



JÚLIO GABRIEL TRINDADE DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM RESÍDUOS DE
CÉDULAS BRASILEIRAS**

**LAVRAS – MG
2024**

JÚLIO GABRIEL TRINDADE DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS
REFORÇADOS COM RESÍDUOS DE CÉDULAS BRASILEIRAS**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Lavras, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Ambiental, área de concentração em
Materiais e Meio Ambiente para a
obtenção do título de Mestre.

Profa. Dra. Camila Silva Brey Gil
Orientadora

Prof. Dr. Saulo Rocha Ferreira
Coorientador

**LAVRAS – MG
2024**

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

Oliveira, Júlio Gabriel Trindade de.

Avaliação física e mecânica de compósitos cimentícios
reforçados com resíduos de cédulas brasileiras / Júlio Gabriel
Trindade de Oliveira. - 2024.

59 p. : il.

Orientador(a): Camila Silva Brey Gil.

Coorientador(a): Saulo Rocha Ferreira.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Fibra de celulose. 2. Reaproveitamento de resíduos. 3.
Sustentabilidade na construção. I. Gil, Camila Silva Brey. II.
Ferreira, Saulo Rocha. III. Título.

JÚLIO GABRIEL TRINDADE DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS
REFORÇADOS COM RESÍDUOS DE CÉDULAS BRASILEIRAS**

**PHYSICAL AND MECHANICAL EVALUATION OF CEMENTITIOUS
COMPOSITES REINFORCED WITH WASTE BRAZILIAN BANKNOTES**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Lavras, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Ambiental, área de concentração em
Materiais e Meio Ambiente para a
obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 18 de março de 2024.

Dr. RODOLFO GIACOMIM MENDES DE ANDRADE - IFES

Dr. M'HAMED YASSIN RAJIV DA GLORIA - UFRJ

Dr. GUSTAVO HENRIQUE DENZIN TONOLI - UFLA

Profa. Dra. Camila Silva Brey Gil
Orientadora

Prof. Dr. Saulo Rocha Ferreira
Coorientador

**LAVRAS – MG
2024**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me permitir concluir mais um ciclo.

À Universidade Federal de Lavras, por ser a instituição onde vivenciei a minha experiência acadêmica.

Aos meus orientadores, Dra. Camila Silva Brey Gil e Dr. Saulo Rocha Ferreira pelo acompanhamento, incentivo, ensinamentos e realizações de análises.

A FAPEMIG, pela auxílio na execução do projeto.

Aos membros da banca que dispuseram de tempo e dedicação para melhorias no meu trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, pela oportunidade do aprendizado e crescimento acadêmico/ profissional.

A todos os meus amigos e familiares que me motivaram e me ajudaram de forma direta ou indireta durante a realização deste trabalho.

RESUMO

Diante da elevada preocupação com os fatores relacionados à sustentabilidade e proteção ambiental, observamos o crescimento de trabalhos que tem por finalidade o reaproveitamento de resíduos, oriundos de diferentes ciclos de produção. Sendo que, o reaproveitamento desses resíduos pode muitas vezes retornar para o ciclo de produção, ou ainda, serem utilizados no desenvolvimento e melhorias de outros materiais. Neste seguimento, o presente trabalho tem como intuito a confecção de um compósito cimentício a partir do reaproveitamento de resíduos de papel moeda, que será aplicado em uma matriz cimentícia. Principalmente por se tratar de um mecanismo voltado a diminuição dos resíduos sólidos e a redução dos impactos ambientais provenientes destes. Para realizar o estudo foram confeccionados corpos de provas de matriz cimentícia com e sem a adição de papel moeda. Os materiais preparados foram caracterizados por testes de compressão, flexão e absorção de água, para se obter uma eficiente análise de propriedades físicas e mecânicas. A comprovação da viabilidade no uso de resíduos de papel moeda na matriz cimentícia, representa elevada importância no atual cenário. Isso porque, espera-se uma economia de produção para futuros materiais aplicados em edificações. Além de ser capaz de proporcionar estratégias que visam a redução do volume dos resíduos e, conseqüentemente, uma redução dos impactos socioambientais causados por estes.

Palavras – chave: Fibra de celulose; Reaproveitamento de resíduos; sustentabilidade na construção

ABSTRACT

Given the high concern for factors related to sustainability and environmental protection, we have witnessed the growth of efforts aimed at the reuse of waste from different production cycles. The reuse of these residues can often return to the production cycle or be used in the development and improvement of other materials. In this context, the present work aims to produce a cementitious composite using recycled paper currency waste, which will be applied in a cement matrix. This is primarily a mechanism focused on reducing solid waste and mitigating the environmental impacts associated with it. To conduct the study, cement matrix specimens were prepared with and without the addition of paper currency. The prepared materials were characterized through compression, tension, and water absorption tests to obtain an effective analysis of physical and mechanical properties. The confirmation of the feasibility of using paper currency waste in the cement matrix holds significant importance in the current scenario. This is because it is expected to lead to production cost savings for future materials used in constructions. Moreover, it has the potential to provide strategies aimed at reducing the volume of waste and, consequently, mitigating the socio-environmental impacts caused by them.

Key – words: Cellulose fiber; Waste reuse; Sustainability in construction

INDICADORES DE IMPACTO

O presente trabalho visa avaliar os compósitos cimentícios reforçados com resíduos de cédulas brasileiras, com o intuito de agregar melhoria e inovação aos métodos construtivos. Visto que, com a industrialização, é notável o aumento da geração de resíduos e o manejo incorreto de produtos, como apresentado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), que mostrou que no Brasil, no ano de 2020 foram gerados aproximadamente 82,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos. Ainda, no mesmo seguimento, segundo o Banco Central do Brasil, no ano de 2017 aproximadamente 800 toneladas de notas foram descartadas, que impactam no aumento de geração de resíduos em aterros, sendo influência para vetores de doenças e até mesmo problemas de saúde a indivíduos que sobrevivem da catação de lixo em aterros e lixões. Dito isso, o referido trabalho tem o objetivo de agregar os resíduos de papel moeda a matriz cimentícia com o intuito de auxiliar a redução da quantidade de resíduos descartados de forma inadequada e desta forma contribuir para a saúde dos indivíduos.

IMPACT INDICATORS

The present study aims to evaluate cementitious composites reinforced with Brazilian currency waste, aiming to enhance and innovate construction methods. Considering industrialization, there is a notable increase in waste generation and improper handling of products, as presented by the Brazilian Association of Public Cleaning Companies and Special Waste (ABRELPE), which showed that in Brazil, approximately 82.5 million tons of urban solid waste were generated in 2020. Furthermore, in the same vein, according to the Central Bank of Brazil, approximately 800 tons of banknotes were discarded in 2017, impacting the increase in waste generation in landfills, influencing disease vectors and even health problems for individuals who survive by scavenging waste in landfills and dumpsites. With that said, the aforementioned study aims to incorporate currency paper waste into the cementitious matrix to help reduce the quantity of improperly discarded waste and thus contribute to individuals' health.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	11
1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1 Objetivos Gerais	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3. REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1 Resíduos Sólidos, papel moeda e o impacto ambiental	15
3.2 Papel moeda brasileiro	16
3.2.1 Reutilização do papel moeda brasileiro	17
3.3 Fibrocimento	18
3.4 Materiais Compósitos	19
3.4.1 Conceituação	19
3.4.2 Matriz de um compósito	20
3.4.3 Elemento de reforço	20
3.4.4 Interação entre matriz e elemento de reforço	21
3.4.5 Compósitos cimentícios reforçados com fibras celulósicas	21
REFERÊNCIAS	23
SEGUNDA PARTE – ARTIGO	28
1. INTRODUÇÃO	31
2. MATERIAIS E MÉTODOS	32
2.1 Materiais	32
2.2 Caracterização do papel moeda	32
2.2.1 Extrativos Totais	32
2.2.2 Lignina	33
2.2.3 Holocelulose	33
2.2.4 Celulose	34
2.2.5 Hemicelulose	34
2.2.6 Teor de Cinzas	34
2.3 Absorção e dessorção de água do papel moeda	35
2.4 Fluorescência de raio X (FRX)	36
2.5 Produção das argamassas	36
2.6 Análise Microestrutural (MEV)	36
2.7 Ensaio de Calorimetria	37

2.8	Caracterização física das argamassa	38
2.8.1	Absorção total, índice de vazios e massa específica	38
2.9	Caracterização mecânica das argamassas	39
2.9.1	Ensaio de resistência à compressão	39
2.9.2	Ensaio de resistência à tração na flexão (três pontos).....	39
3.	RESULTADO E DISCUSSÃO	39
3.1	Caracterização do papel moeda	39
3.1.1	Análise química	39
3.1.2	Absorção e dessorção do papel moeda	41
3.2	Fluorescência de raio X (FRX).....	42
3.3	Análise microestrutural da interface fibra – matriz	43
3.4	Calorimetria.....	46
3.5	Influência da adição de fibras nas propriedades físicas dos compósitos .	48
3.6	Comportamento mecânico dos compósitos	50
3.6.1	Resistência à compressão	50
3.6.2	Resistência à flexão	53
4	CONCLUSÃO	56
	REFERÊNCIAS.....	57

PRIMEIRA PARTE

1. INTRODUÇÃO

Devido a elevada industrialização mundial nas últimas décadas, torna-se cada vez mais recorrente pesquisas versadas em temas referentes à preocupação com a vitalidade do meio ambiente, englobando a elevada geração de resíduos e o manejo incorreto do descarte desses produtos. Segundo os dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), no Brasil, no ano de 2020 foram gerados aproximadamente 82,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos. Além disso, segundo a associação, o Brasil é um país em curva ascendente na geração de resíduos (ABRELPE, 2021).

Nesse contexto, a Casa da Moeda do Brasil, traz em seu relatório de sustentabilidade referente aos anos de 2015 e 2016, que desde o ano de 2015, houve uma redução no envio dos resíduos de papel moeda para aterros, sendo esses co processados, descartados de maneira ambientalmente adequada. Entretanto, mesmo que os números tenham sido menores nos últimos anos, ainda se observa o envio de resíduos de papel moeda para aterros. Tais resíduos são provenientes de cédulas que não devem mais estar em circulação e são recolhidas, como por exemplo, cédulas rasgadas, sujas, com tinta fraca e/ou riscadas.

Deste modo, na tentativa de reduzir o descarte incorreto de resíduos no ambiente, uma alternativa seria o reaproveitamento de papéis moeda pela sua incorporação em outros materiais, gerando assim, materiais compósitos. Um exemplo que podemos ressaltar é a utilização de resíduos de papel moeda em compósitos de polietileno de baixa densidade (GIL *et al.*, 2019). As referidas cédulas brasileiras são feitas de fibras de celulose de alta qualidade, resinas e outros componentes (GARCEZ, 2013).

Ao pensarmos em materiais compósitos, podemos também exemplificar aqueles que utilizam como base matrizes cimentícias, que é um composto formado basicamente por cimento, água e agregados. Além disso, tal composto é base para os concretos utilizados na construção civil, que apresentam relativamente alta resistência a compressão, no entanto, não demonstra elevada capacidade de deformação e flexão (CARVALHO *et al.*, 2018).

Considerando que as matrizes cimentícias apresentam baixa resistência à tração, por causa da fissuração que ocorre de maneira nanométrica, influenciando negativamente na durabilidade do material, uma vez que facilitam a entrada de substâncias agressivas no interior da referida matriz. Estudos mostram que a adição de fibras nas matrizes cimentícias, influenciam positivamente no controle da fissuração, apresentando melhorias em propriedades de resistência, deformabilidade e tenacidade (CZOVNY, 2021). Desta maneira, melhorias na resistência à flexão e tenacidade foram obtidas, ao adicionar fibras de basalto em argamassas a base de cimento (IORIO et al., 2021), o mesmo foi encontrado por (AZEVEDO et al., 2020) ao adicionar fibras de curauá como reforço de argamassas.

Dessa forma, este trabalho propõe como uma solução possível para a redução do descarte indevido de resíduos no meio ambiente, o reaproveitamento dos resíduos de cédulas de papel moeda, através de sua incorporação em matrizes cimentícias. Além disso, foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos cimentícios reforçados com resíduos de papel moeda.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Avaliar o comportamento físico e mecânico dos compósitos cimentícios reforçados com os resíduos da cédula brasileira.

2.2 Objetivos Específicos

- Influência da granulometria nas propriedades dos compósitos;
- Caracterização dos resíduos de papel moeda e avaliação do grau de compatibilidade com matrizes a base de cimento;
- Entender o teor ótimo de adição ou substituição dos resíduos em matrizes à base de cimento, bem como sua influência em propriedades no estado fresco;
- Avaliar e comparar as características físico e mecânicas dos compósitos cimentícios com e sem adição dos resíduos das cédulas brasileiras.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Resíduos Sólidos, papel moeda e o impacto ambiental

A elevada geração de resíduos sólidos (RS) pelos indivíduos ou grupos, torna – se um problema ambiental. Visto que, a geração descontrolada do mesmo é foco de grandes problemas públicos, como o aumento do número de vetores de doenças, por exemplo.

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

A classificação dos resíduos sólidos é assim identificada pela NBR 10004 (ABNT, 2004) e definida segundo a origem pela Lei Nacional dos Resíduos Sólidos (12305 / 2010) como os resíduos domiciliares, industriais, de serviços de saúde, serviços de transporte e resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços.

Neste sentido, ao pensarmos nos RS podemos identificar inúmeros tipos de resíduos produzidos e descartados pela sociedade. Assim podemos englobar o papel moeda, utilizado pela maioria da população.

