

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MATHEUS PEREIRA DE LACERDA

**EFEITO DA CELULOSE NANOFIBRILADA NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS
DE REVESTIMENTO**

GUARAPUAVA

2022

MATHEUS PEREIRA DE LACERDA

**EFEITO DA CELULOSE NANOFIBRILADA NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS
DE REVESTIMENTO**

Effect of nanofibrillated cellulose on coating mortar production

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Géssica Katalyne Bilcati.
Coorientador(a): Rafaella Salvador Paulino.

GUARAPUAVA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

MATHEUS PEREIRA DE LACERDA

**EFEITO DA CELULOSE NANOFIBRILADA NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS
DE REVESTIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 15/dezembro/2022

Géssica Katalyne Bilcati
Mestra
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Guarapuava

Rafaella Salvador Paulino
Mestra
Faculdade Guarapuava

Laura Silvestro
Doutora
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Guarapuava

Sarah Honorato Lopes da Silva
Doutora
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Apucarana

GUARAPUAVA

2022

Dedico este trabalho à minha mãe Ana Maria, por
fazer o possível e o impossível por mim

AGRADECIMENTOS

Agradeço pela oportunidade de estar vivo e por ter a capacidade de experienciar o mundo como ser humano. Nosso tempo nesse lugar é incrivelmente curto e nossa experiência sendo quem nós somos é única, pontual e só acontece uma vez. A vida é simples e complexa ao mesmo tempo, construída sobre mecanismos que não entendemos por completo e regida por forças tanto visíveis quanto invisíveis. Sou grato de fazer parte de tudo isso.

Agradeço imensamente à minha mãe Ana Maria, que abriu mão de muita coisa e sacrificou diversas outras para me proporcionar condições de completar a graduação e também cuidar de mim no momento que eu mais precisei. Espero um dia retribuir pelo menos metade do que ela fez por mim até hoje. Sou grato pela relação de amor que construímos.

Agradeço aos meus avós José e Paula pela criação e afeto que me proporcionaram enquanto estiveram conosco nessa vida. Os gestos mais simples são os que permanecem por mais tempo na memória. Queria ter compartilhado mais da minha vida com eles.

Agradeço à minha avó Rose, ao meu pai Roni, aos meus irmãos Zaion Luca e Juan Maximus, à minha tia Val e aos meus primos Eloah e Enzo. Sou grato por me acolherem num dos meus piores momentos. Com eles eu pude dar outro significado à palavra “família” e conhecer sentimentos que eu nunca tinha antes sentido.

Agradeço aos meus veteranos João Paulo e Lorena Maia por estarem sempre presentes, pelo companheirismo e pelos momentos juntos. Com certeza fizeram dessa caminhada um processo mais leve.

Agradeço aos meus amigos de graduação Gabriela Furtado, Luana Tiemi, Alessandra Sakuramoto, Sidney Neto, Daniel Oliveira, Victor Miashiro, Erika Cavalheiro, Leonardo Torres, Kaique Costa, Bruna Sahaidak, Caio Oliveira, Igor Rossi, Alex Novak e Nicole Hansen. Minha trajetória na cidade de Guarapuava foi marcada por cada um deles de forma única e sem dúvida todos eles contribuíram para me manter firme durante o curso.

Agradeço ao meu amigo Gabriel Alves, que me ofereceu suporte em momentos extremamente difíceis, e também à família Querobino, minha segunda

família e minha segunda casa. Sem o amparo deles eu dificilmente teria condições de continuar lutando pelos meus objetivos.

Agradeço à Brick - Empresa Júnior de Engenharia Civil e aos seus membros, pela experiência profissional e pelos momentos únicos que mudaram a minha visão sobre a graduação. Cada evento dentro da EJ foi único e com certeza fizeram de mim uma pessoa melhor.

Agradeço à minha orientadora Gêssica Bilcati e à minha coorientadora Rafaella Salvador pela disponibilidade, paciência, puxões de orelha, assistência e cuidado que prestaram a mim nesses meses de pesquisa. Elas puderam ver de perto o quão árduo foi o período de desenvolvimento desse trabalho, mas que sem a ajuda delas poderia ter sido mais difícil ainda, senão impossível.

Por fim, agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo ensino gratuito, público e de qualidade.

RESUMO

A aplicação de adições de nanomateriais à base de celulose aos materiais cimentícios é interessante pois utiliza uma matéria-prima renovável e de grande disponibilidade global. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da adição de polpa de celulose nanofibrilada (CNF) em argamassas de revestimento, analisando suas propriedades no estado fresco e endurecido. Como resultado, observou-se uma redução de 2,4% no espalhamento do tratamento com 1,5% de polpa de CNF em relação à argamassa de referência. Além disso, foi possível notar uma maior coesão das argamassas com adição de CNF devido a um aumento de 0,48% na densidade de massa dos tratamentos, bem como uma diminuição de 20,64% do teor de ar incorporado. No estado endurecido, percebeu-se um aumento da absorção de água tanto por capilaridade quanto por imersão nas argamassas à medida que o teor de CNF aumentava. Além disso, verificou-se que as amostras com CNF se mostraram estatisticamente iguais às amostras de referência no que diz respeito à resistência à compressão na maior parte dos casos. Por fim, foi possível evidenciar que, à medida que o teor de CNF aumentava, o ganho da resistência ocorria mais tardiamente nas amostras estudadas.

Palavras-chave: nanomateriais; celulose nanofibrilada; argamassa de revestimento.

ABSTRACT

The application of cellulose-based nanomaterials additions to cementitious materials is interesting because it uses a renewable raw material with great global availability. The present work aimed to evaluate the effect of adding nanofibrillated cellulose pulp (NFC) in coating mortars, analyzing its properties in the fresh and hardened state. As a result, a spreading reduction was observed in the treatments with NFC pulp compared to the reference mortar. In addition, an increase in the mass density of the treatments was noticed, as well as a decrease in the incorporated air content. In the hardened state, an increase in water absorption was observed both by capillarity and by immersion in the mortars with the addition of NFC pulp. Also, it was found that the samples with CNF were statistically equal to the reference samples concerning compressive strength in most cases. Finally, it was possible to show that, as the NFC percentage increased, the increase in resistance occurred later in the studied samples.

Keywords: nanomaterials; nanofibrillated cellulose; coating mortar.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema da cinética de hidratação do cimento Portland	22
Figura 2 - Estrutura hierárquica da madeira: (ML) lamela central, (P) parede primária, (S1) camada exterior, (S2) camada central e (S3) camada interna da parede secundária, (W) camada rugosa, (C) celulose, (H) hemicelulose, (L) lignina, (MF) microfibrila, (EF) fibrila elementar, (Cr) domínio cristalino e (Am) domínio amorfo	24
Figura 3 - Microscopia eletrônica de transmissão de (a) CNC's e (b) CNF's	25
Figura 4 - Tipos de celulose em escala nanométrica e seus usos	26
Figura 5 - Esquema resumido do programa experimental	30
Figura 6 - Materiais utilizados na produção das argamassas da pesquisa: (a) cimento Portland CP II-32, (b) cal hidratada CH-III, (c) areia natural lavada de rio, (d) água do abastecimento público e (e) polpa de celulose nanofibrilada.....	31
Figura 7 - Esquema detalhado do programa experimental.....	34
Figura 8 - Aspecto das argamassas produzidas. Relação água cimento de: (a) 1,5; (b) 1,75; (c) 2; (d) 2,25; (e) 2,35 e (f) 2,5	42
Figura 9 - Argamassa logo após remoção do tronco de cone na <i>flow table</i>	44
Figura 10 - Medição do diâmetro de espalhamento da argamassa usando o paquímetro.....	45
Figura 11 - Moldes cilíndricos preenchidos e identificados.....	48
Figura 12 - Corpos de prova dispostos dentro de um balde com água	50
Figura 13 - Corpo de prova centrado na prensa EMIC.....	51
Figura 14 - Curva granulométrica da areia.....	53
Figura 15 - Curva de inchamento da areia	54
Figura 16 - Índice de consistência das argamassas	56
Figura 17 - Densidade de massa e teor de ar incorporado das argamassas	58
Figura 18 - Aparência dos corpos de prova de cada um dos tratamentos: (a) REF 0,0%, (b) CNF 1,5%, (c) CNF 2,5% e (d) CNF 3,5%	59
Figura 19 - Absorção de água por capilaridade média das argamassas aos 10 e aos 90 minutos	60
Figura 20 - Coeficiente de capilaridade médio das argamassas.....	61

