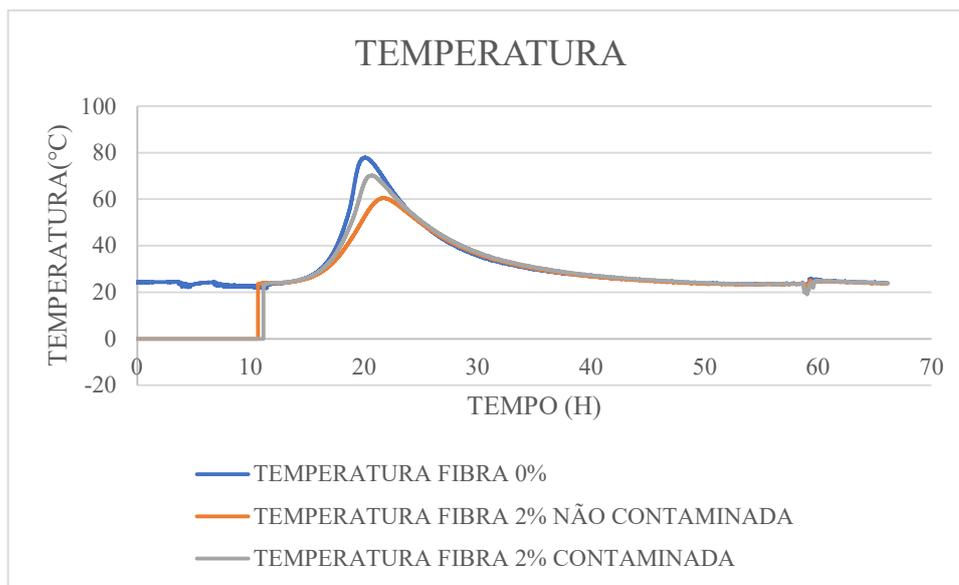


Figura 20: Curva de temperatura no decorrer do tempo proveniente do ensaio de calorimetria

Fonte: Do autor

Com base no gráfico da Figura 20, pode-se observar comportamentos semelhantes nas curvas de evolução da elevação de temperatura para cada tipo de pasta, ou seja, as fibras geraram interferências mínimas na hidratação do cimento.

6.5 Aplicação de argamassa de revestimento

O acompanhamento durante as aplicações das argamassas de revestimento com traço de referência e traço com 0,5% de fibra kraft (contaminada), possibilitou a avaliação e comparação dos processos.

- a) Não houve prejuízo na trabalhabilidade da mistura com a presença da fibra;

- b) O tempo de execução do serviço foi o mesmo para os dois traços, ou seja, não houve dificuldade no processo de acabamento;
- c) O pedreiro designado para a aplicação não identificou dificuldade para realizar o sarrafeamento e desempenho durante as aplicações.

O trecho aplicação do traço de referência apresentou um maior número de fissuras em relação ao trecho com 0,5% de fibra. As Figuras 21 e 22 a seguir ilustram os revestimentos.



Figura 21: Aplicação de argamassa para reboco traço referência

Fonte: Do autor



Figura 22: Revestimento com argamassa com 5% fibras kraft

Fonte: Do autor

7. CONCLUSÃO

Pesquisas com o uso de materiais recicláveis vêm crescendo no país, devido a necessidade de se adequar à nova realidade, onde o uso de materiais sustentáveis deixou de ser um atributo e passou a se tornar uma necessidade. O papel Kraft proveniente das embalagens de cimento se enquadra nesta categoria, visto que ainda há poucas pesquisas relacionadas ao reaproveitamento deste material que é amplamente utilizado no Brasil. Até o momento, a valorização de resíduos de papelão e papel tem sido relativamente inexplorada com integração mínima para a construção civil.

As argamassas com fibras kraft são uma alternativa para a redução de impactos ambientais provocados pelo descarte incorreto de embalagens de cimento. Quanto maior a porcentagem de fibra adicionada, menor foi a resistência a compressão, maior a absorção de água e maior a porosidade aparente. A partir dos resultados analisados, é possível considerar que o traço com adição de 0,5% de fibras celulósicas de papel kraft de cimento Portland na produção de argamassas é satisfatória, principalmente quando se deseja dar uma destinação ambientalmente adequada para esse resíduo.

A argamassa com adição de fibra kraft possui maior resistência à fissuração em comparação com o traço referência.

Para mitigar a deterioração de fibras kraft em compósitos cimentícios, deve-se explorar vias de modificação de fibras e matrizes, para garantir que as propriedades mecânicas e de durabilidade do compósito sejam mantidas.

Conclui-se que a utilização das fibras de papel kraft, além de contribuírem significativamente para a redução de geração de resíduos da construção civil por meio da reutilização das sacarias, se mostra tecnicamente viável e até pode ser considerada como elemento implementador das propriedades da argamassa.