O papel moeda brasileiro que é produzido pelo Banco Central do Brasil (BACEN), além de ser responsável pela emissão das cédulas, também é responsável pelo saneamento do meio circulante, com o intuito de manter o dinheiro em boas condições de uso. Deste modo, segundo (BACEN, 2022) têm – se estimado um total de 3,21 bilhões de cédulas em circulação. Ainda segundo o Banco Central as cédulas tem uma vida útil estimada de 14 a 36 meses.

Sendo assim, o papel moeda pode ser considerado como um resíduo sólido devido ao seu elevado descarte como já supracitado. Ainda este pode ser classificado como resíduo Classe II A, não perigoso, não inerte, com metais pesados na constituição, visto que, o papel apresenta tinta utilizada na impressão.

3.2 Papel moeda brasileiro

O papel moeda brasileiro produzido pelo Banco Central do Brasil, segundo a Carta Circular 3235 de 2006 e a Carta Circular 3373 de 2009 disponibilizadas pelo banco, devem ser retiradas de circulação as cédulas manchadas, sujas, desfiguradas, gastas ou fragmentadas; com marcas, rabiscos, símbolos, desenhos ou quaisquer caracteres a elas estranhos; com cortes ou rasgos em suas bordas ou interior; queimadas ou danificadas por ação de líquidos, agentes químicos ou explosivos, já que, estas não apresentam valor na utilização (Banco Central do Brasil, 2022). Segundo o Banco Central do Brasil, no ano de 2017 aproximadamente 800 toneladas de notas foram descartadas, sendo que grande parte são trituradas e enviadas para aterros sanitários, contribuindo deste modo, para o aumento da geração de resíduos.

A elevada geração de resíduos sólidos (RS) pelos indivíduos ou grupos, torna - se um problema ambiental. Visto que, a geração descontrolada do mesmo é foco de grandes problemas públicos referentes a poluição do solo, hídrica, visual além de auxiliar para o aumento do número de vetores de doenças.

Assim sendo, a classificação dos resíduos sólidos é identificada pela NBR10004 (ABNT, 2004) é definida segundo a origem pela Lei Nacional dos Resíduos Sólidos (12305 / 2010) como os resíduos domiciliares, industriais, de serviços de saúde, serviços de transporte e resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços.

Neste sentido, ao pensarmos nos RS podemos identificar inúmeros tipos de resíduos produzidos e descartados pela sociedade. Assim podemos englobar o papel moeda, utilizado pela maioria da população, que pode ser classificado como resíduo Classe II A, não perigoso, não inerte, com metais pesados na constituição, presentes na tinta que é utilizada na impressão.

O papel moeda, ainda apresenta informações escassas quando se trata da sua caracterização e composição, visto que, por segurança, tais informações são mantidas em sigilo, com o intuito de evitar a falsificação do mesmo. No entanto, sabe-se que para a produção do papel é utilizada celulose e um conjunto de misturas de fibras ao se pensar na qualidade do material. Em que para a sua fabricação é possível que haja a utilização de fibras de pinus

e eucalipto, além de fibras de algodão que podem influenciar no aumento de propriedades de resistência do papel, por exemplo (CUNICO et al., 2021).

A utilização da fibra de algodão na composição do papel parte do pressuposto da obtenção de resistência, já que, tal fibra é utilizada na indústria papelreira com o intuito de obter elevadas resistências em papéis especiais (FONSECA, 2005). Além da composição majoritária do papel moeda que é a celulose, devemos também considerar a sua impressão. Assim sendo, a caracterização utilizando a espectrometria por fluorescência de raios X, feita por (SANTOS, 2014), evidencia que na composição do material há uma presença majoritária de titânio (Ti), que pode ser explicada devido ao fato de que, tal elemento, é um dos mais utilizadas para obtenção de pigmento branco, além de ter um custo baixo (SALEIRO, 2010).

3.2.1 Reutilização do papel moeda brasileiro

De acordo com Banco Central do Brasil (BACEN/DF) apud GARCEZ et al. (2013) a aplicação e reaproveitamento do papel moeda teve início em meados de 1993, utilizando o dinheiro retirado em circulação com o intuito de aumentar e propagar a coleta seletiva no Banco Central do Brasil.

Ainda segundo os autores GARCEZ et al. (2013) “o desenvolvimento de tecnologias para reaproveitar as fibras do papel moeda é realizado desde 1996 pela Universidade de Brasília por meio da quebra da resina à base de formol-melanina presente no material, sendo que tal resina é aplicada para tornar as células hidrofóbicas, aumentando a resistência a água.” Tal iniciativa teve o objetivo de disponibilizar alternativas para obtenção de polpa celulósica a partir da reciclagem do papel moeda. Além disso, uma das diversas alternativas para o uso dos resíduos de papel moeda é a sua utilização na indústria papelreira, visto que, estudos termomecânicos mostram que a polpa do papel apresenta qualidades satisfatórias na aplicação do mesmo (GARCEZ, 2013).

Alguns estudos também avaliaram a utilização do papel moeda em compósitos, como tijolos, por exemplo. No estudo realizado por VALADÃO (2017) foram obtidos resultados satisfatórios para resistência, dentro dos limites normativos recomendados da NBR10834, para os tijolos acrescidos de fibras do papel moeda brasileiro.

Ainda, uma das alternativas para reaproveitamento desses resíduos é a sua utilização no preparo de materiais compósitos de matriz polimérica. Como realizado por Gil e colaboradores (2019), que adicionaram o resíduo de papel moeda a matrizes de polietileno de baixa densidade. O compósito do referido trabalho apresentou melhorias na resistência à tração e ao módulo de Young, sem a necessidade de modificação da superfície das fibras ou adição de aditivos compatibilizantes.

3.3 Fibrocimento

O fibrocimento é um material de destaque na construção civil devido às suas notáveis propriedades mecânicas e durabilidade. Conforme destacado por SOUZA (2014), o fibrocimento é formado por uma matriz de cimento reforçada com fibras sintéticas ou naturais, o que resulta em um material robusto, durável e versátil. Essa composição confere ao fibrocimento uma série de vantagens, tornando-o uma escolha popular para diversas aplicações na construção.

Uma das principais aplicações do fibrocimento é na fabricação de telhas. Segundo FLACH (2012), as telhas de fibrocimento são amplamente utilizadas em coberturas de edifícios residenciais, comerciais e industriais devido à sua durabilidade, resistência ao fogo e baixa manutenção. Além disso, os painéis de fibrocimento são frequentemente utilizados em fachadas de edifícios para proporcionar isolamento térmico e acústico.

A resistência mecânica do fibrocimento é uma característica importante desse material. De acordo com Rocha et al. (2022), o fibrocimento possui alta resistência mecânica, tornando-o adequado para diversas aplicações. Além disso, o fibrocimento é altamente resistente ao fogo, à água e à corrosão, tornando-o ideal para uso em uma variedade de ambientes e condições climáticas.

Do ponto de vista da sustentabilidade, o fibrocimento apresenta diversas vantagens. Segundo Balea et al. (2021), a longa vida útil do material reduz a necessidade de substituição frequente, diminuindo o desperdício de materiais e os custos associados à manutenção. Além disso, o processo de fabricação do fibrocimento consome menos energia em comparação com outros materiais de construção, resultando em menores emissões de carbono e menor impacto ambiental.

Em resumo, o fibrocimento é um material versátil, durável e sustentável que desempenha um papel importante na construção civil. Com suas excelentes propriedades mecânicas, resistência ao fogo e baixo impacto ambiental, o fibrocimento continuará a ser uma escolha popular para uma variedade de aplicações na construção civil.

3.4 Materiais Compósitos

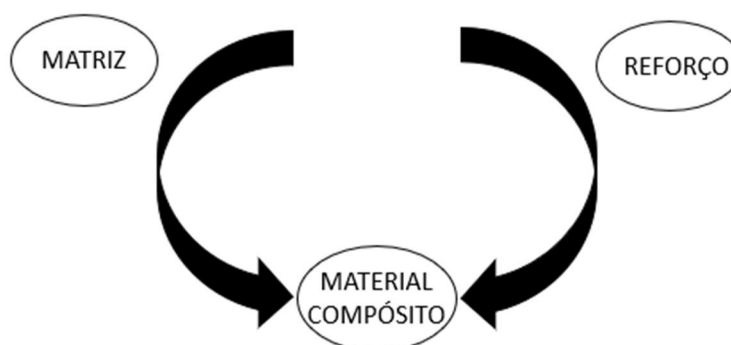
3.4.1 Conceituação

Um material compósito pode ser considerado como um material que permite um melhor aproveitamento de suas propriedades nas suas variadas combinações. Este processo de otimização pode liberar um projetista de restrições associadas a materiais convencionais e possibilitar soluções melhores e mais baratas (HARRIS, 1999)

Já (NIJSSEN, 2015) completa a definição ao determinar que um compósito é uma estrutura material que consiste em pelo menos dois elementos macroscopicamente identificáveis, possuindo materiais que trabalham juntos para alcançar um melhor resultado.

Deste modo, (CALLISTER, 2020) evidencia que as propriedades dos compósitos são influenciadas pelo tamanho, forma e distribuição das partículas que representam a fase dispersa (reforço), fase essa que é envolvida pela matriz (contínua), sendo tais fases insolúveis umas nas outras, conceito esse ilustradona (Figura 1).

Figura 1 - Representação da formação de um material compósito



Fonte: Autor, 2023

3.4.2 Matriz de um compósito

A matriz do material compósito é responsável por envolver e proteger o reforço aplicado, realizando deste modo a união entre os elementos e a distribuição dos esforços. A referida matriz funciona como um material coesivo e adesivo, com a finalidade primordial de manter a integridade do compósito, após a realização das ligações com a fase dispersa (OIKAWA, 2019).

Um material compósito geralmente costuma ter como matriz principalmente um material cimentício, polimérico ou metálico (ROLLO E FORTULLAN , 2015)

Para o presente estudo o foco são as matrizes cimentícias compostas por cimento, água, agregado miúdo e agregado graúdo, além de que, ainda podem ser utilizadas adições de aditivos químicos, com o intuito de otimizar as propriedades físicas e mecânicas, a depender do objetivo pretendido (CASTRO E PANDOLFELLI, 2009).

Deste modo, as referidas matrizes podem ter adicionadas na sua composição elementos como fibras, partículas, pigmentos e agregados especiais, podendo assim ser classificadas como compósitos (BASTOS, 2014).

3.4.3 Elemento de reforço

A utilização de estruturas de reforços em compósitos se baseia no princípio fundamental do melhoramento de propriedades funcionais como resistência mecânica, tenacidade, durabilidade entre outras.

Com o intuito de se obter o melhoramento de propriedades como as supracitadas, os compósitos podem ser reforçados com partículas, fibras, ser estrutural ou nano.

Deve - se lembrar que a aplicabilidade em termos de desempenho e comportamento das características finais observadas nos compósitos, em específico nos que são reforçados com fibras, se dá entre a adesão da matriz com a interface da fibra (reforço). Além de ser influenciado diretamente pelos processos de fabricação e tratamentos adicionais (FARUK etal., 2012).

3.4.4 Interação entre matriz e elemento de reforço

Um dos fatores de maior relevância nos materiais compósitos é a adesão entre a matriz e a fase de reforço. Sendo assim, MANO (2000, apud BERNARDI, 2003) diz que a relação de interface entre os elementos apresenta influência crucial sobre as características do conjunto, sendo tão importante quanto as características dos materiais utilizados.

Uma das principais funções da interface que deve ocorrer nos compósitos, para que seja possível a existência de um trabalho conjunto é a transferência de esforços entre o reforço e a matriz (BERNARDI, 2003) do desempenho dos compósitos, como a rigidez, ductilidade e propriedades de resistência mecânica, por exemplo, se dá pela adesão interfacial que eleva a eficiência da transferência de tensão ou deformação entre a matriz e o reforço (BIANCHI, 2020).

Ainda segundo (BERNARDI, 2003), a adesão pode ser mecânica ou físico - química. Sendo assim, a atração física entre os átomos da matriz e das fibras que estão sendo combinadas, por exemplo, pode influenciar e contribuir para uma maior adesão (FÉLIX, 2002).

3.4.5 Compósitos cimentícios reforçados com fibras celulósicas

Os materiais compósitos reforçados com fibras são amplamente utilizados, desde o início da civilização humana no Antigo Egito e Mesopotâmia, como por exemplo, na mistura de argila com palha na fabricação de tijolos de adobe (OIKAWA, 2019, p. 19 apud MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Sendo assim, a utilização das fibras de papel moeda na produção de compósitos cimentícios tem o intuito de adquirir melhorias nas propriedades físicas e mecânicas, além de reduzir o custo dos produtos finais (ASHORI; TABARSA; VALIZADEH, 2011).

No entanto, Machado e colaboradores (2020) abordam que a melhoria das propriedades físico - mecânicas dos compósitos a médio e longo prazo se trata de uma tarefa complexa e sistemática, sendo necessário considerar, por exemplo, uma interação entre fibras, matriz e método de processamento. Já que, para se obter melhorias deve ser levado em consideração e ter conhecimento primordial da dosagem, condições de cura e tipo de meio exposto, além do fator água-cimento.

Além disso, deve-se lembrar que o concreto é altamente alcalino e pode transmitir facilmente diferentes níveis de degradação às fibras. 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 (ROSTAMI *etal.*, 2020).

Ainda, o referido autor, traz que algumas fibras são suscetíveis à deterioração quando em contato com umidade, álcalis ou outros ingredientes demisturas químicas. A degradação química leva à rápida perda de resistência da fibra devido à alta alcalinidade dos compósitos à base de cimento. Assim, a compatibilidade química das fibras de reforço com o ambiente alcalino de compósitos cimentícios é enfatizado.