Figura 21 - Padrão visual na altura da água que subiu por capilaridade nos corpos de prova: (a) REF 0,0%, (b) CNF 1,5%, (c) CNF 2,5% e (d) CNF 3,5%.....	62
Figura 22 - Absorção de água por imersão das argamassas	63
Figura 23 - Resistência à compressão das argamassas	65
Figura 24 - Diferenças não significativas das médias entre os tratamentos	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das argamassas	20
Tabela 2 - Especificações físicas e químicas do cimento	31
Tabela 3 - Relação água/cimento e índice de consistência resultante	42
Tabela 4 - Volume de água necessário para cada tratamento.....	43
Tabela 5 - Massa específica e massa unitária dos aglomerantes	52
Tabela 6 - Massa específica e massa unitária da areia	52
Tabela 7 - Composição granulométrica da areia	53
Tabela 8 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação do índice de consistência das argamassas.....	56
Tabela 9 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação da densidade de massa e do teor de ar incorporado das argamassas	57
Tabela 10 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação da absorção de água por capilaridade das argamassas aos 10 e 90 minutos	60
Tabela 11 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação do coeficiente de capilaridade das argamassas.....	61
Tabela 12 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação da absorção de água por imersão das argamassas	63
Tabela 13 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação da resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias das argamassas	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Influência das fases mineralógicas do cimento no processo de hidratação de materiais cimentícios.....	22
Quadro 2 - Especificações físicas e químicas da cal hidratada.....	32
Quadro 3 - Características da celulose nanofibrilada.....	33
Quadro 4 - Ensaio de caracterização dos materiais.....	35
Quadro 5 - Nomenclatura do tratamento, traço utilizado e consumo de materiais para produzir as argamassas.....	40
Quadro 6 - Quantidade de corpos de prova por tratamento.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	Água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de variância
C.V.	Coefficiente de variação
CNC	Celulose nanocristalina
CNF	Celulose nanofibrilada
Desv. Pad.	Desvio padrão
IC	Índice de consistência
<i>LWA</i>	<i>Lightweight Aggregates</i>
NBR	Norma Brasileira
REF	Referência
Coef.	Coefficiente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	17
1.1.1	Objetivo geral	17
1.1.2	Objetivos específicos.....	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1	Argamassa de revestimento.....	18
2.1.1	Propriedades da argamassa de revestimento no estado fresco.....	19
2.1.2	Propriedades da argamassa de revestimento no estado endurecido.....	20
2.2	Materiais celulósicos	23
2.2.1	Tratamentos da celulose	24
2.2.2	Celulose nanofibrilada (CNF)	26
<u>2.2.2.1</u>	<u>Celulose nanofibrilada (CNF) em materiais cimentícios.....</u>	<u>27</u>
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	29
3.1	Materiais	30
3.2	Métodos.....	33
3.2.1	Caracterização dos materiais	34
3.2.2	Formulação das argamassas	40
3.2.3	Procedimento de mistura.....	41
3.2.4	Estimativa da relação água/cimento.....	41
3.2.5	Correção do volume de água	43
3.2.6	Ensaio de caracterização das argamassas no estado fresco	43
3.2.7	Ensaio de caracterização das argamassas no estado endurecido.....	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
4.1	Caracterização dos materiais	52
4.1.1	Caracterização dos aglomerantes	52
4.1.2	Caracterização do agregado miúdo.....	52
4.1.3	Caracterização da celulose nanofibrilada.....	55
4.2	Caracterização das argamassas no estado fresco.....	55
4.2.1	Índice de consistência	55
4.2.2	Densidade de massa e teor de ar incorporado.....	57

4.3	Caracterização das argamassas no estado endurecido	59
4.3.1	Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade.....	59
4.3.2	Absorção de água por imersão	63
4.3.3	Resistência à compressão	64
5	CONCLUSÃO	68

1 INTRODUÇÃO

As argamassas de revestimento desempenham um papel muito importante em sistemas de alvenaria, sendo responsáveis pela estética e conforto das edificações, bem como pela estanqueidade e durabilidade dos elementos de parede nas quais são aplicadas (HADDAD, 2020). Dessa maneira, os sistemas de revestimento argamassado são fundamentais para a conservação dos edifícios, uma vez que são capazes de absorver as deformações naturais às quais as alvenarias estão sujeitas (HOBOLD, 2015).

De modo a ampliar as possibilidades de utilização de novos produtos dentro da construção civil, pesquisas que buscam o aprimoramento das propriedades dos materiais cimentícios, como argamassas para revestimento, têm ganhado força nos últimos anos (ARARUNA, 2021).

Como resultado do avanço da nanotecnologia nos últimos anos, a adição de nanomateriais vem possibilitando diversas melhorias nas propriedades de materiais cimentícios (MARTINS *et al.*, 2019), como aumento do desempenho mecânico e durabilidade (RECHES, 2018).

Um dos nanomateriais que pode ser adicionado em argamassas é a celulose nanofibrilada (CNF), produzida a partir do isolamento da parede das células de materiais compostos por lignina e celulose. O processo de obtenção desse material é dado por desfibrilação mecânica e dispensa o uso de produtos químicos ácidos, prejudiciais ao meio ambiente (HASSAN *et al.*, 2012).

Devido ao seu potencial hidrofílico, alta reatividade e elevada área superficial específica, a incorporação de celulose nanofibrilada em materiais cimentícios aumenta a resistência à compressão (a depender do teor e da dispersão do material), além de proporcionar uma maior formação de produtos de hidratação do cimento no início da cura (MEJDOUB *et al.*, 2017).

Levando em consideração a importância de revestimentos de argamassa na construção civil e a necessidade de utilizar materiais provenientes de fontes renováveis (MARTINS *et al.*, 2019), é pertinente avaliar os efeitos da adição de

nanomateriais à base de celulose em argamassas de revestimento, a fim de validar seu desempenho e motivar sua possível incorporação no mercado.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a influência da adição de celulose nanofibrilada (CNF) no desempenho de argamassas para revestimento.

1.1.2 Objetivos específicos

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

- Produzir argamassas de revestimento com teores de adição de celulose nanofibrilada (CNF);
- Caracterizar as argamassas no estado fresco de acordo com a normatização técnica;
- Avaliar o desempenho mecânico das argamassas de revestimento com adição de celulose nanofibrilada (CNF) em diferentes fases de hidratação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Argamassa de revestimento

As argamassas de revestimento são materiais produzidos a partir de cimento, cal e areia. Elas são utilizadas na construção de edifícios há muito tempo, aproximadamente desde o período micênico da Grécia antiga, que compreendeu os anos de 1600 a 1100 a.C. (SILVA *et al.*, 2009). Desde então, diferentes técnicas de produção de argamassa vêm sendo criadas pela humanidade para atender as necessidades crescentes do mercado da construção civil.

Conforme definida pela NBR 13281 (ABNT, 2005), argamassa é uma “mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria”, a qual pode ser empregada no revestimento de paredes e tetos.