REFERÊNCIAS

- AKHAVAN, A.; CATCHMARK, J.; RAJABIPOUR, F. Ductility enhancement of autoclaved cellulose fiber reinforced cement boards manufactured using a laboratory method simulating the Hatschek process. *Construction and Building Materials*, v. 135, p. 251–259, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.001>>.
- ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; TOLEDO FILHO, R. D. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. In *Construction and Building Materials*. Vol. 79, pp. 115–128, 2015 Elsevier Ltd. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035>
- ASHORI, A.; TABARSA, T.; VALIZADEH, I. Fiber reinforced cement boards made from recycled newsprint paper. *Materials Science and Engineering A*, v. 528, n. 25–26, p. 7801–7804, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2011.07.005>>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Cimento: Diferentes tipos e aplicações. São Paulo, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.
- BANYHUSSAN, Q. S. *et al.* Deflection-hardening hybrid fiber reinforced concrete: The effect of aggregate content. *Construction and Building Materials*, v. 125, p. 41–52, 2016.
- BISPO DOS SANTOS, I. *et al.* Adobe Soil-Lime Bricks Reinforced with Kraft Paper Fibers. *International Journal of Materials Engineering*, v. 8, n. 5, p. 128–133, 2018.
- BOOYA, E. *et al.* Durability of cementitious materials reinforced with various Kraft pulp fibers. *Construction and Building Materials*, v. 191, p. 1191–1200, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.139>>.
- CHEN, Z. *et al.* Recycling and reuse of construction and demolition waste in concrete-filled steel tubes: A review. *Construction and Building Materials*, v. 126, p. 641–660, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.063>>.
- CINTRA, C. L. D.; PAIVA, A. E. M.; BALDO, J. B. Argamassas de revestimento para alvenaria contendo vermiculita expandida e agregados de borracha reciclada de pneus: propriedades relevantes. *Cerâmica*, São Paulo, v. 60, n. 353, p. 69-76, mar. 2014
- CONAMA. Diretrizes, critérios e procedimentos para gestão dos resíduos da construção civil. p. 396–401, 2001.
- COUTTS, R. S. P. Wastepaper fibres in cement products. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, v. 11, n. 3, p. 143–147, 1989.
- DA GLORIA, M. Y. R.; ANDREOLA, V. M.; DOS SANTOS, D. O. J.; PEPE, M.; TOLEDO FILHO, R. D. A comprehensive approach for designing workable bio-based cementitious

composites. *Journal of Building Engineering*, 34, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101696>.

DE CASTRO SALES, D.; CABRAL, A. E.; MEDEIROS, M. S. Development of fiberboard panels manufactured from reclaimed cement bags. *Journal of Building Engineering*, v. 34, p. 101525, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101525>.

DOS REIS, J. M. L.; CARDOSO, J. L.; FERREIRA E CASTRO, P. Mechanical properties of recycled kraft paper residue polyester composites. *Materials Research*, v. 17, n. 4, p. 888–892, 2014.

FERREIRA, S. R. *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. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.004>.

FERREIRA, S. R. Influência da hornificação na aderência fibra-matriz e no comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal. p. 129, 2012.

FORTUNATI, E.; KENNY, J. M.; TORRE, L. Lignocellulosic materials as reinforcements in sustainable packaging systems: Processing, properties, and applications. *Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy: Construction, Biomedical, and other Industrial Applications*, p. 87–102, 2019.

FRANCO DE CARVALHO, J. M. *et al.* More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials. *Construction and Building Materials*, v. 206, p. 397–409, 2019.

HAIGH, R. *et al.* A review of the mechanical and durability performance of kraft-fibre reinforced mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, v. 297, p. 123759, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123759>.

JÚNIOR CARVALHO MACHADO, P. *et al.* Characterization and properties of cementitious composites with cellulose fiber, silica fume and latex. *Construction and Building Materials*, v. 257, 2020.

KHAN, M. N. N.; SAHA, A. K.; SARKER, P. K. Reuse of waste glass as a supplementary binder and aggregate for sustainable cement-based construction materials: A review. *Journal of Building Engineering*, v. 28, p. 101052, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101052>.

KHORAMI, M.; GANJIAN, E. The effect of limestone powder, silica fume and fibre content on flexural behaviour of cement composite reinforced by waste Kraft pulp. *Construction and Building Materials*, v. 46, p. 142–149, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.099>.

MÁRMOL, G. *et al.* Mechanical and physical performance of low alkalinity cementitious composites reinforced with recycled cellulosic fibres pulp from cement kraft bags. *Industrial Crops and Products*, v. 49, p. 422–427, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.04.051>.

- MARTÍNEZ-LAGE, I. *et al.* Concretes and mortars with waste paper industry: Biomass ash and dregs. *Journal of Environmental Management*, v. 181, p. 863–873, 2016.
- OJO, E. B. *et al.* Effects of fibre reinforcements on properties of extruded alkali activated earthen building materials. *Construction and Building Materials*, v. 227, p. 116778, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116778>>.
- OLIVEIRA SCHWEIG, E. *et al.* Adobe Soil-Cement Bricks Reinforced with Recycled Kraft Paper Fibers. *International Journal of Materials Engineering*, v. 8, n. 5, p. 101–108, 2018.
- PAKRAVAN, H. R.; OZBAKKALOGLU, T. Synthetic fibers for cementitious composites: A critical and in-depth review of recent advances. *Construction and Building Materials*, v. 207, p. 491–518, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.078>>.
- PAVASARS, I. *et al.* Alkaline Degradation of Cellulose: Mechanisms and Kinetics. *Journal of Polymers and the Environment*, v. 11, n. 2, p. 39–47, 2003.
- PRAMBAUER, M.; VORONYCH, O.; BURGSTALLER, C. Influence of the process method on the properties of paper-fiber-reinforced composites. *Materials Today: Proceedings*, v. 31, n. xxxx, p. S236–S241, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.231>>.
- ROSTAMI, R. *et al.* A review on performance of polyester fibers in alkaline and cementitious composites environments. *Construction and Building Materials*, v. 241, p. 117998, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.117998>>.
- ZUKOWSKI, B.; DOS SANTOS, E. R. F.; DOS SANTOS MENDONÇA, Y. G.; DE ANDRADE SILVA, F.; TOLEDO FILHO, R. D. The durability of SHCC with alkali treated curaua fiber exposed to natural weathering. *Cement and Concrete Composites*, 94, 116–125, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.09.002>.