Sendo assim, a abordagem da reciclagem dos resíduos do papel moeda brasileiro é interessante como reforço nos compósitos cimentícios, entretanto, requer técnicas para processamento e consequente aplicação na fabricação. Considerando um potencial aumento da resistência à tração conferida pela fibra celulósica, sua incorporação em compósitos cimentícios pode tornar uma medida de melhoramento para o mesmo.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos do Brasil 2021**. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>. Acesso em: 27 de abril de 2022.

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 NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13279 - **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7215 - **Cimento Portland – determinação da resistência a compressão**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9778 - **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248 – **Agregados – determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro – RJ, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45 - **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro – RJ, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52 – Agregado miúdo - **Determinação de massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro – RJ, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: **Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 77 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10834: **Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

AZEVEDO, A.R.G.d.; KLYUEV, S.; MARVILA, M.T.; Vatin, N.; ALFIMOVA, N.; LIMA, T.E.S.d.; FEDIUK, R.; OLISOV, A. **Investigation of the Potential Use of Curauá Fiber for Reinforcing Mortars**. *Fibers* 2020, 8, 69.

Harris, B., **Engineering Composite Materials**, The Institute of Metals, London, 1999.

BACEN, 2022. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/cedulasemoedas/cedulasinadequadas>. Acesso em: 02 de junho de 2022.

BALEA, A.; FUENTE, E.; MONTE, M.C.; BLANCO, A.; NEGRO, C. **Recycled Fibers for Sustainable Hybrid Fiber Cement Based Material: A Review**. *Materials* 2021, 14, 2408. <https://doi.org/10.3390/ma14092408>

BASTOS, P. L. S. **Estruturas de concreto armado. Apostila da disciplina Estruturas de Concreto I**. Bauru, UNESP, 2014.

BERNARDI, Stefania Tesi. **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE MATERIAIS COMPOSTOS DE MATRIZES CIMENTÍCIAS REFORÇADAS COM FIBRA DE ARAMIDA KEVLAR**. 2003. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BIANCHI, O., [2020]. **Propriedades de materiais compostos: Interface entre fases** Universidade de Caxias do Sul. Disponível em: <https://www.uces.br/site/midia/arquivos/18-07-18-propriedades-compositos-interface-fases.pdf>. Acesso em: 11 de setembro de 2022.

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.

BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 02 de junho de 2022.

CARVALHO, M. J. C. et. al. **Características de flexão de materiais compostos de matriz cimentícia reforçada com fibras naturais de piaçava (*Attalea funifera*)**. *Revista Brazilian Applied Science Review*, Curitiba, v. 3, n. 1, p. 791- 803, jan./fev. 2019.

CASA DA MOEDA DO BRASIL. **RELATÓRIO DE SUSTENTABILIDADE 2016**. Disponível em: <https://www.casamoaeda.gov.br/portal/a-empresa/governanca-corporativa/relatorio-de-sustentabilidade.html>. Acesso em: 16 de agosto de 2022.

CARTA CIRCULAR 3235, 2006. Disponível em: https://www.bcb.gov.br/acessoinformacao/legado?url=https:%2F%2Fwww.bcb.gov.br%2Fhtms%2FNormativ%2Fcarta_circular_3235.asp.

CARTA CIRCULAR 3373, 2009. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/htms/normativ/AnexoCartaCircular3373.pdf>

CASTRO, A. L; PANDOLFELLI, V. C. **Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil**. *Cerâmica*. v. 55, p. 18-32, 2009.

CORREIA, Viviane da Costa. **Produção de celulose nanofibrilada a partir de polpa organossolve de bambu para nanoreforço de compostos cimentícios**. 2015. 167 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutora em Ciências, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2015.

COSTA, Fernanda Rodrigues Torres da. **Microscopia Eletrônica de Varredura: potencialidades e aplicações**. 2016. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Química Industrial, Universidade Federal do Maranhão, São Luis, 2016.

CUNICO, Nadine Ramos, et al,. **Fibras vegetais para produção de polpa celulósica**. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v.7, n.11, p. 101930/101941 nov. 2021.

CZOVNY, Carolina Ksiaskiewicz. **AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FRESCAS E ENDURECIDAS DE COMPOSTOS CIMENTÍCIOS COM ADIÇÃO DE CELULOSE NANOFIBRILADA**. 2021. 52 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Utfpr), Guarapuava, 2021.

FARUK, O.; BLEDZKI, A. H.; FINK, H. P.; SAIN, M.; **Biocomposites reinforced with natural fibers, *Progres in Polymer Science***. Centre for Biocomposites and Biomaterials Processing, University of Toronto, 33 Willcocks, p.1552-1596, Canadá, 2012

FÉLIX, A.H.O. **Compósitos de polipropileno com fibra de vidro utilizando viniltriétoxissilano como agente de adesão**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FLACH, Rafael, Schneider. **Estruturas para telhados: Análise Técnicas de Soluções**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

FONSECA, R.G. da. **Hidrofilidade em fibras de algodão branco e naturalmente colorido**. V Congresso Brasileiro de Algodão. Anais... Bahia, 2005.

GARCEZ, L.R.O. (2013). **Reaproveitamento do papel moeda retirado de circulação para a indústria papaleira**. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

GARCEZ, Loureine Rapôso Oliveira; GATTI, Thérèse Hofmann; GONÇALEZ, Joaquim Carlos. **REAPROVEITAMENTO CELULÓSICO DO PAPEL MOEDA RETIRADO DE CIRCULAÇÃO**. 2021. Disponível em: <https://silo.tips/download/reaproveitamento-celulosico-do-papel-moeda-retirado-de-circulacao>. Acesso em: 06 de junho de 2022.

GIL, CSB., Boaventura, TP., de Paula, FGF., de Castro, MCM. and Oréface, RL. (2019), **Direct use of Brazilian banknotes residue for the production of reinforced composites based on low-density polyethylene**. J. Appl. Polym. Sci., 136, 48232. doi: <https://doi.org/10.1002/app.48232>

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

KHOURY A.V, KHOURY, J.H. **Fluorescência de Raios X por dispersão de energia aplicada à caracterização de tijolos de sítios históricos de Pernambuco**. 2010. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

ROCHA, L D. et al. **A Review of the Use of Natural Fibers in Cement Composites: Concepts, Applications and Brazilian History**. *Polymers* 2022, 14, 2043. <https://doi.org/10.3390/polym14102043>

IORIO, M. F. Et al. **Reinforcement-matrix interactions and their consequences on the mechanical behavior of basalt fibers-cement composites**. *Construction and Building Materials*, Volume 309, 2021, 125103, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125103>.

MALISKA, A.M. **Apostila de Microscopia Eletrônica de Varredura. LABORATÓRIO DE CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E ANÁLISE DE IMAGENS – UFSC**. Disponível em: http://www.usp.br/nanobiodev/wp-content/uploads/MEV_Apostila.pdf. Acesso em: 14 de outubro de 2022.

MENDES, A. R. et, al.. **ANÁLISE DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE POLIPROPILENO**. Unicesumar, Brasil. Disponível em: <http://rdu.unicesumar.edu.br/handle/123456789/9021>. Acesso em: 02 jun. 2022.

NASCIMENTO, B. L. Et al. **.A utilização e a relevância multidisciplinar da fluorescência de raios X**. Revista Brasileira de Ensino de Física, [S.L.], v. 39, n. 4, 29 maio 2017. FapUNIFESP(SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2017-0089>.

NIJSSEN, R.P.L. **Composite Materials**, 1st ed.; VKCN: Amsterdam, The Netherlands, 2015; Volume 3, ISBN 978-90-77812-471.

OIKAWA, F.F. **Estudo da caracterização mecânica de flexão em compósitos cimentícios reforçados com fibras de malva**. 2019. 75 f. Dissertação(Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus,2019.

PEREIRA, E. **Desenvolvimento e validação de metodologia analítica para quantificação de urânio em compostos do ciclo do combustível nuclear por espectroscopia no infravermelho com transformada de fourier(FTIR)**. 2016. 181 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Autarquia Associada À Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

REZENDE, E.C.L et, al.**Estudo do efeito do emprego de fibras de celulose para a deformabilidade de argamassas**.In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. Anais. Porto Alegre: ANTAC, 2020

RODRIGUES, P. F., et. al, (2017) **Caracterização Mecânica de Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras de Politereftalato de Etileno Espiraladas**. ES Engineering

ROLLO, J.M.D.de A, FORTULAN, C.A. (2015). **Materiais de Engenharia (SEM 5908) - COMPÓSITOS COMO MATERIAIS DE ENGENHARIA – Aula 09 – Notas de aula**. Disponível em:

https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4449560/mod_resource/content/0/Aula_08_materiais_compositos.pdf. Acesso em: 10 de setembro de 2022.

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>>.

SALEIRO, G T et al. **Avaliação das fases cristalinas de dióxido de titânio suportado em cerâmica vermelha**. *Cerâmica*, v. 56, p. 162 – 167, 2010.

SANTOS, Carlos Eduardo dos. **Potencial de desenvolvimento de biocombustível produzido a partir de bio-óleo da pirólise de papel moeda descartado**. 2014. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - Unisinos, São Leopoldo, 2014.

SOARES, M.R.F., [21--]. **Materiais Compósitos Aspectos Gerais e Aplicações – UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**. Disponível em:

<https://www.ucsminhaescolha.com.br/site/midia/arquivos/05-12-17-materiais-compositos-e-aplicacoes1.pdf>. Acesso em: 10 de setembro de 2022.

SOUZA, Bruno Almeida et al. **Análise dos indicadores PIB nacional e PIB da indústria da construção civil**. *Rde - Revista de Desenvolvimento Econômico*, [S.L.], v. 1, n. 39, p. 140, abr. 2015. *Revista de Desenvolvimento Economico*. <http://dx.doi.org/10.21452/rde.v17i31.3480>.

SOUZA, Rui Barbosa de. **Estudo da retração em fibrocimento reforçado com fibra polimérica. 2013.** Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
doi:10.11606/T.3.2013.tde-22102014-095743. Acesso em: 2024-05-02. 3.4 Materiais Compósitos

VALADÃO, I.C.R. et, al. **TIJOLO ECOLÓGICO CONFECCIONADO COM CÉDULAS DE DINHEIRO SEM VALOR.** Semioses, [S.L.], v. 11, n. 4, 26 dez. 2017.
Sociedade Unificada de Ensino Augusto Motta -UNISUAM.

VENTURA, A. M. F. M. **Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas.** Ciência & Tecnologia dos Materiais, v. 21, n. 3-4, p. 10-19, 2009.ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos do Brasil 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>. Acesso em: 27 de abril de 2022.

SEGUNDA PARTE – ARTIGO

JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING

ISSN: 2352-7102

ÁREA PUBLICAÇÃO: ENGENHARIAS I

CLASSIFICAÇÃO: A1

AVALIAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM RESÍDUOS DE CÉDULAS BRASILEIRAS

Júlio Gabriel Trindade de Oliveira ¹; Camila Silva Brey Gil ²; Saulo Rocha Ferreira ²

¹Programa de Pós – Graduação em Engenharia Ambiental – EENG - Universidade Federal de Lavras (UFLA) – Lavras, MG – Brasil

² Departamento de Engenharia - DEG – Universidade Federal de Lavras (UFLA) {julio.oliveira5@estudante.ufla.br, camila.breygil@ufla.br, saulo.ferreira@ufla.br }

RESUMO

No presente estudo compósitos cimentícios foram avaliados, levando em consideração, a influência do tratamento aquoso de 24 horas realizado nos resíduos de papel moeda. Além das características físicas e químicas dos compósitos, quando os resíduos de papel moeda são adicionados em matrizes cimentícias. Esta avaliação foi realizada a partir de ensaios de caracterização química dos resíduos de papel moeda, bem como ensaios de calorimetria, análise física, avaliação microestrutural por microscopia eletrônica de varredura e ensaios mecânicos de compressão e flexão dos compósitos desenvolvidos. Deste modo, substituições de 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0% de cimento pelos resíduos do papel são realizadas. Entre as composições estudadas o traço com 1,5% de substituição proporcionou bom desempenho, atingindo valores 34% superiores a referência ao se tratar da resistência à flexão. Ainda foi possível perceber que tais valores encontrados são em maioria identificados pelos resíduos que passaram por tratamento aquoso, evidenciando a eficácia do tratamento. A proposta torna-se favorável, considerando os resultados obtidos, economia de materiais e redução de impactos ambientais.

Palavras chave: Fibra de celulose; Reaproveitamento de resíduos; sustentabilidade na construção

PHYSICAL AND MECHANICAL EVALUATION OF CEMENTITIOUS COMPOSITES REINFORCED WITH WASTE BRAZILIAN BANKNOTES

Júlio Gabriel Trindade de Oliveira ¹; Camila Silva Brey Gil ²; Saulo Rocha Ferreira ²

¹Programa de Pós – Graduação em Engenharia Ambiental - EENG – Universidade Federal de Lavras (UFLA) – Lavras, MG – Brasil

²Departamento de Engenharia - DEG – Universidade Federal de Lavras (UFLA)
{julio.oliveira5@estudante.ufla.br, saulo.ferreira@ufla.br, camila.breygil@ufla.br }

ABSTRACT

In the present study, cementitious composites were evaluated, taking into consideration the influence of a 24-hour aqueous treatment performed on paper currency residues. In addition to the physical and chemical characteristics of the composites, when the paper currency residues are added to cementitious matrices. This evaluation was carried out through chemical characterization tests of the paper currency residues, as well as calorimetry tests, physical analysis, microstructural evaluation by scanning electron microscopy, and mechanical tests of compression and flexion of the developed composites. Thus, substitutions of 0.5; 1.0; 1.5; and 2.0% of cement by paper residues are performed. Among the compositions studied, the mixture with 1.5% substitution provided good performance, achieving values 34% higher than the reference regarding flexural strength. It was also possible to notice that such values are mostly identified by the residues that underwent aqueous treatment, highlighting the effectiveness of the treatment. The proposal becomes favorable, considering the obtained results, material savings, and reduction of environmental impacts.