De forma geral, as principais propriedades das argamassas no estado fresco podem ser resumidas em: trabalhabilidade, consistência, retenção de água, densidade de massa e teor de ar incorporado. Por sua vez, as propriedades mais importantes das argamassas no estado endurecido são a densidade, a resistência mecânica, a absorção de água e módulo de elasticidade (ARAÚJO, 2017). Devido à relevância das propriedades mencionadas, algumas delas serão discutidas na sequência deste trabalho.

Para avaliar as propriedades das argamassas de revestimento, é necessário investigar a influência que cada material constituinte exerce no estado fresco e endurecido. Conforme aponta Rato (2006), o desempenho das argamassas depende das propriedades dos componentes empregados para sua produção: o tipo de aglomerante, a natureza mineralógica e granulométrica do agregado miúdo e eventuais adições.

É importante ressaltar que o ajuste de parâmetros no estado fresco, como o aumento da relação água/cimento, reflete diretamente nas propriedades do estado endurecido, resultando por exemplo em uma baixa resistência à compressão

(ZHANG, 2006). Assim, estimar a trabalhabilidade no estado fresco é um fator que depende da quantidade de água presente, do empacotamento das partículas e da área superficial dos sólidos da mistura (LI, 2018).

De forma similar, a granulometria do agregado miúdo é fundamental para o processo de dosagem da argamassa e pode influenciar diretamente no volume de água necessário, na porosidade, na resistência e também na durabilidade da argamassa final (MEDEIROS, 2019).

2.1.1 Propriedades da argamassa de revestimento no estado fresco

Termos como trabalhabilidade, consistência e plasticidade são utilizados para se referir ao comportamento das argamassas no estado fresco, de maneira a avaliar a homogeneidade da mistura, simular o processo de lançamento (manuseio dos pedreiros) e o processo de adensamento.

A trabalhabilidade, característica resultante de várias outras propriedades (tais como consistência, plasticidade, coesão, retenção de água, exsudação, tempo de pega e adesão inicial), é um dos conceitos mais importantes relacionados ao estado fresco, já que ela impacta diretamente no manuseio do material (SOUSA; BAUER, 2003). Entretanto, a sua avaliação depende da sensibilidade e experiência dos trabalhadores envolvidos (SOUSA; BAUER, 2002). Por isso, Giroto *et al.* (2014) explicam que o conceito de trabalhabilidade deve ser traduzido em medidas reológicas mensuráveis para que essa avaliação seja de comum interpretação.

Cardoso (2009) esclarece que o uso combinado de técnicas de caracterização e a aplicação de conceitos de ciência dos materiais possibilitam um elevado nível de compreensão do comportamento das argamassas. Além disso, Turra (2016) também afirma que todos esses fatores são bastante complexos e definem diretamente os aspectos reológicos das argamassas, como a consistência e a plasticidade.

Um dos ensaios mais realizados na caracterização de argamassas no estado fresco é a avaliação da consistência, o qual pode ser realizado em grande parte dos laboratórios de materiais de construção civil (BAUER; SOUSA, 2005).

A densidade de massa e o teor de ar incorporado são outros dois parâmetros no estado fresco que também afetam a trabalhabilidade da argamassa. Argamassas muito densas, por exemplo, dificultam o manuseio da mão-de-obra, pois demandam uma maior força para a aplicação.

Usualmente, para diminuir ainda mais a densidade de massa das argamassas, são utilizados agregados leves, tais como a argila expandida, perlita e vermiculita, também conhecidos como *lightweight aggregates (LWA)*. O emprego desses materiais vem em decorrência da necessidade do mercado de soluções inovadoras para executar projetos cada vez mais exigentes e desafiadores (PALOMAR *et al.*, 2015).

Tendo em vista essa diversidade de parâmetros característicos, é possível definir classes de argamassa de revestimento de acordo com suas propriedades. Os parâmetros que descrevem cada uma das classes, de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005), estão descritos na Tabela 1. A saber: resistência à compressão (P), densidade de massa no estado fresco (D) e coeficiente de capilaridade (C).

Tabela 1 - Classificação das argamassas

Classe	C (g/dm ² .min ^{1/2})	D (kg/m ³)	P (MPa)
1	≤ 1,5	≤ 1400	≤ 2,0
2	1,0 a 2,5	1200 a 1600	1,5 a 3,0
3	2,0 a 4,0	1400 a 1800	2,5 a 4,5
4	3,0 a 7,0	1600 a 2000	4,0 a 6,5
5	5,0 a 12,0	1800 a 2200	5,5 a 9,0
6	> 10,0	> 2000	8,0

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

Embora o texto da NBR 13281:2005 exija a impressão da classificação nas embalagens de argamassas industrializadas, não é especificada a classe exigida para cada condição de utilização, como apontam Bauer *et al.* (2015).

2.1.2 Propriedades da argamassa de revestimento no estado endurecido

Um fato conhecido sobre as argamassas no estado endurecido é que suas propriedades são determinadas pela microestrutura obtida ainda no estado fresco.

Como exemplo disso, é possível dizer que uma quantidade maior de pontos de contato dos agregados no estágio inicial da argamassa favorece uma diminuição do índice de vazios e uma uniformização do tamanho dos poros, aumentando por consequência a densidade da argamassa (SEFFF, 2009).

As propriedades de absorção de água por capilaridade, resistência à compressão, resistência à tração na flexão e densidade de massa aparente são bastante importantes na classificação e diferenciação de argamassas (SILVA, 2005).

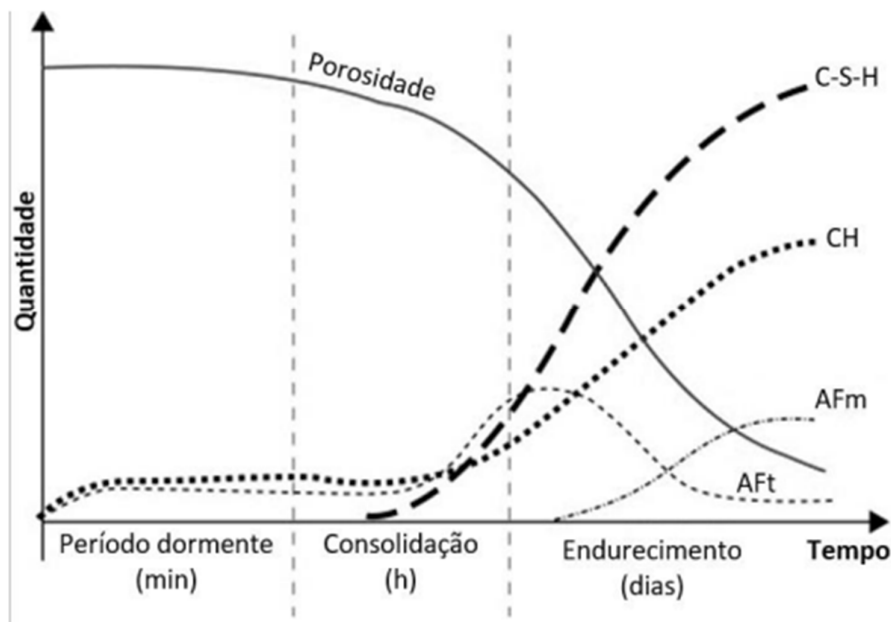
O parâmetro de absorção de água por capilaridade de uma argamassa se torna bastante relevante a depender do ambiente ao qual a argamassa será empregada. Segundo Marvila *et al.* (2017), a sucção capilar é um dos meios de transporte mais relevantes para a entrada de agentes agressivos nos poros das argamassas, o que acaba afetando sua durabilidade.