KEY – WORDS: Cellulose fiber; Waste reuse; Sustainability in construction

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o concreto é o material mais utilizado na construção civil [1]. Estima-se que anualmente, 25 bilhões de toneladas desse material são consumidas mundialmente pela população, ou seja, cerca de 3,5–3,8 t por pessoa [2,3].

O concreto é caracterizado por ter excelente resistência mecânica e durabilidade considerável [4]. No entanto, é suscetível a vários problemas relacionados como a deterioração, que influenciam a vida útil das estruturas [5]. Além disso, o cimento Portland, principal componente do concreto, emite níveis significativos de CO₂ em sua produção [6,7], bem como um elevado volume de desperdício em demolições.

A aplicação de carga em estruturas de concreto cria uma série de fissuras macroscopicamente visíveis quando a tensão atinge a resistência à tração do concreto. Estas falhas por tensão são devidas a cargas verticais e cargas acidentais. Devido às fissuras, a água e outros agentes químicos penetram no concreto e levam à corrosão das armaduras de aço, por exemplo [8].

Para reduzir alguns desses problemas, diversos estudos têm focado em alternativas sustentáveis para a indústria da construção, principalmente na busca de aumentar a resistência à formação de fissuras. Os compósitos reforçados com fibras são opções notáveis para tais fins [9]. Conforme mencionado por Khandelwal e Rhee [10], devido às suas dimensões reduzidas, as fibras apresentam elevada resistência mecânica e são utilizados para minimizar a largura de fissura.

A utilização de fibras celulósicas naturais, sintéticas ou residuais tem apresentado grande potencial, melhorando as propriedades mecânicas (resistências à flexão e à compressão) dos compósitos cimentícios, visto que, produtos à base de cimento apresentam baixa resistência à tração [12]. Um exemplo de melhoria foi a utilização de fibras de celulose à base de resíduos de papel, que diminuíram a densidade e aumentaram a resistência mecânica a flexão do compósito cimentício [13].

Desta maneira, uma alternativa sustentável para o reforço de matrizes cimentícias com fibras de celulose são os resíduos de papel moeda descartados pelo Banco Central do Brasil. Tais resíduos são compostos por fibras de celulose de alta qualidade. Além disso, vale ressaltar que os estudos referente a utilização

de papel moeda na matriz cimentícia não são suficientemente explorados na literatura científica.

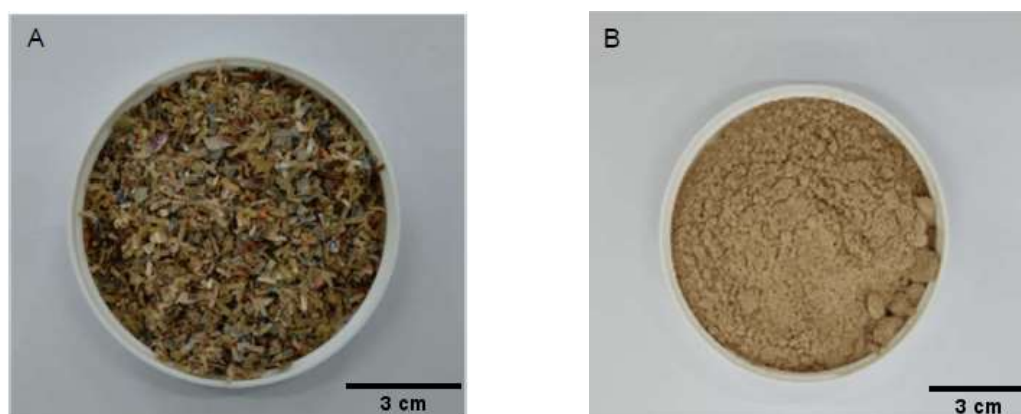
Neste contexto, este trabalho tem como objetivo a avaliação física e mecânica de compósitos cimentícios reforçados com resíduos de cédulas brasileiras, por meio da interação e da substituição em porcentagem da massa de cimento, buscando elevar os resultados da matriz de referência.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O cimento Portland utilizado foi o Cimento Portland CP II – F 40, da marca Holcim. O papel moeda, fornecido pelo Banco Central do Brasil, será usado em duas granulometrias diferentes: como fornecido pelo banco (Figura 1, A), e após ser triturado em moinho de facas (Figura 1, B).

Figura 1 – Papel moeda fornecido pelo Banco Central do Brasil em tamanhos aproximados de 2 mm (A) e papel moeda após processo de trituração (B)



Fonte: Autor, 2023

2.2 Caracterização do papel moeda

2.2.1 Extrativos Totais

A quantificação dos extrativos totais foi realizada a partir da norma NBR 14853 [14]. O material foi passado na peneira ABNT / ASTM 60 (abertura de 0,25 mm), e, em seguida, 5 gramas de papel moeda foram colocados em filtro de papel secos em estufa (a 30°C por 24 horas). A extração foi realizada em um extrator soxhlet utilizando solução de acetona-água (70% v / v) por 4 horas.

Os filtros de papel foram retirados dos extratores, que passaram por um processo de lavagem com água destilada quente em abundância. Os filtros com

a amostra úmida foram levados a uma estufa a 105 °C até atingir massa constante.

A porcentagem de extrativos foi determinada de acordo com a equação (1):

$$\text{Ext (\%)} = \left(\frac{M_i - M_f}{M_i} \right) * 100 \quad (1)$$

Ext: teor de extrativos totais em %

Mi: massa inicial (g)

Mf: massa final (g)

2.2.2 Lignina

A quantificação da lignina foi realizada a partir da norma NBR 7989 [15]. O método utilizado foi de hidrólise, tratando as amostras livres de extrativos com ácido sulfúrico (H₂SO₄) na proporção de 15 mL por amostra, por 2 horas à temperatura ambiente. Após o tratamento, foram adicionados 450 mL de água destilada em cada amostra e essas passaram pelo processo de fervura a 50° C durante 4 horas. Em seguida, foram filtradas as amostras secas a 105° C. O teor de lignina foi determinado de acordo com a equação (2):

$$\text{Tlig(\%)} = \frac{M_{\text{lignina}}}{M_s} \times 100 \quad (2)$$

Tlig: teor de lignina (%)

M_{lignina}: massa seca de lignina (retida no cadinho), gramas

M_s: massa seca da amostra (livre de extrativos), gramas

2.2.3 Holocelulose

O teor de holocelulose foi obtido seguindo o procedimento descrito por Browning [16]. Foram pesados 2 g do material previamente seco. As amostras foram colocadas em um erlenmeyer de 125 mL, juntamente com 55 mL de água, 2 mL de uma solução de clorito de sódio 30% (m/v) e 2 mL de solução de ácido acético (20% v/v). O erlenmeyer foi então tampado e o conjunto, colocado em um banho termostatizado, a 70 ± 5° C. Deste modo, foi repetida a adição de solução de ácido acético e clorito de sódio a cada 45 minutos.

No final de aproximadamente 4 horas, a mistura foi resfriada lentamente e filtrada. A holocelulose (resíduo sólido) resultante foi lavada exaustivamente

com água fria e com três porções de metanol e, posteriormente, seca em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$, até a massa constante.

A quantificação da holocelulose foi determinado de acordo com a equação (3):

$$\text{Holocelulose (\%)} = \frac{M_f}{M_i} \times 100 \quad (3)$$

M_f = Massa de holocelulose (retida no cadinho de porosidade), gramas

M_i = Massa inicial da madeira livre de extrativos, gramas

2.2.4 Celulose

O teor de celulose foi determinado baseado no procedimento descrito por Kennedy, Phillips e Willians [17]. Em um recipiente foi adicionado cerca de 1 g de holocelulose seca e 15 mL de solução de hidróxido de potássio (KOH) 24% (m/v). A mistura foi mantida sob agitação à temperatura ambiente durante 15 horas e, em seguida, filtrada.

O resíduo sólido (celulose) resultante foi lavado com água destilada, com duas porções de ácido acético 1% e, por último, com etanol. Por fim, as amostras foram secas em estufa, a $103 \pm 2^\circ\text{C}$, até a massa constante.

O teor de celulose foi determinado de acordo com a equação (4):

$$\text{Celulose (\%)} = \frac{M_f}{M_i} \times 100 \quad (4)$$

M_f = Massa final da amostra seca (g)

M_i = Massa inicial da amostra (g)

2.2.5 Hemicelulose

As hemiceluloses foram quantificadas pela diferença entre o teor de holocelulose e o teor de celulose.

2.2.6 Teor de Cinzas

Para a quantificação das cinzas foi utilizada a norma NBR 13999 [18]. Foi pesado aproximadamente 2g de material, colocados em cadinhos previamente calcinados. Esses foram transferidos para um forno mufla e aquecidos à taxa de $1,67^\circ\text{C}/\text{min}$ até atingir a temperatura de 525°C por 3 horas.

O teor de cinzas foi determinado como a relação entre a massa incinerada e a massa inicial do material (massa seca total) de acordo com a equação (5):

$$T_c = \frac{M_c}{M_i} \times 100 \quad (5)$$

T_c: teor de cinzas (%)

M_c: massa de cinzas (g)

M_i: massa inicial (g)

2.3 Absorção e dessorção de água do papel moeda

Para o ensaio de absorção de água foi pesado aproximadamente 1 g de resíduos de papel moeda previamente secos que foram acondicionados em embalagens de papel fechadas. As amostras foram imersas em aproximadamente 200 mL de água destilada e pesadas de hora em hora, até completar 24 horas (caso atingido a saturação máxima dos mesmos).

O teor de absorção de água foi determinado como a relação entre a massa saturada e a massa inicial do material (massa seca total) de acordo com a equação (6):

$$\text{Abs (\%)} = \frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (6)$$

Abs (%): absorção de água (%)

M_{sat}: massa saturada (g)

M_s: massa seca (g)

Já para o ensaio de dessorção de água, aproximadamente 5 g do material saturado com água, foram colocados em uma estufa a 37° C e pesados de hora em hora, até estabilizar a massa.

O teor de dessorção de água foi determinado como a relação entre a massa saturada e a massa seca do material de acordo com a equação (7):

$$\text{Des (\%)} = \frac{M_s - M_{\text{sat}}}{M_{\text{sat}}} \times 100 \quad (7)$$

Des (%): dessorção de água (%)

M_{sat}: massa saturada (g)

M_s: massa seca (g)

2.4 Fluorescência de raio X (FRX)

O ensaio de fluorescência de raio X, foi realizado no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras. Em que, um espectrômetro XRF portátil (modelo Tracer 5g, Bruker Analytical Instrumentation, Billerica, MA, EUA) foi utilizado para escanear as amostras e avaliar sua composição. As varreduras foram realizadas nas amostras dos resíduos de papel moeda, em triplicata, sendo que, as amostras utilizadas foram as disponibilizadas pelo banco central, sem nenhum tratamento prévio. Os resultados finais por amostra foram calculados através da média das medições obtidas.

2.5 Produção das argamassas

Para avaliar as argamassas, foram produzidos traços sem adição de resíduos (referência) e com adição de resíduos nas proporções de 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% m/m. Foram utilizadas as duas granulometrias diferentes de resíduos do papel moeda, sendo a primeira moída e a segunda sem moer. Além disso, foram realizados dois tratamentos nos resíduos, o primeiro em que o material foi adicionado diretamente nas argamassas e o segundo, em que a adição aconteceu após hidratação do resíduo por 24 horas em água.

Os traços em massa variaram com o ensaio a ser realizado, devido às especificações dos mesmos. Após as pesagens os materiais foram misturados obedecendo a seguinte ordem: cimento e resíduo de papel moeda. Após homogeneizada a mistura, a água foi adicionada com fator água – cimento de 0,4. Em seguida, os corpos de prova foram moldados segundo os preceitos normativos indicados na execução de cada ensaio.

2.6 Análise Microestrutural (MEV)

A caracterização microestrutural foi realizada por meio de um microscópio eletrônico de varredura do modelo LEO EVO 40 XVP, localizado no departamento de Fitopatologia da UFLA.

O preparo e análise das amostras com adição de resíduos, foi realizado com o propósito de avaliar a interação da matriz cimentícia com o resíduo de papel moeda após os devidos tratamentos (seco e aquoso). Para isso, foram utilizadas amostras com dimensões aproximadas de 1 cm³, que foram secas por 24 horas

em estufa de circulação de ar com temperatura de 105 °C. Para isso, as amostras foram fixadas sobre os stubs (porta amostras de alumínio) e para uma maior varredura do feixe de elétrons, foram cobertas com ouro.

2.7 Ensaios de Calorimetria

O ensaio de calorimetria semi - adiabática foi realizado em dois momentos diferentes, para definir a evolução da hidratação do cimento, já que o calor liberado em função do tempo pode ser usado para descrever a cinética de hidratação e para avaliar as propriedades correlacionáveis como resistência mecânica.

Para ambos procedimentos foram utilizadas caixas térmicas com capacidade de 449 mL projetadas em um sistema que possui apenas um orifício isolado para acoplamento dos termopares, evitando a dissipação de calor da reação exotérmica do cimento com o ambiente.

Deste modo, foi substituído 1%, 2% e 3% da massa de cimento pelo resíduo de papel moeda (em massa), com um fator água cimento (a/c) de 0,4, as quantidades podem ser observadas na tabela 1.

Tabela 1 – Quantidade de matérias no ensaio de calorimetria (1º momento)

Material	Referência	Moído / Sem moer (1%)	Moído / Sem moer (2%)	Moído / Sem moer (3%)
Cimento	616,17 (g)	610,01 (g)	603,85 (g)	597,69 (g)
Papel Moeda	-	6,16 (g)	12,32 (g)	18,48 (g)
Água	246 (g)	246 (g)	246 (g)	246 (g)

Fonte: Autor, 2023

Numa segunda instância foi substituído 1% e 2% de resíduo de papel moeda em relação a massa de cimento, novamente com um fator a/c de 0,4. No entanto, para esse procedimento foi adicionado uma maior parte de água considerada absorvida pelo resíduo do papel moeda durante o processo de hidratação do cimento, as quantidade podem ser observadas na tabela 2.

Tabela 2 - Água absorvida pelo papel moeda

Material	Referência	Moído / Sem moer (1%)	Moído / Sem moer (2%)
Cimento	616,17 (g)	610,01 (g)	603,85 (g)
Papel Moeda	-	6,16 (g)	12,32 (g)
Água	246 (g)	252,16 (g)	258,32 (g)

Fonte: Autor, 2023

Após a montagem do aparato experimental do ensaio de calorimetria, o experimento ficou sobre processo de leitura por 24 horas.

2.8 Caracterização física das argamassa

2.8.1 Absorção total, índice de vazios e massa específica

A absorção de água (A_t) foi baseada na norma NBR 9778 [19] possibilitando a determinação do índice de vazios (I_v) e massa específica (ρ). O ensaio foi realizado em corpos-de-prova previamente secos em estufa a temperatura de 60 °C, até constância de massa, definindo a massa seca (M_s). A partir daí, os corpos de prova foram imersos em água a temperatura ambiente por 72 h, obtendo-se a massa imersa (M_i). Definida a massa imersa a superfície dos corpos de prova foram levemente enxugados com pano limpo e seco para retirada do excesso de água e assim determinada a massa saturada (M_{sat}). As equações 6, 7 e 8 foram utilizadas para a determinação das propriedades físicas supracitadas.

$$A_t (\%) = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} * 100 \quad (6)$$

$$I_v (\%) = \frac{M_{sat} - M_i}{M_{sat} - M_i} * 100 \quad (7)$$

$$\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} * d \quad (8)$$

Onde, d : densidade da água = 1g/cm³; M_s : massa seca; M_i : massa imersa; M_{sat} : massa saturada

2.9 Caracterização mecânica das argamassas

2.9.1 Ensaio de resistência à compressão

O ensaio foi realizado em uma máquina de ensaios universal (INSTRON-EMIC 23-20). Para esse ensaio, foi utilizada a norma NBR 7215 [20]. O ensaio foi realizado em corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, a uma velocidade de deformação de 5 mm/min. O ensaio de resistência à compressão (com e sem adição de resíduos) foi realizado após 28 dias da moldagem das amostras.

A partir das curvas de tensão x deformação provenientes do ensaio, foram calculados os valores médios de tensão máxima de compressão.

2.9.2 Ensaio de resistência à tração na flexão (três pontos)

O ensaio foi realizado em uma máquina de ensaios (WDW – 20F), com velocidade de deslocamento de 1 mm/min após 28 dias da moldagem. O ensaio foi baseado na norma NBR 13279 [21], utilizando corpos de prova prismáticos de 160 mm x 40 mm x 40 mm (comprimento x largura x altura).

Os dados foram expressos em tensão de tração na flexão, e foi utilizada a equação (9) para cálculo dessa tensão.

$$\sigma = \frac{3FL}{2b^2} \quad (9)$$

σ : tensão na flexão (MPa)

F: carga na fratura

L: distância entre pontos de apoio (14 cm para o experimento em questão)

b : largura

d : altura

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização do papel moeda

3.1.1 Análise química

O papel moeda foi caracterizado para determinação da sua composição em termos de extrativos totais, lignina, cinzas, celulose e hemicelulose. Os resultados da caracterização química dos resíduos de papel de moeda foram dispostos na tabela 3.

Tabela 3 – Caracterização química dos resíduos de papel moeda

Caracterização Química	Média (%)	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
Extrativos Totais	16,37	0,44	2,70
Lignina	20,97	1,33	6,32
Cinzas	5,67	0,09	1,58
Holocelulose	56,50	1,14	2,01
Celulose	42,88	1,59	3,71
Hemicelulose	13,61	1,01	7,42

Holocelulose = Celulose + Hemicelulose

Fonte: Autor, 2023

Assim, ao analisarmos os dados, percebemos que foram encontrados em torno de 16,37% de extrativos totais, que podem estar atribuídos a óleos e resinas constituintes em papéis especiais [22]. Parâmetro esse, que tem suma importância para o experimento em questão, visto que, em altas proporções podem influenciar e retardar a hidratação do cimento [23]. Além disso, segundo Bilcati [24], o alto índice de extrativos pode ser responsável pela incompatibilidade química com a matriz cimentícia e até mesmo impedir o endurecimento do compósito.

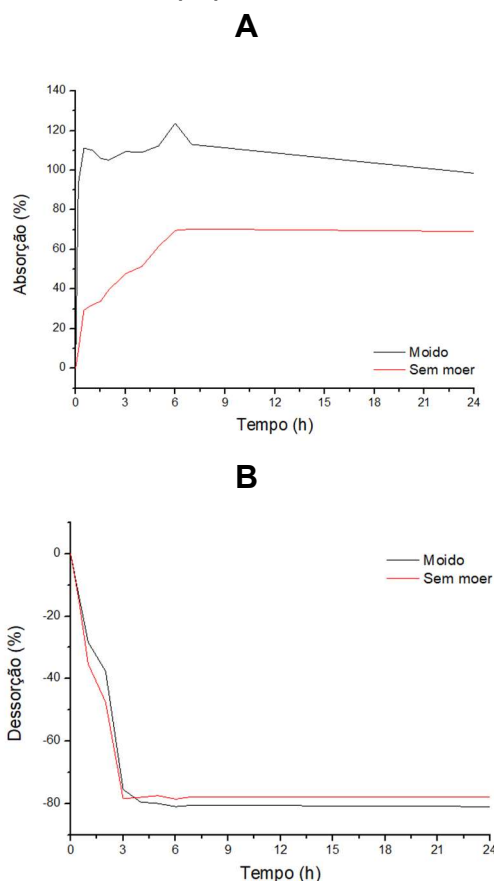
Um outro ponto importante a ser analisado é a quantidade de cinzas encontradas em torno de 5,67%, resultado semelhante obtido por Garcez [22] que obteve em seu experimento 5,55% e por Santos [25] que encontrou 5,09% no teor de cinzas. O resultado pode ser explicado, devido ao fato do papel moeda ser composto por pigmentos e metais que o configuram como um papel especial e, com isso, o seu teor de matéria inorgânica é maior.

Já em relação aos demais parâmetros analisados foram encontrados 42,88% de celulose, 20,97% de lignina e 13,61% de hemicelulose. Resultado relativamente semelhante a Couret e colaboradores [26] que obteve em seu estudo 42,50% de celulose, 21,70% de lignina e 24,50% de hemicelulose, quando analisou fibras vegetais. A elevada presença de celulose se deve ao fato da fabricação do material, que por ser papel é rico em celulose devido ao seu processo de produção.

3.1.2 Absorção e dessorção do papel moeda

Os resíduos do papel foram caracterizados com o intuito de analisar a capacidade de absorção e dessorção de água. As figuras 2 e 3 apresentam, respectivamente, os resultados de absorção e dessorção do papel moeda.

Figura 2 – Gráfico de absorção (A) e dessorção (B) de água dos resíduos do papel moeda



Fonte: Autor, 2023

Desta maneira, podemos perceber que tanto o papel moeda moído e o papel sem moer, possuem o seu pico de absorção em torno de 6 horas. Além disso, é possível perceber que o papel moído absorve em torno de 120% da sua massa inicial, enquanto que o sem moer absorve em torno de 70% da sua massa inicial. Resultados semelhantes foram encontrados por Sathishkumar [27] em que as fibras naturais praticamente dobraram a capacidade da absorção de água, saindo de 7,15% para 14,68%. Os resultados podem ser justificados devido ao fato de que, o papel moeda moído apresenta uma menor área superficial, o que acarreta num maior contato direto com a água em relação ao papel moeda sem moer.

Já ao analisarmos a dessorção do papel moeda percebemos que ambos estabilizam em torno de 3 horas, por volta de 80% da sua massa. Podendo essa perda estar atrelada, a algum material presente na estrutura dos resíduos das cédulas brasileiras, visto que, sua constituição não é totalmente conhecida.

3.2 Fluorescência de raio X (FRX)

A tabela 4 evidencia os elementos encontrados em uma amostra do papel moeda pelo ensaio de fluorescência de raio X.

Tabela 4 – Elementos encontrados no ensaio de FRX

Elemento Químico	Médias (%)		
		Ni	0,0047
Mg	*	Cu	0,0679
Al	0,2053	Zn	0,0147
Si	0,2642	As	0,0005
P	0,0167	Se	0,0001
S	0,0127	Br	0,0012
Cl	0,8318	Rb	0,0006
K	0,2176	Sr	0,0019
Ca	0,6230	Mo	*
Ti	0,3179	Cd	*
V	0,0065	Ba	0,0146
Cr	0,0010	Hg	*
Mn	0,0072	Pb	0,0011
Fe	0,1415		

Observação: “ * ” = valores inferiores ao mínimo que o equipamento de FRX consegue detectar.

Fonte: Autor, 2023

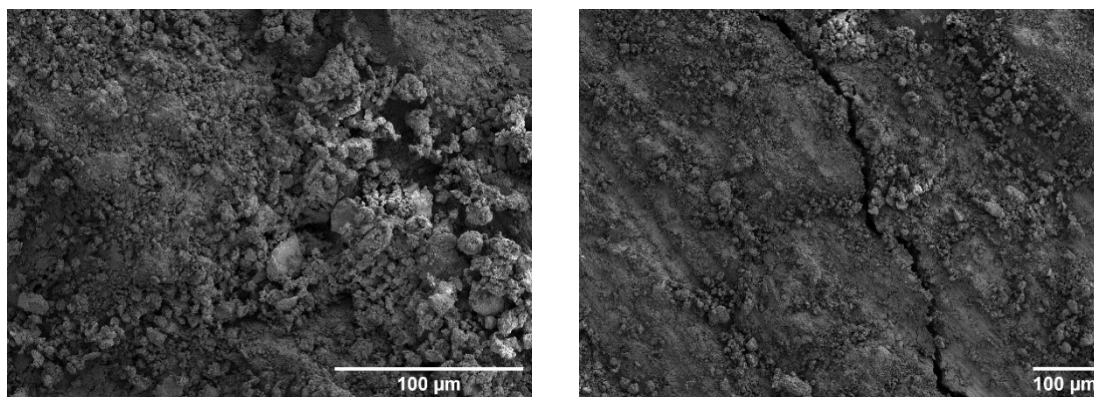
Ao analisarmos os dados podemos perceber que os elementos em maior constituição encontrados foram o cálcio em torno de 0,62%, cloro em torno de 0,83% e titânio em torno de 0,31%.

Em comparação a caracterização do papel moeda utilizando a espectrometria por fluorescência de raios X feita por Santos [25], evidencia que na composição do material há uma presença majoritária de titânio (Ti), que pode ser explicada devido ao fato de que, tal elemento, é um dos mais utilizados para obtenção de pigmento branco, além de ter um custo baixo [28]. No entanto, a diferença de resultados entre as análises pode estar atrelada à variação de equipamentos utilizados.

3.3 Análise microestrutural da interface fibra – matriz

A figura 4 apresenta o resultado da caracterização microestrutural do compósito referência (sem adição dos resíduos de papel moeda) com o intuito de ser um comparativo para as referidas análises.