O mecanismo de transporte de água por capilaridade pode ser definido como um fluxo vertical, originado na base do revestimento de argamassa, que ascende através dos seus poros. Em outras palavras, é a propriedade de um material de promover a sucção de água ao entrar em contato com ela, sendo afetada por diferentes fatores, como as forças de tensão superficial, dimensão dos raios capilares e o ângulo de contato (SANTANA, 2016).

De forma semelhante, o parâmetro de absorção de água por imersão também é essencial na classificação das argamassas pois ratifica os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade.

Por sua vez, a reação de hidratação do cimento Portland se trata de uma reação exotérmica entre o pó mineral e a água, gerando hidratos. Os produtos de hidratação do cimento Portland que se formam são: o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), a portlandita (CH), a etringita (AFt), o monossulfoaluminato (AFm), o monocarbonato e o hemicarbonato. Vale lembrar que o fíler calcário, presente na maior parte dos cimentos comercializados atualmente, favorece a formação de carboaluminatos. A velocidade que essas reações acontecem podem ser divididas cineticamente em três períodos, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Esquema da cinética de hidratação do cimento Portland



Fonte: Gonçalves (2021)

O período dormente geralmente tem duração de poucos minutos, a consolidação acontece ao longo de horas e o endurecimento ocorre ao longo de muitos dias. A formação de etringita e portlandita começa ainda no período dormente, enquanto que grande parte do C-S-H se forma depois desse período, durante a consolidação do material cimentício.

O Quadro 1 mostra um resumo da importância das principais fases do cimento no processo de hidratação.

Quadro 1 - Influência das fases mineralógicas do cimento no processo de hidratação de materiais cimentícios

Composto cimentício	Influência no cimento
Alita	Resistência inicial
Belita	Resistência tardia
Aluminato	Início de pega
Ferrita	Resistência a sulfatos
Arcanita	Resistência inicial, redução no tempo de pega
Langbeinita cálcica	Resistência inicial, redução no tempo de pega
Cal livre/Portlandita	Hidratação expansiva $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$
Periclásio (MgO)	Hidratação expansiva $\text{MgO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg(OH)}_2$

Calcita	Carbonatação
Dolomita (CaCO ₃ .MgCO ₃)	Carbonatação
Gipsita	Retardador/controlador de pega
Bassanita	Falsa pega
Anidrita	Pega lenta
Etringita secundária	Redução da resistência (quando completamente carbonatada)

Fonte: Adaptado de Gonçalves (2021)

Sendo assim, é possível dizer que as fases presentes e suas proporções impactam diretamente nas propriedades encontradas no produto cimentício, tais como resistência mecânica, tempo de pega e tonalidade do composto.

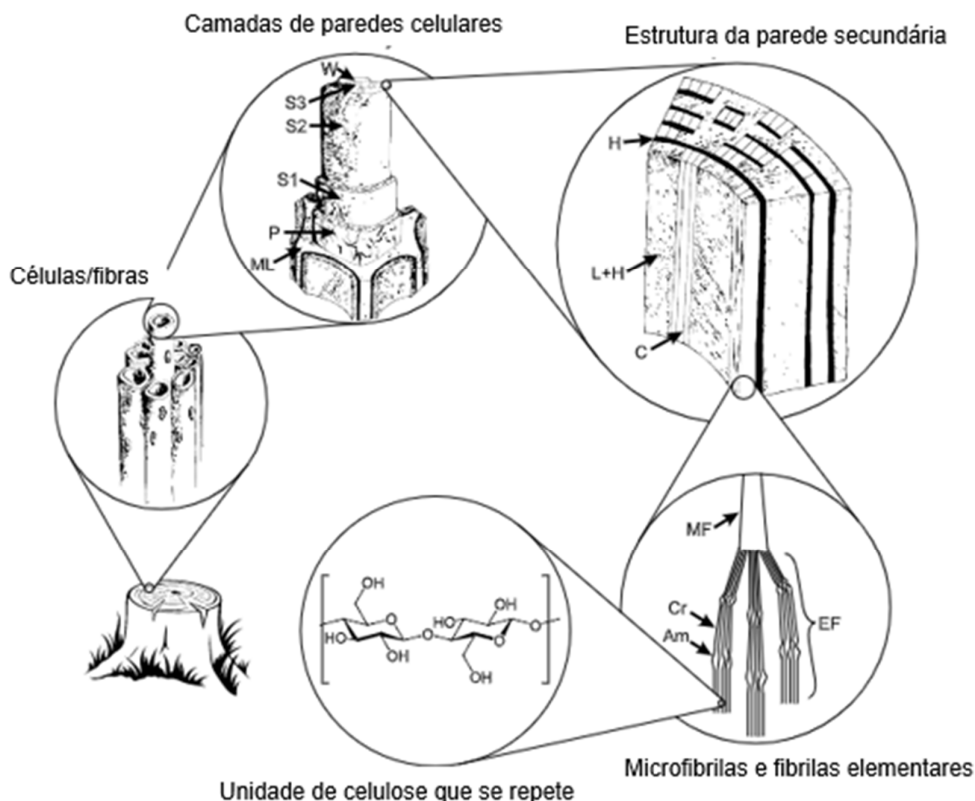
Além disso, a utilização de aceleradores e retardantes para modificar o tempo de consolidação podem reduzir a quantidade de água e afetar a cinética de hidratação em tempos iniciais (GONÇALVES, 2021). Nos últimos anos, a adição de materiais celulósicos tem sido estudada para investigar o grau de influência que as celulosas têm sobre a mineralogia dos compósitos durante a fase de hidratação, como feito por Bilcati *et al.* (2022).

2.2 Materiais celulósicos

A celulose é o polímero natural mais abundante encontrado no planeta (NECHYPORCHUK *et al.*, 2016) e se trata de um material renovável, biodegradável, sustentável e atóxico. Porém, seu uso em aplicações de alto valor agregado ainda é incomum devido à insolubilidade da celulose em água e na maior parte dos solventes orgânicos.

A maior produção comercial de celulose se concentra em fontes como madeira, plantas anuais e resíduos agrícolas. Além de celulose, são encontradas nessas fontes os polímeros hemicelulose e lignina. Por fim, o estado natural em que a celulose se encontra dentro dos organismos é caracterizado por estruturas muito bem organizadas de células compostas de elementos fibrilados. A Figura 2 apresenta o arranjo da parede celular da madeira, local onde se encontra a celulose.

Figura 2 - Estrutura hierárquica da madeira: (ML) lamela central, (P) parede primária, (S1) camada exterior, (S2) camada central e (S3) camada interna da parede secundária, (W) camada rugosa, (C) celulose, (H) hemicelulose, (L) lignina, (MF) microfibrila, (EF) fibrila elementar, (Cr) domínio cristalino e (Am) domínio amorfo



Fonte: Adaptado de NECHYPORCHUK *et al.* (2016)

2.2.1 Tratamentos da celulose

A celulose é base para produção de nanomateriais, como a celulose nanocristalina (CNC), obtida a partir de tratamentos químicos (geralmente utilizando ácidos) e celulose nanofibrilada (CNF) produzida principalmente por desintegração mecânica. O interesse nos materiais nanocelulósicos cresceu de forma bastante significativa nos últimos anos devido às propriedades físicas e químicas desse polímero (NECHYPORCHUK *et al.*, 2016).