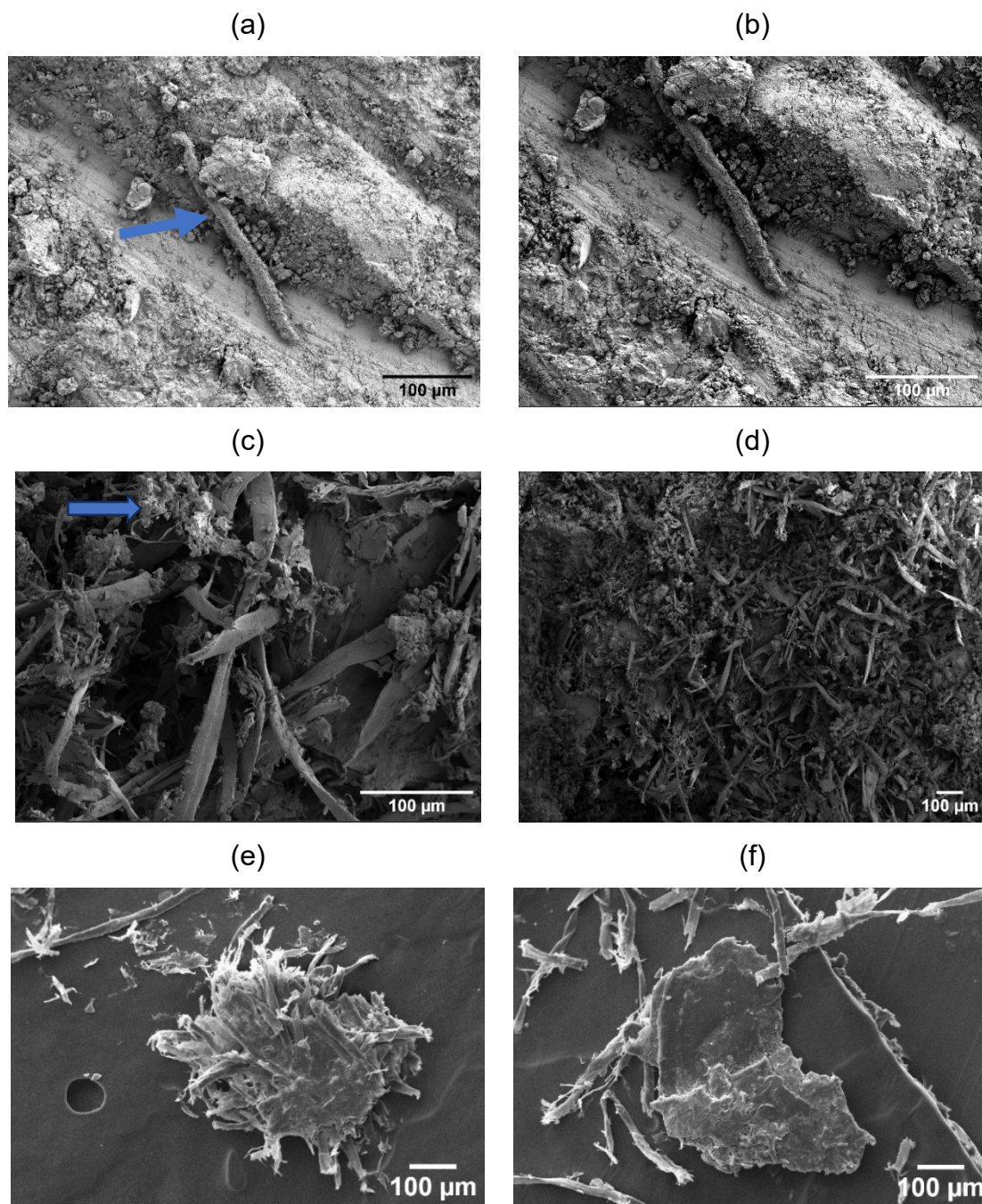
Figura 4 – MEV do compósito de referência



Fonte: Autor, 2023

Já a figura 5, apresenta o ensaio dos compósitos utilizando resíduos de papel moeda (moídos) no seu estado seco e saturado. Assim é possível observar que ambos os estados apresentam sinais de hidratação da pasta (representadas pela seta azul) quando comparados com o resíduo em seu estado natural (e;f). Podendo induzir dessa maneira que essas foram cobertas pela matriz cimentícia.

Figura 5 – MEV do compósito com resíduo de papel moeda (moído) a) Mev – compósito seco b) Mev compósito seco c) Mev saturado d) Mev saturado e) MEV moído f) MEV moído

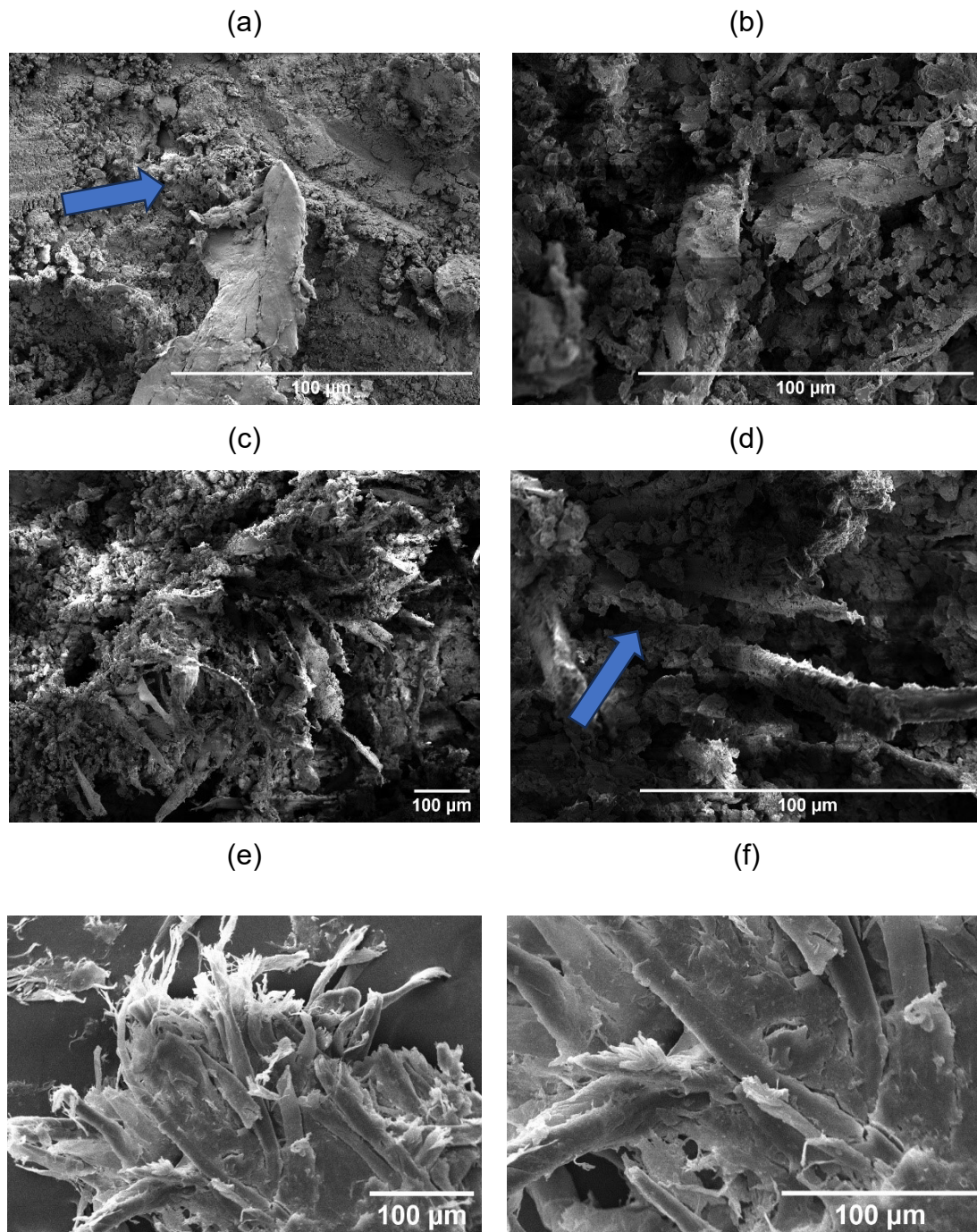


Fonte: Autor, 2023

Já analisando a figura 6, que retrata os compósitos que passaram pela caracterização microestrutural com adição do resíduos de papel moeda (sem moer), tanto em seu estado seco e saturado, também podemos perceber partículas ao em torno da fibra (representadas pela seta azul), indicando a hidratação da matriz cimentícia. Ainda, podemos perceber que no compósito

com as fibras saturadas, a presença de partículas envolvendo a fibra é mais acentuada, podendo indicar, uma melhor adesão ao ser comparada com o compósito que apresenta os resíduos de papel moeda em seu estado seco.

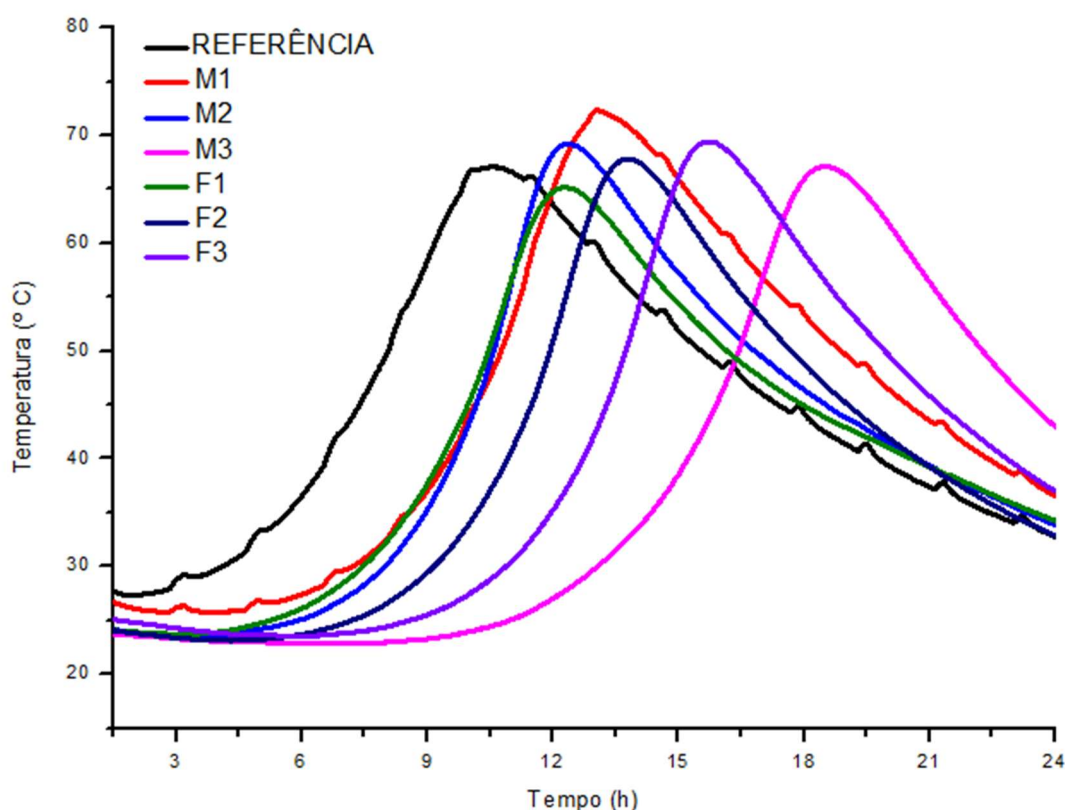
Figura 6 – MEV do compósito com resíduo de papel moeda (sem moer) a) Mev – compósito seco b) Mvw compósito seco c) Mev saturado d) Mev saturado e) MEV fibra f) MEV fibra



3.4 Calorimetria

Nas figuras 7 e 8, estão apresentados os fluxos de calor liberado em função do tempo. Sendo que na figura 7, são apresentados os dados seguindo o traço pré-definido e na figura 8 o traço com adição extra de água, considerada absorvida pelo papel moeda.

Figura 7 – Gráfico de calorimetria sem adição extra de água



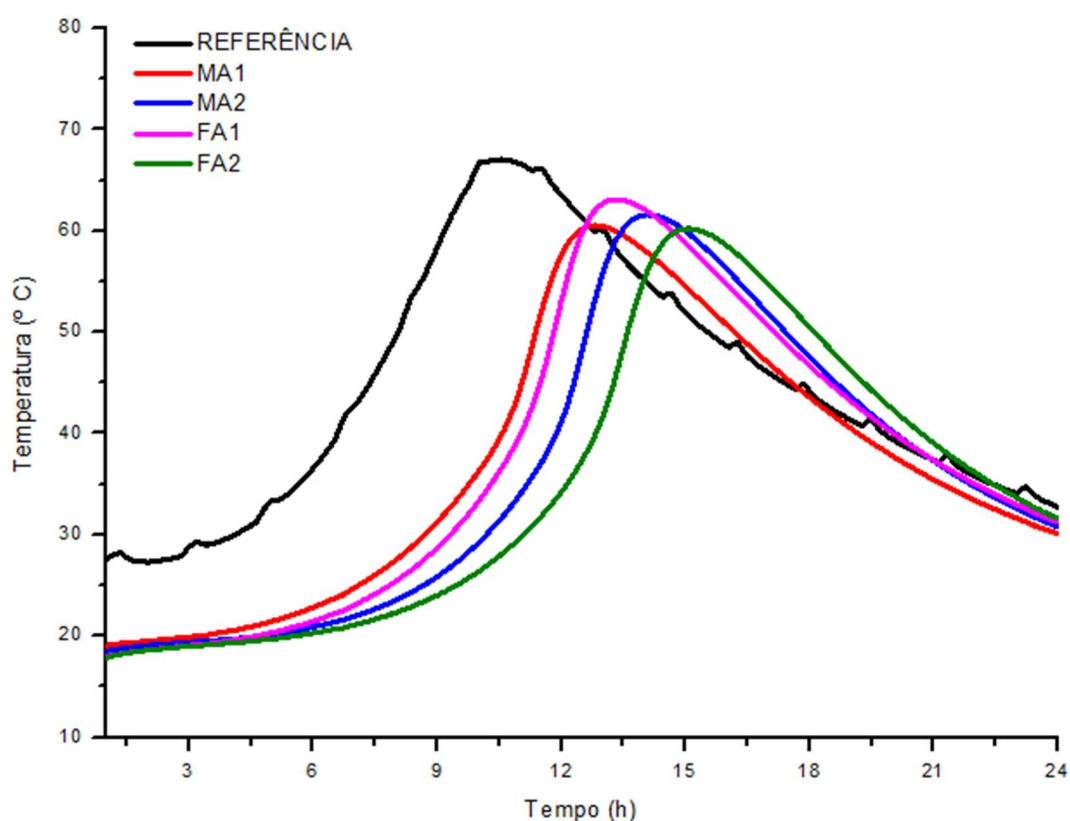
Fonte: Autor, 2023

Ao analisarmos os dados da figura 7, percebemos que para todos os tratamentos foram observados um tempo maior de início de reação de hidratação em relação a referência, além de um maior pico de temperatura. Tal fato, pode ser explicado, devido a presença dos resíduos de papel moeda, que “roubam” água durante o processo e atrapalham a cura da matriz cimentícia dentro da reação. Uma outra explicação pode estar atrelada ao tamanho dimensional das partículas e área de contato das mesmas, sendo que as curvas M1 e M2 referentes aos resíduos de papel moeda moídos, apresentaram picos de temperatura superiores às curvas F1 e F2, que retratam os resíduos que não

foram moídos. Além disso, pode estar atrelada também ao alto teor de extrativos totais encontrados na amostra, visto que, como supracitado, o seu alto teor pode retardar a hidratação do cimento.