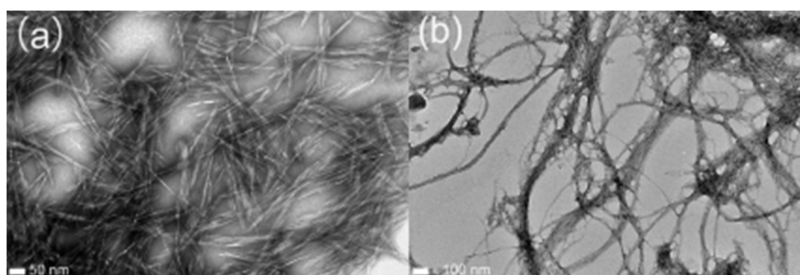
Existe uma grande diferença entre a celulose nanofibrilada e a celulose nanocristalina no que diz respeito às suas dimensões e cristalinidade. CNC's são extremamente cristalinas e geralmente tem um comprimento menor que 500 nm,

enquanto CNF's são constituídas também de cadeias amorfas, além possuírem comprimento maior, alcançando alguns micrômetros (XIE *et al.*, 2018).

Xu *et al.* (2013) contribuíram para a diferenciação de CNF's e CNC's. Os autores perceberam uma estrutura complexa, altamente emaranhada e similar à uma rede nas CNF's, o que contribui para diminuir a fluidez da amostra e resulta num comportamento parecido com um gel. Em contrapartida, a suspensão de CNC's apresentou uma viscosidade muito menor do que as CNF's, mesmo com uma concentração de partículas maior.

A Figura 3 mostra imagens de alta resolução obtidas por meio de microscópio eletrônico de transmissão. Nela, é possível perceber as estruturas cristalinas extremamente ordenadas das CNC's e a estrutura emaranhada como uma rede das CNF's, o que, por si só, pode indicar uma dificuldade na dispersão desse material.

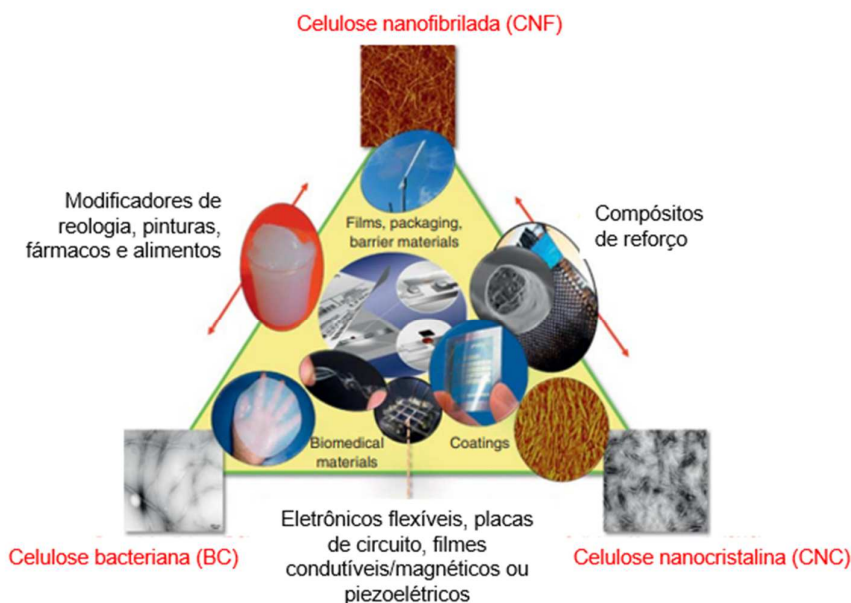
Figura 3 - Microscopia eletrônica de transmissão de (a) CNC's e (b) CNF's



Fonte: XU *et al.* (2013)

Conforme apontado por Zhang *et al.* (2013), nanomateriais compostos de celulose podem ser empregados para diversos fins. A aplicação de CNF's pode se dar em aerogéis, nanocompósitos, filmes de embalagem, compósitos transparentes e nanopapeis. Já as CNC's podem ser utilizadas para construir materiais bioativos, como biosensores, diagnósticos, medicamentos, cultura de células, engenharia de tecidos, agentes antibacterianos e curativos. A Figura 4, elaborada por Xie *et al.* (2018), mostra alguns dos vários usos das celuloses na escala nanométrica.

Figura 4 - Tipos de celulose em escala nanométrica e seus usos



Fonte: Adaptado de XIE *et al.* (2018)

2.2.2 Celulose nanofibrilada (CNF)

A celulose nanofibrilada é preparada por métodos mecânicos através da quebra e homogeneização da matéria-prima sob o efeito de alta pressão. Os equipamentos mais comumente empregados para tratar a celulose nanofibrilada incluem homogeneizadores de alta pressão, refinadores, trituradores, prensas geladas e microfluidizadores (ZHANG, 2013).

A celulose nanofibrilada tem seu maior uso como agente de reforço nas indústrias de papel, cimento, borracha natural, biocompósitos e filmes plásticos para embalagens. Atualmente, o Japão é o país que mais movimenta o mercado de CNF através das fábricas de papel (BALEA *et al.*, 2019). Em levantamento obtido por Petroudy *et al.* (2021), a produção comercial de celulose nanofibrilada globalmente chega a mais de 32 mil toneladas por ano.

Através de revisão de literatura, Boufi *et al.* (2016) concluíram que a adição de CNF's nas polpas de papel se demonstrou uma alternativa eficiente para melhorar suas propriedades, aumentando a resistência e a densidade do papel, ao passo que

diminuía a porosidade e a opacidade. Esse efeito se dá pelo aumento da capacidade ligante das fibras e pelo aumento da área específica superficial da suspensão, o que garante uma maior quantidade de ligações de hidrogênio entre as fibras.

2.2.2.1 Celulose nanofibrilada (CNF) em materiais cimentícios

Para Onuaguluchi *et al.* (2021), a celulose nanofibrilada aumentou a resistência à tração em até quase duas vezes quando 0,1% de CNF foi adicionada a compósitos cimentícios. Entretanto, para teores maiores de adição, obtiveram-se aglomerações na mistura, as quais impactaram negativamente as resistências mecânicas, especialmente para o teor de 0,4%. Isso quer dizer que existe um intervalo de valores de adição de CNF para que os resultados de resistência sejam melhorados.

Deze *et al.* (2022) sugeriram que a capacidade das CNF's de reforçarem os materiais cimentícios é decorrente da combinação da aceleração das reações de hidratação, que acaba aumentando o número de produtos insolúveis, e a diminuição da porosidade.

Garcia (2021) adicionou celulose nanofibrilada ao concreto permeável e percebeu que pequenos incrementos de CNF aumentaram significativamente a espessura da pasta de cimento que envolve os agregados, assim como também aumentaram a resistência à compressão e à tração na flexão.

De forma semelhante, Moraes *et al.* (2018) avaliaram a adição de CNF's em argamassas e perceberam que o caráter hidrofílico desse material fazia com que a relação água/cimento aumentasse. Além disso, foi possível também determinar a dosagem ótima de celulose nanofibrilada (0,2% da massa de cimento).

Kolour (2018), por sua vez, observou que a adição de CNF tanto na pasta de cimento quanto no concreto levou a uma redução na trabalhabilidade, o que sugere que CNF's são capazes de reter água no estado fresco dos compósitos. Isso pode ser associado à maior área específica do material

Guo (2020) concluiu, assim como Kolour (2018), que CNF's podem reduzir a fluidez de materiais cimentícios. Esse efeito pode ser útil em situações em que são

necessários agentes modificadores de viscosidade. Em contrapartida, não houve uma conclusão bem definida em termos da porosidade.

Uma das questões mais discutidas sobre o uso de adições de celulose nanofibrilada em materiais cimentícios é a sua dispersão. Vários autores apontam que as alterações das propriedades dependem diretamente do método de dispersão das partículas (GUO, 2020; ALZOUBI *et al.*, 2020; OH *et al.*, 2022; BILCATI *et al.*, 2022). Assim, teores muito elevados de CNF aliados a uma má dispersão causam aglomerados de celulose, o que traz prejuízo a algumas propriedades.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Esta pesquisa teve como intuito analisar o comportamento de argamassas com adição de celulose nanofibrilada no estado fresco e endurecido mediante quatro diferentes tratamentos.