Ainda, é possível observar que tanto a curva de M3 e F3, que representa o tratamento com 3% de substituição de resíduos de papel moeda em relação a massa de cimento, são as que apresentam curvas com características mais divergentes em relação a referência. A partir disso, foi determinado os traços para confecção dos corpos de prova, considerando substituição máxima em 2% do cimento, com o intuito de analisar reações com características semelhantes a referência.

Figura 8 - Gráfico de calorimetria com adição extra de água



Fonte: Autor, 2023

Já ao analisarmos os dados apresentados pela figura 8, é evidenciado um maior tempo para o processo de hidratação, no entanto, um menor pico de temperatura foi demonstrado para todos os tratamentos com a adição de água extra ao sistema. Mostrando desta maneira, que a água auxilia no processo de cura interna e hidratação.

3.5 Influência da adição de fibras nas propriedades físicas dos compósitos

Os valores médios de absorção de água, índice de vazios e densidade dos compósitos reforçados, com resíduos de papel moeda tratados e não tratados, estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades físicas dos compósitos

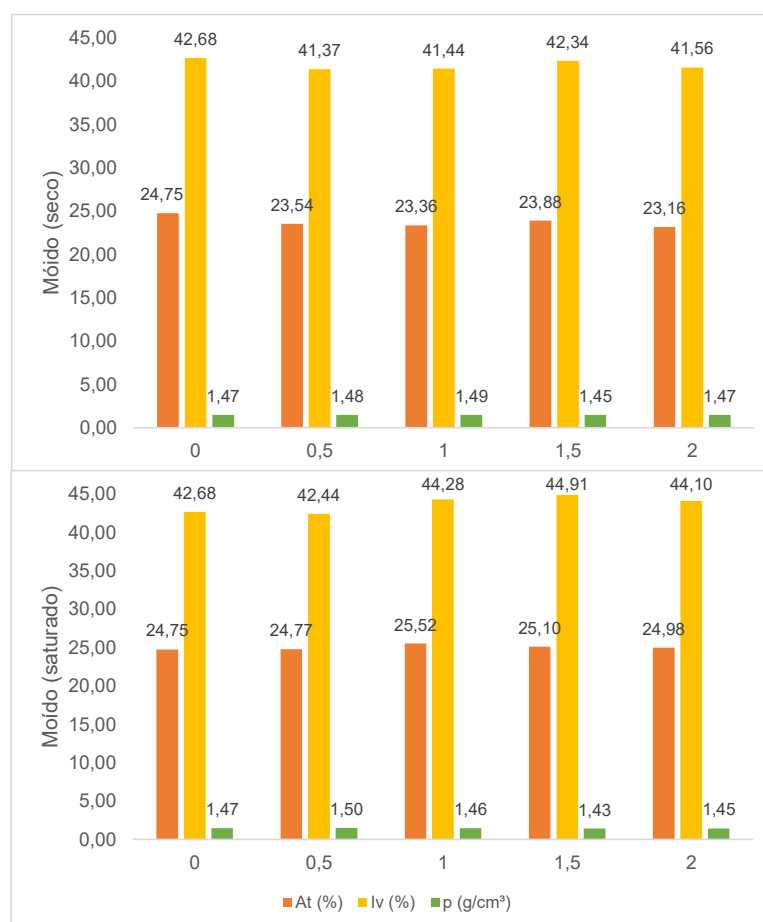
Tipo de material	Teor de adição	Absorção total média (%)	Índice de vazios médio (%)	Densidade (ρ) média (g/cm³)
Referência	0,00%	24,75	42,68	1,47
Moído (seco)	0,50%	23,54	41,37	1,48
Moído (seco)	1,00%	23,36	41,44	1,49
Moído (seco)	1,50%	23,88	42,34	1,45
Moído (seco)	2,00%	23,16	41,56	1,47
Sem moer (seco)	0,50%	25,40	43,94	1,48
Sem moer (seco)	1,00%	25,33	43,96	1,44
Sem moer (seco)	1,50%	25,90	44,36	1,48
Sem moer (seco)	2,00%	26,27	45,47	1,46
Moído (saturado)	0,50%	24,32	42,41	1,47
Moído (saturado)	1,00%	25,82	46,05	1,47
Moído (saturado)	1,50%	25,31	43,50	1,49
Moído (saturado)	2,00%	25,65	44,84	1,46
Sem moer (saturado)	0,50%	24,77	42,44	1,50
Sem moer (saturado)	1,00%	25,52	44,28	1,46
Sem moer (saturado)	1,50%	25,10	44,91	1,43
Sem moer (saturado)	2,00%	24,98	44,10	1,45

Fonte: Autor, 2023

Ao observarmos os dados percebemos que o papel moído sem tratamento aquoso, foi o que apresentou menores valores de índice de vazios para todas as porcentagens de substituição em relação a referência, e como consequência também apresentou menores valor de absorção de água. Além disso, a densidade desses foi relativamente superior a referência devido ao menor índice de vazios encontrado. Podendo ser justificado pelo tamanho das fibras e sua melhor incorporação na matriz, gerando menores espaços vazios.

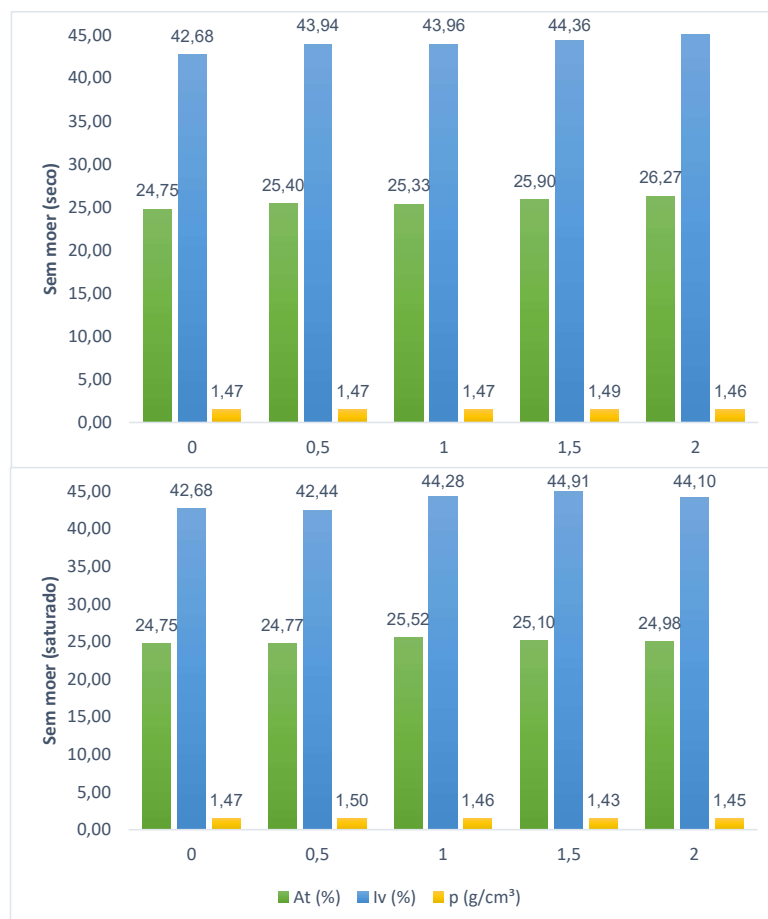
Já ao analisarmos o papel moeda moído saturado, e o sem moer seco e saturado, podemos perceber que esses de maneira geral apresentaram índice de vazios superior a referência e também uma maior absorção de água. E desta maneira, apresentaram densidade igual ou relativamente inferiores a referência, devido a essa alteração no índice de vazios. Resultados semelhantes foram encontrados por Bentchiko e colaboradores [29] onde o compósito se tornou menos denso devido a adição de fibras de celulose recicladas, que pode ser justificado, pela formação de bolhas de ar causadas pelos resíduos do papel moeda durante a mistura.

Figura 9 – Representação gráfica dos índices físicos para o papel moeda (moído)



Fonte: Autor, 2023

Figura 10 – Representação gráfica dos índices físicos para o papel moeda (sem moer)



Fonte: Autor, 2023

3.6 Comportamento mecânico dos compósitos

3.6.1 Resistência à compressão

São apresentados na tabela 6 as médias dos resultados obtidos no ensaio de resistência a compressão dos corpos de prova de argamassa com 28 dias. Os resultados de maneira geral evidenciam que quanto mais resíduos de papel moeda foram adicionados, menor foi a resistência apresentada pelas argamassas em comparação com a referência de 33,29 MPa.

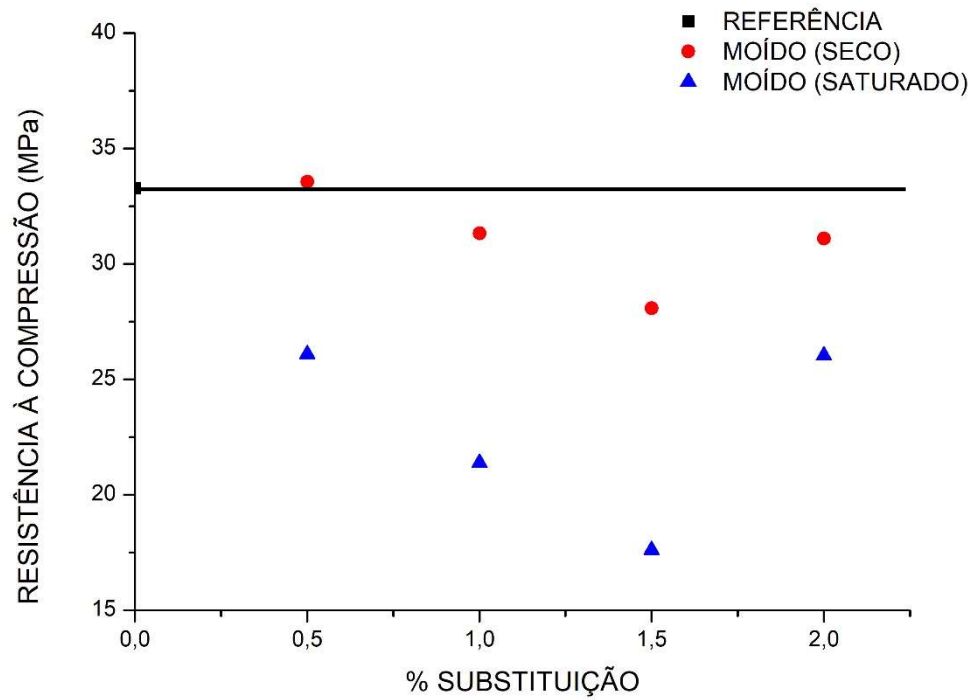
Tabela 6 – Resistência à compressão aos 28 dias

Tipo de material	Teor de adição	σ (MPa) 28 dias	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
Referência	0%	33,29	3,92	11,78
Moído (seco)	0,50%	33,56	6,54	19,48
Moído (seco)	1,00%	31,33	4,19	13,38
Moído (seco)	1,50%	28,09	9,44	33,61
Moído (seco)	2,00%	31,11	7,70	24,75
Sem moer (seco)	0,50%	22,70	3,55	15,62
Sem moer (seco)	1,00%	18,91	3,36	17,75
Sem moer (seco)	1,50%	15,49	1,67	10,75
Sem moer (seco)	2,00%	12,95	2,85	21,99
Moído (saturado)	0,50%	26,10	4,86	18,62
Moído (saturado)	1,00%	21,40	6,46	30,20
Moído (saturado)	1,50%	17,62	8,06	45,76
Moído (saturado)	2,00%	26,05	9,06	34,79
Sem moer (saturado)	0,50%	24,07	3,73	15,48
Sem moer (saturado)	1,00%	20,24	4,36	21,54
Sem moer (saturado)	1,50%	17,16	1,13	6,59
Sem moer (saturado)	2,00%	14,89	3,39	22,75

Fonte: Autor, 2023

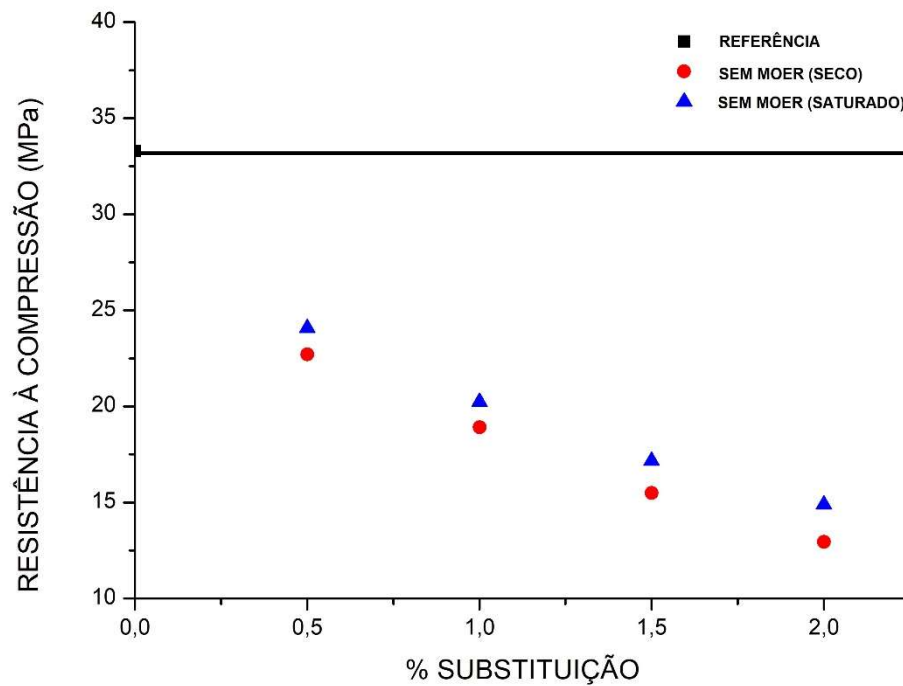
As figuras 11 e 12 apresentam a relação da resistência a compressão evidenciando o papel moeda nas 2 granulometrias diferentes moído e sem moer respectivamente, com os seus devidos tratamentos (seco e saturado). Além disso, pelo teste Tukey, foi constatada uma diferença significativa para os dados apresentados quando $p < 0,05$.