Na estruturação do programa experimental, foram determinadas as variáveis experimentais, bem como também foram fixadas as variáveis intervenientes. As variáveis desta pesquisa foram:

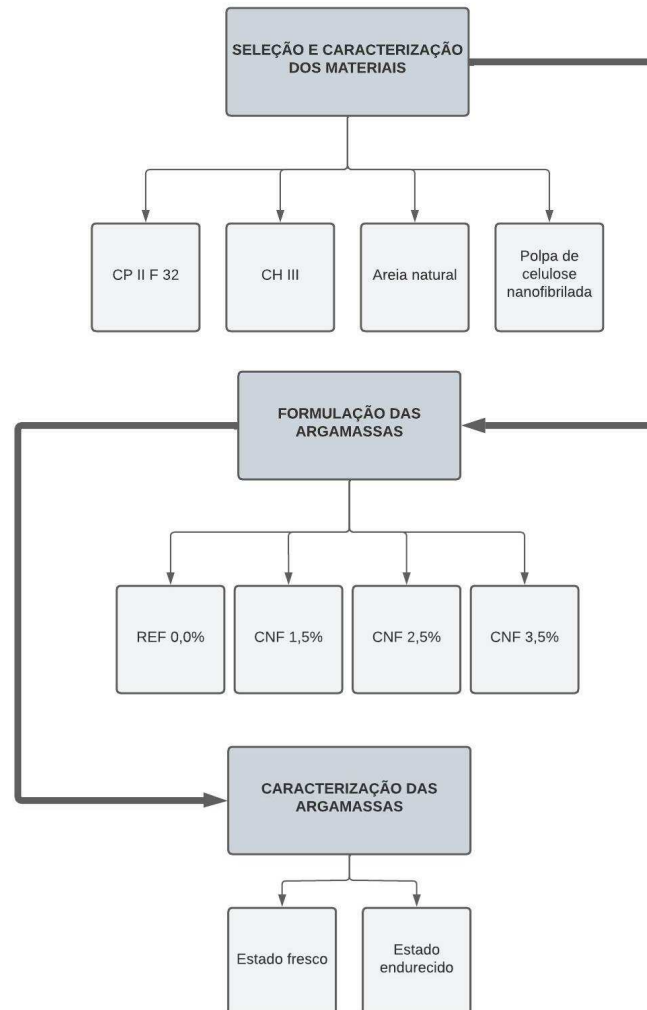
- Porcentagem de adição de polpa de celulose nanofibrilada: (0%, 1,5%, 2,5% e 3,5% em relação à massa de cimento);
- Idade de rompimento dos corpos de prova para determinar a resistência à compressão (7, 14 e 28 dias).

As condições fixas desta pesquisa foram:

- Os materiais utilizados para a produção das argamassas (cimento Portland CP II-F-32, cal hidratada CH-III, areia natural e polpa de celulose nanofibrilada);
- O procedimento de mistura das argamassas, definido pela NBR 16541:2016;
- O traço 1:2:8 de cimento, cal e areia, em volume;
- A relação água/cimento de 2,35.

Na sequência, a Figura 5 apresenta um esquema resumido do programa experimental.

Figura 5 - Esquema resumido do programa experimental

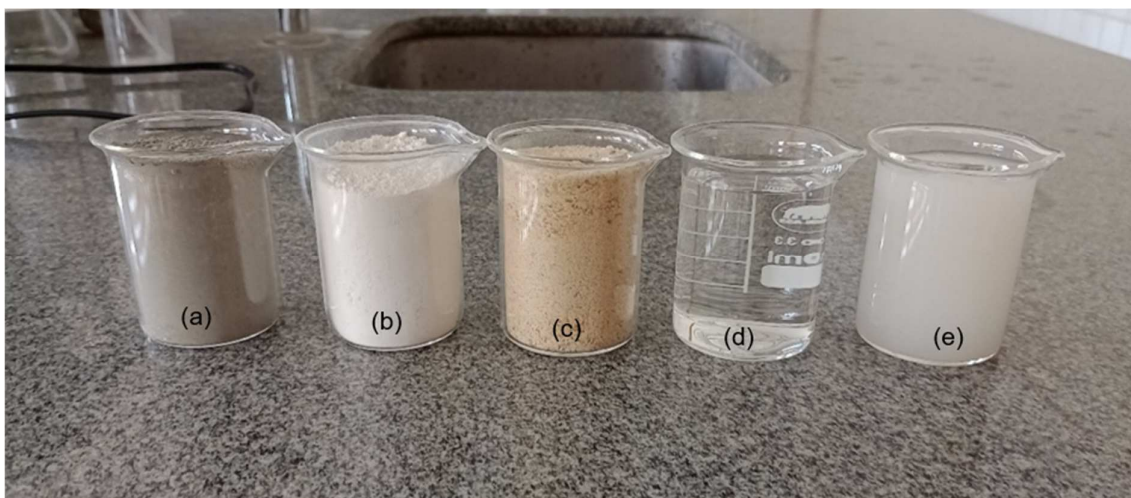


Fonte: Autor (2022)

3.1 Materiais

Os materiais selecionados para compor esta pesquisa foram: cimento Portland CP II F-32, cal hidratada CH-III, areia natural lavada de rio, polpa de celulose nanofibrilada e água. A escolha da cal na composição da argamassa de revestimento do estudo se deu em decorrência da popularidade desse aglomerante nos canteiros de obra brasileiros (SANTIAGO, 2012). A Figura 6 ilustra os materiais que compuseram as argamassas desta pesquisa em béqueres de vidro.

Figura 6 - Materiais utilizados na produção das argamassas da pesquisa: (a) cimento Portland CP II-32, (b) cal hidratada CH-III, (c) areia natural lavada de rio, (d) água do abastecimento público e (e) polpa de celulose nanofibrilada



Fonte: Autor (2022)

Ambos os aglomerantes (cimento Portland CP II F-32 e cal hidratada CH-III) foram escolhidos por terem uma ampla disponibilidade na região de Guarapuava. Tendo isso em vista, buscou-se as normas que regulamentam esses componentes e determinam seus requisitos, as quais são a NBR 16697 (ABNT, 2018) e NBR 7175 (ABNT, 2003), respectivamente. A Tabela 2 apresenta as especificações trazidas pelo fabricante do cimento e o Quadro 2 mostra as informações da cal também fornecidas pelo fabricante

Tabela 2 - Especificações físicas e químicas do cimento

Característica	Valor	Limite NBR 16697:2018
Início do tempo de pega (min.)	195	≥ 60
Fim do tempo de pega (min.)	255	≤ 600
Resistência à compressão - 1 dia (MPa)	15	N/A
Resistência à compressão - 3 dias (MPa)	28,4	≥ 10
Resistência à compressão - 7 dias (MPa)	34,9	≥ 10
Resistência à compressão - 28 dias (MPa)	41,4	≥ 10
Blaine (cm ² /g)	3290	≥ 2600
Resíduo insolúvel (%)	1,08	≤ 7,5
Al ₂ O ₃ (%)	4,18	-
SiO ₂ (%)	18,56	-
Fe ₂ O ₃ (%)	2,65	-
CaO (%)	60,11	-
MgO (%)	3,69	N/A
SO ₃ (%)	2,57	≤ 4,5
Perda ao fogo (%)	6,41	≤ 12,5
CaO livre (%)	1,15	-

Fonte: Fabricante (2022)

Quadro 2 - Especificações físicas e químicas da cal hidratada

Característica	Valor (NBR 7175)
Granulometria #70 (%)	≤ 5
Granulometria #140 (%)	≤ 15
Resíduo insolúvel (%)	≥ 35
Óxidos (%)	≤ 10
CO ₂	≤ 5
Composição	Hidróxido de cálcio, magnésio, silicatos e aluminatos de cálcio

Fonte: Fabricante (2022)

O agregado miúdo utilizado para a produção das argamassas foi a areia natural lavada de rio disponível na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Guarapuava.

Por sua vez, a polpa de celulose nanofibrilada empregada na pesquisa foi produzida no Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal na Universidade Federal do Paraná (UFPR) em 2016. Esse material foi preparado a partir da espécie *Pinus sp.*, o qual foi submetido a um processo de desintegração mecânica em moinho Bauer durante cinco minutos. Essa etapa teve como objetivo promover a individualização da celulose nanofibrilada, obtendo-se uma baixa concentração (1%). Em seguida, o material resultante foi lavado, teve seu excesso de licor de cozimento retirado, e centrifugado.

Onuaguluchi *et al.* (2021) fornecem características sobre a celulose nanofibrilada (CNF) conforme mostrado no Quadro 3.

Quadro 3 - Características da celulose nanofibrilada

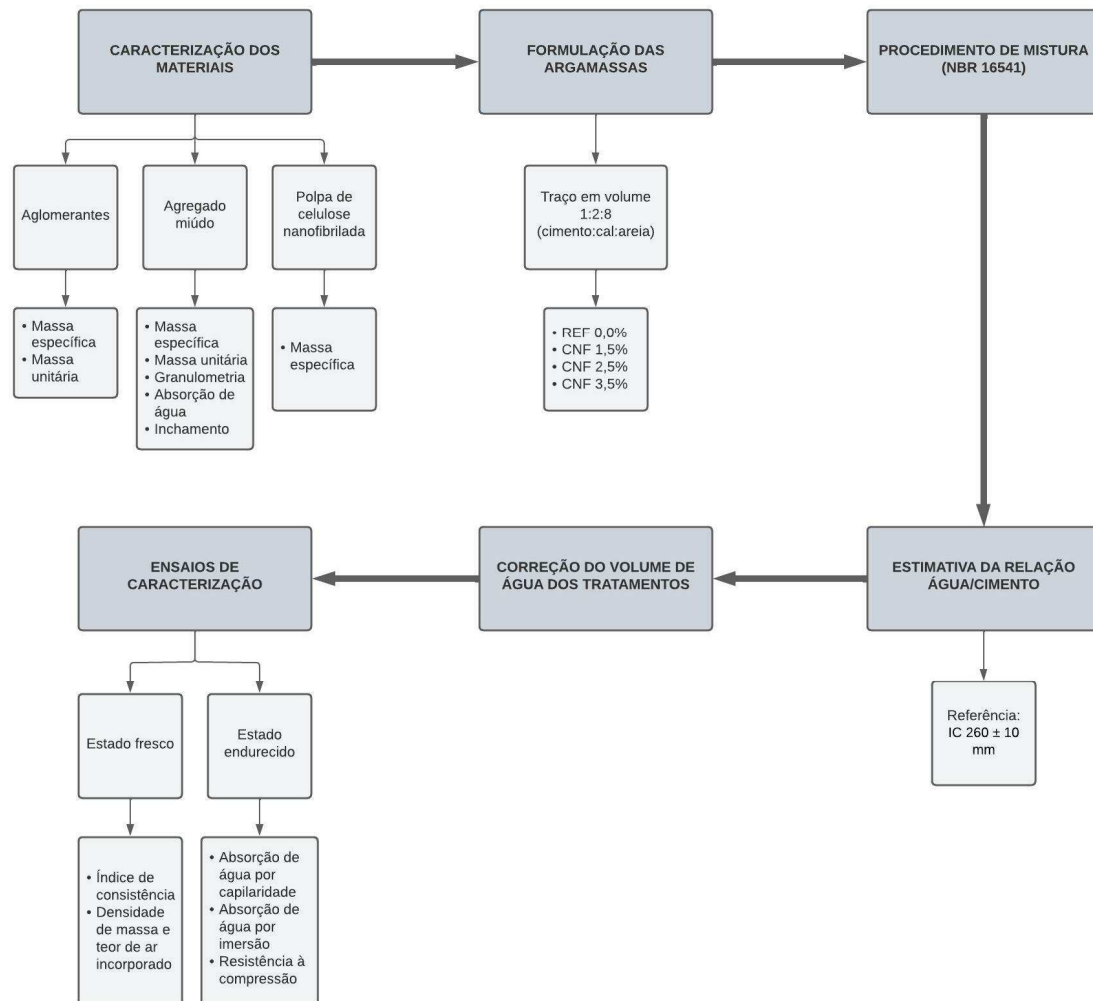
Propriedade	Valor
Varição da largura	De 80 nm a 500 nm
Varição do comprimento	De 100 μm a 800 μm
Razão comprimento/largura	Até 1200
Área específica	Até 80 m^2/g
Temperatura de decomposição	260 $^{\circ}\text{C}$
Solubilidade em água	Não solúvel
Condutividade térmica	Baixa
Condutividade elétrica	Baixa

Fonte: Onuaguluchi *et al.* (2021)

3.2 Métodos

O programa experimental desenvolvido nesta pesquisa está apresentado na Figura 7 e será detalhado nos itens subsequentes.

Figura 7 - Esquema detalhado do programa experimental



Fonte: Autor (2022)

3.2.1 Caracterização dos materiais

O Quadro 4 ilustra as propriedades avaliadas de cada um dos materiais nesta pesquisa e as normas técnicas correspondentes que foram utilizadas para se obter o valor dessas propriedades.

Quadro 4 - Ensaio de caracterização dos materiais

Aglomerantes	
Propriedade	Norma utilizada
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa específica	NBR NM 23 (ABNT, 2001)
Agregado miúdo	
Propriedade	Norma utilizada
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2016)
Massa específica	NBR 9776 (ABNT, 1986)
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Classificação	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Absorção de água	NBR NM 30 (ABNT, 2001)
Umidade crítica	NBR 6467 (ABNT, 2006)
Coef. de inchamento médio	NBR 6467 (ABNT, 2006)
Polpa de celulose nanofibrilada	
Propriedade	Norma utilizada
Massa unitária	-

Fonte: Autor (2022)

A fim de determinar a massa unitária no estado solto tanto dos aglomerantes quanto do agregado miúdo, utilizou-se a NBR NM 25 (ABNT, 2005). A princípio, um recipiente cilíndrico vazio foi pesado para obter sua massa e calculou-se seu volume. Em seguida, esse recipiente foi preenchido com o material, rasado com uma régua metálica e pesado novamente. Para calcular sua massa unitária, foi utilizada a Equação 1.

$$\rho_{ap} = \frac{(m_{ar} - m_r)}{V} \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

ρ_{ap} é a massa unitária do material, em g/cm³;

m_{ar} é a massa do recipiente mais o material, em g;

m_r é a massa do recipiente vazio, em g;

V é o volume do recipiente, em cm³.

De forma semelhante, a massa unitária da polpa de celulose nanofibrilada também foi calculada. Primeiramente, um recipiente cilíndrico vazio foi pesado para obter sua massa e determinou-se seu volume. Depois, esse recipiente foi preenchido com a polpa de celulose nanofibrilada e pesado novamente. Assim, para calcular a massa específica da polpa de celulose nanofibrilada, foi utilizada a Equação 2.

$$\rho_{ap} = \frac{(m_{ar} - m_r)}{V} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

ρ é a massa unitária da polpa, em g/cm³;

m_{ar} é a massa do recipiente mais a polpa, em g;

m_r é a massa do recipiente vazio, em g;

V é o volume do recipiente, em cm³.