Figura 11 – Resistência a compressão papel moeda (moído)



Fonte: Autor, 2023

Figura 12 – Resistência a compressão papel moeda (sem moer)



Fonte: Autor, 2023

Ao observarmos os dados analisados pela figura 11 percebemos, que os corpos de prova com resíduos, moídos e saturados apresentaram resistência à compressão inferior aos corpos de prova com resíduos, moídos e secos, variando de 17,62 a 26,10 MPa em relação a 28,09 a 33,56 MPa, respectivamente. Uma redução em torno de 22,2% entre os maiores valores obtidos de resistência à compressão em relação aos dois tratamentos. Isso devido ao fato de que, os moídos saturados apresentaram maiores índices de vazios e como consequência menores valores de resistência. Além disso, Bentchikou e colaboradores [29] também encontrou resultados semelhantes em seus experimentos, visto que, à medida que aumentava as porcentagens de fibras de celulose em seus compósitos, menores valores de resistência a compressão eram obtidos, variando de 65 MPa para a referência a 5 Mpa para 5% de substituição, em consequência ao aumento do índice de vazios.

No entanto, ao serem analisados as curvas da figura 12 que representam o papel moeda sem moer, é evidenciado que o corpo de prova com resíduo com fibra saturada apresentou maiores valores de resistência que variou de 14,89 a 24,07 MPa em relação as secas que variou de 12,95 a 22,70 MPa. A esse fato pode ser explicado pela dispersão e aglomeração das fibras saturadas em pontos dos corpos de prova, que ocasionam respostas de resistência à compressão variadas em determinados pontos.

Ainda em comparação, percebemos que os corpos de prova com resíduos moídos apresentaram valores de resistência superiores ao comparados com os resíduos fibrosos. Novamente, podendo ser justificado pelo menor índice de vazios apresentado pelos corpos com resíduos moídos, resultando em maiores resistências [30].

3.6.2 Resistência à flexão

Os resultados obtidos no teste de resistência à flexão a partir dos corpos de prova, estão apresentados na tabela 7, com um valor médio para cada compósito, estes foram realizados após 28 dias de cura da pasta de cimento. Ainda, pelo teste Tukey, foi constatada uma diferença significativa para os dados apresentados quando $p < 0,05$.

Tabela 7 – Resistência à flexão aos 28 dias

Tipo de material	Teor de adição	σ (MPa) 28 dias	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
Referência	0,00%	5,52	1,28	23,23
Moído (seco)	0,50%	4,41	0,50	11,36
Moído (seco)	1,00%	6,24	0,65	10,35
Moído (seco)	1,50%	7,04	1,21	17,22
Moído (seco)	2,00%	5,69	0,84	14,78
Sem moer (seco)	0,50%	4,71	0,44	9,40
Sem moer (seco)	1,00%	3,90	1,12	28,64
Sem moer (seco)	1,50%	5,65	0,54	9,57
Sem moer (seco)	2,00%	4,48	0,30	6,79
Moído (saturado)	0,50%	5,27	1,36	25,85
Moído (saturado)	1,00%	6,64	0,64	9,71
Moído (saturado)	1,50%	7,40	1,56	21,00
Moído (saturado)	2,00%	5,32	0,83	15,64
Sem moer (saturado)	0,50%	5,36	1,34	25,00
Sem moer (saturado)	1,00%	5,66	0,22	3,89
Sem moer (saturado)	1,50%	7,21	0,24	3,39
Sem moer (saturado)	2,00%	4,90	0,37	7,50

Fonte: Autor, 2023

Os resultados dos testes indicam que a adição dos resíduos de papel moeda tanto seco quanto saturados em água apresentam de uma maneira geral melhorias nos corpos de prova. Sendo que o pico de maior valor de resistência à flexão é obtido quando são substituídos 1,5% em relação a massa de cimento dos compósitos. Onde foi determinado um valor máximo de 7,40 MPa para os corpos de prova com resíduos moídos e saturados, sendo essa melhoria de 34,00% em relação a 5,52 MPa determinado pela referência.

Além disso, é evidenciado pelos dados uma tendência de variação entre os resultados obtidos, que hora aumentam e/ou diminuem durante as substituições pré-definidas para um mesmo resíduo do papel moeda, podendo ser explicada pela falta de distribuição dos resíduos dentro do compósito, e que pode ser observado na figura 13, fazendo com que, haja uma variação nos resultados obtidos. No entanto, também percebemos que ao atingir 2% de substituição dos resíduos esses valores decrescem de maneira considerável,

chegando a 4,48 MPa, mostrando que, essa seria a porcentagem limite de substituição dos resíduos de papel moeda.

Tais melhorias também foram observados por Machado [31] que encontrou valores de 30,34% de melhorias na substituição de 0,2% de celulose em pastas de cimento. E também por Dias [32] que obteve um valor superior de 8,4 MPa com a adição de 0,5% de fibras de papel kraft, em relação a 8,3 MPa para a referência. Para a referida autora, este foi o valor pico atingido, visto que, a partir de 1,0 % de substituição os valores de resistência à flexão começaram a cair.

É notório que os maiores valores obtidos para resistência à flexão, ao analisarmos o pico de 1,5% de substituição, se refere tanto aos resíduos de papel moído ou sem moer, que passaram por tratamento aquoso e foram saturados. Evidenciando dessa maneira, o benefício do tratamento.

Figura 13 – Distribuição desordenada dos resíduos dentro do compósito cimentício



Fonte: Autor, 2023

4 CONCLUSÃO

O objetivo desse estudo foi avaliar a eficiência da utilização de resíduos de papel moeda ao ser aplicado em matrizes a base de cimento. A pesquisa teve início com a caracterização dos resíduos de papel moeda em que foram encontrados níveis relativamente altos de extrativos totais, que podem ter tido uma influência no tempo de hidratação do cimento, evidenciada nos ensaio de calorimetria. Além da presença de titânio, encontrado no ensaio de FRX, devido a pigmentação do referido papel.

No intuito de agregar melhorias para esse experimento, foram realizados tratamentos aquosos no resíduo do papel moeda.

Deste modo, a avaliação dos compósitos pela microscopia eletrônica de varredura (MEV), indicou eficientes interações entre a matriz cimentícia e o resíduo de papel moeda, tanto no estado seco e saturado, evidenciada pelas partículas de hidratação no entorno do resíduo.

Quanto ao comportamento mecânico dos compósitos, esses apresentarem valores inferiores a referência ao se tratar do ensaio de resistência a compressão. Em contrapartida, apresentaram valores satisfatórios no ensaio de resistência a flexão, quando substituídos 1,5% da massa de cimento pelo resíduo de papel moeda, evidenciando melhorias de 34% em relação ao valor encontrado no traço de referência. Ainda, tais melhorias foram obtidas pelos resíduos que passaram pelo tratamento aquoso, evidenciando a eficiência do tratamento. No entanto, é notório observar que com 2% de substituição os valores de resistência começam a cair consideravelmente para os tratamentos realizados.

Com os resultados apresentados verifica-se que a aplicação de tratamento aquoso no resíduos de papel moeda é eficiente para garantir uma melhoria nas propriedades mecânicas dos compósitos. Além disso, os compósitos desenvolvidos apresentam um caminho promissor no desenvolvimento de materiais reforçados com resíduos de cédulas brasileiras.

REFERÊNCIAS

- [1] SIDDIKA , A., et al. **Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: a review**. *Constr Build Mater* 2019; 224: 711–731.
- [2] MARINKOVIĆ S, DRAGAŠ J, IGNJATOVIĆ I, et al. **Environmental assessment of green concretes for structural use**. *J Clean Prod* 2017; 154: 633–649.
- [3] FIOL, F., THOMAS, C., MUNOZ, C., et al. **The influence of recycled aggregates from precast elements on the mechanical Properties of structural self-compacting concrete**. *Constr Build Mater* 2018; 182: 309–323.
- [4] MEYER C. **The greening of the concrete industry**. *Cem Concr Compos* 2009; 31(8): 601–605.
- [5] TORGAL FP AND JALALI S. **Natural fiber reinforced concrete**. In: Figueiro R (ed.) *Fibrous and composite materials for civil engineering applications*. Amsterdam, The Netherlands.
- [6] KURDA R, DE BRITO J AND SILVESTRE JD. **A comparative study of the mechanical and life cycle assessment of high-content fly ash and recycled aggregates concrete**. *J Build Eng* 2020;29: 101173.
- [7] RAHEEM AA AND IKOTUN BD. **Incorporation of agricultural residues as partial substitution for cement in concrete and mortar – a review**. *J Build Eng* 2020; 31: 101428.
- [8] LI V.C., **On engineered cementitious composites (ECC)**, *Journal of advanced concrete technology*, v.1, n. 3, pp.215-230, 2003.
- [9] FANGUEIRO R AND SOUTINHO F. **TEXTILE STRUCTURES**. In: Figueiro R (ed.) **Fibrous and composite materials for civil engineering applications**. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2011, pp.62–91.
- [10] KHANDELWAL S AND RHEE KY. **Recent advances in basaltfiber- reinforced composites: tailoring the fiber-matrix interface**. *Compos B Eng* 2020; 192: 108011.
- [11] LI, V.C., “**Advances in ECC research**”, *ACI Special Publications*, v.206, n. 373-400, 2002.
- [12] LI V.C., **On engineered cementitious composites (ECC)**, *Journal of advanced concrete technology*, v.1, n. 3, pp.215-230, 2003.
- [13] FERNANDO, S, et, al. **Sustainable Cement Composite Integrating Waste Cellulose Fibre: A comprehensive Review**. *Polymers* **2023**, 15, 520.
<https://doi.org/10.3390/polym15030520>.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14853: madeira: **determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona**. Rio de Janeiro, 2010. 3 p.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7989: **pasta celulósica e madeira: determinação de lignina insolúvel em ácido**. Rio de Janeiro, 2010. 6 p.

- [16] BROWNING B. L. **The Chemistry of Wood. Science**, 1963. 1564 p.
DOI:10.1126/science.142.3599.1564.b
- [17] KENNEDY, F.; PHILLIPS, G.O.; WILLIAMS, E. P.A. **Wood and celluloses: industrial utilization biotechnology, structure and properties, ellis horwood**. Chichester: E. Horwood, 1987. 1130 p.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13999: **papel, cartão, pastas celulósicas e madeira: determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525°C**. Rio de Janeiro, 2003. 4 p.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9778 - **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2009.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7215 - **Cimento Portland – determinação da resistência a compressão**. Rio de Janeiro, 2019.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13279 - **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 2005.
- [22] GARCEZ, L.R.O; et, al.**REAPROVEITAMENTO CELULÓSICO DO PAPEL MOEDA RETIRADO DE CIRCULAÇÃO**.2021. Disponível em:
<https://silo.tips/download/reaproveitamento-celulosico-do-papel-moeda-retirado-de-circulacao>. Acesso em: 06 de junho de 2022.
- [23] NAZERIAN, M.; GOZALI, E.; GHALEHNO, M.D. **The influence of wood extractives and additives on the hydration kinetics of cement paste and cement-bonded particleboard**. Journal of Applied Sciences, Pakistan, v. 11, n. 12, p. 2186-2192, 2011.
- [24] BILCATI, Géssica Katalyne. **Produção de painéis de cimento Portland reforçados com fibra de curauá (Ananas erectifolius)**. 2015. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- [25] SANTOS, Carlos Eduardo dos. **Potencial de desenvolvimento de biocombustível produzido a partir de bio-óleo da pirólise de papel moeda descartado**. 2014. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - Unisinos, São Leopoldo, 2014.
- [26] COURET, L., IRLE, M., BELLONCLE, C. *et al.* **Extraction and characterization of cellulose nanocrystals from post-consumer wood fiberboard waste**. *Cellulose* **24**, 2125–2137 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1252-7>
- [27] SATHISHKUMAR T. **Influence of cellulose water absorption on the tensile properties of polyester composites reinforced with Sansevieria ehrenbergii fibers**. *Journal of Industrial Textiles*. 2016;45(6):1674-1688.
- [28] SALEIRO, G T et al. **Avaliação das fases cristalinas de dióxido de titânio suportado em cerâmica vermelha**. *Cerâmica*, v. 56, p. 162 – 167.

[29] BENTCHIKOU, M.; GUIDOUM, A.; SCRIVENER, K.; SILHADI, K.; SALAH, H. **Effect of recycled cellulose fibres on the properties of lightweight cement composite matrix. Construction and Building Materials**, v. 34, p. 451-456, 2012.

[30] MARTINS, D. V. A.; SOARES, L. M.. **Avaliação do desempenho de revestimentos de argamassa com fibras de papel kraft proveniente de embalagens de cal.** Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016

[31] MACHADO, MARINARA DA SILVA. **UTILIZAÇÃO DE CELULOSE PROVENIENTE DE RESÍDUOS DA AGRICULTURA COMO REFORÇO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS**, 2021.

[32] DIAS, RAÍSSA ARVELLOS. **AVALIAÇÃO DA INTERFERÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE PAPEL KRAFT EM ARGAMASSAS**, 2017.