Para obter a massa específica dos aglomerantes, utilizou-se a NBR NM 23 (ABNT, 2000). Inicialmente, pesou-se uma quantidade de aglomerante e anotou-se o valor obtido. Em seguida, encheu-se um frasco volumétrico de Le Chatelier com líquido não reagente (querosene) até a marca de 0,5 cm³ e adicionou-se o aglomerante com o auxílio de um funil. O frasco foi então agitado, realizando-se movimentos circulares para retirar as bolhas de ar presentes e garantindo que todo o material precipitasse até o fundo. Por fim, registrou-se a leitura do volume final e calculou-se a massa específica do aglomerante por meio da Equação 3.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

ρ é a massa específica do aglomerante ensaiado, em g/cm³;

m é a massa do aglomerante ensaiado, em g;

V é o volume deslocado pela massa do material ensaiado, dado pela diferença entre o volume inicial (0,5 cm³) e o volume final obtido, em cm³.

A caracterização da areia se deu através dos ensaios regulamentados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), os quais foram apresentados anteriormente no Quadro 04. Todos os ensaios foram realizados utilizando areia seca em estufa na temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$ por pelo menos 24 horas.

Para o ensaio de determinação da massa específica do agregado miúdo, utilizou-se a NBR 9776 (ABNT, 1986). Inicialmente, colocou-se água no frasco Chapman até a marca de 200 cm^3 . Na sequência, foram pesados 500 g de areia, os quais foram introduzidos no frasco com a ajuda de um funil. Por fim, foi feita a leitura do volume deslocado pelo conjunto de água e agregado na graduação do gargalo do frasco. Assim, a massa específica foi determinada pela Equação 4.

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

γ é a massa específica do agregado miúdo, em g/cm^3 ;

L é a leitura final obtida do frasco, em cm^3 .

A fim de se determinar a composição granulométrica da areia, seu módulo de finura e sua classificação, utilizou-se a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Para isso, encaixou-se de maneira crescente, da base para o topo, o fundo e a série normal de peneiras para agregado miúdo (de 0,15 mm a 4,75 mm) num agitador mecânico. Em seguida, a amostra foi despejada sobre a sequência de peneiras e ligou-se o agitador. Depois 5 minutos, desligou-se o agitador e pesou-se o material retido em cada peneira. Dessa forma, foi possível obter a curva granulométrica do agregado miúdo.

Na sequência, realizou-se o ensaio de determinação de absorção de água da areia através da NBR NM 30 (ABNT, 2000). Em primeiro lugar, uma amostra de areia foi colocada em um recipiente e coberta com água por 24 horas. Após esse período, a água foi drenada e estendeu-se a amostra numa superfície a fim de permitir sua secagem naturalmente.

Após um determinado período de tempo, a amostra era colocada num molde em formato de tronco de cone e, com o auxílio de uma haste metálica, compactada com 25 golpes. Em seguida, o molde era retirado e observava-se o comportamento

da amostra. Se a areia permanecesse com o formato de tronco de cone, revolviam-se a amostra novamente e o processo de secagem natural era continuado.

O mesmo procedimento foi sendo realizado até que o agregado miúdo desmoronasse após a retirada do molde, atingindo a condição chamada de saturada superfície seca. Dessa forma, foi possível determinar sua absorção de água por meio da Equação 5.

$$A = \frac{m_s - m}{m} * 100 \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

A é a absorção de água, em porcentagem;

m_s é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, em g;

m é a massa inicial da amostra, seca em estufa, em g;

Por sua vez, o ensaio de determinação do inchamento do agregado miúdo foi realizado conforme preconiza a NBR 6467:2006. Inicialmente, foi adicionada água a uma série de amostras de areia em quantidades sucessivas de modo a obter os teores de umidade de 0,5%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 7%, 9% e 12%. Para cada adição de água, foram realizados os procedimentos:

- Homogeneização de cada amostra de forma manual com auxílio de uma espátula;
- Retirada de uma porção de cada amostra para determinação da massa unitária do agregado;
- Retirada de outra porção de cada amostra para preenchimento de uma cápsula.

Em seguida, todas as cápsulas foram submetidas aos procedimentos:

- Determinação da massa de cada cápsula contendo o agregado;
- Identificação e colocação das cápsulas em estufa por 24 horas;
- Retirada das cápsulas e obtenção da sua massa.

Na sequência, foi calculado o teor de umidade real de cada uma das cápsulas através da Equação 6.

$$h = \frac{m_i - m_f}{m_f - m_c} * 100 \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

h é o teor de umidade real da amostra, em porcentagem;

m_i é a massa inicial da cápsula com o material, em g;

m_f é a massa após a secagem da cápsula com o material, em g;

m_c é a massa da cápsula, em g.

Uma vez obtidos os teores reais de umidade, calculou-se o coeficiente de inchamento para cada teor de umidade, conforme mostra a Equação 7.

$$\frac{V_h}{V_s} = \frac{\gamma_s}{\gamma_h} * \left(\frac{100 + h}{100} \right) \quad \text{Equação 7}$$

Em que:

V_h é o volume do agregado úmido, em cm^3 ;

V_s é o volume do agregado seco em estufa, em cm^3 ;

$\frac{V_h}{V_s}$ é o coeficiente de inchamento do agregado;

h é o teor de umidade do agregado.

γ_h é a massa unitária do agregado úmido, em g/cm^3 ;

γ_s é a massa unitária do agregado seco em estufa, em g/cm^3 .

Além disso, foram obtidos também o coeficiente de inchamento médio e a umidade crítica da areia utilizada na pesquisa através do gráfico resultante desse ensaio, de acordo com o preconizado na NBR 6467 (ABNT, 2006).

3.2.2 Formulação das argamassas

Uma vez caracterizados os materiais da pesquisa, foi possível iniciar a produção das argamassas. Para isso, utilizou-se o traço 1:2:8, em volumes de cimento, cal e areia. A escolha dessas proporções se justifica por ser um traço bastante comum nessa região do Brasil para argamassas de revestimento (RUDNITSKI, 2014).

Em seguida, determinou-se a porcentagem de adição de polpa de celulose nanofibrilada para cada tratamento das argamassas. Para isso, utilizou-se um dos resultados obtidos por Czovny (2021) para compósitos cimentícios. Em sua pesquisa, a autora concluiu que uma adição de 2,5% de CNF aumentou significativamente a resistência à compressão dos corpos de prova com relação à referência. Assim, para este trabalho, adotou-se as porcentagens de 0% (referência), 1,5%, 2,5% e 3,5% de adição de polpa de CNF em função da massa de cimento para compor a matriz experimental.

O Quadro 5 resume a nomenclatura dos tratamentos, o traço utilizado e o consumo de materiais para a produção de uma quantidade de argamassa de referência, sem teor de CNF, o suficiente para moldar seis corpos de prova cilíndricos de dimensões 5 x 10 cm.

Quadro 5 - Nomenclatura do tratamento, traço utilizado e consumo de materiais para produzir as argamassas

Nomenclatura do tratamento	Traço (Volume)	Traço (Massa)	Cimento (g)	Cal (g)	Areia (g)	Polpa de CNF (g)
REF 0,0%	1:2:8	1:1,14:9,87	211,32	239,97	2085,35	0,00
CNF 1,5%						3,17
CNF 2,5%						5,28
CNF 3,5%						7,40

Fonte: Autor (2022)

3.2.3 Procedimento de mistura

O processo de mistura das argamassas utilizadas nos ensaios seguiu as recomendações da NBR 16541 (ABNT, 2016), que dá diretrizes para a homogeneização com o auxílio de um misturador mecânico. A produção seguiu os seguintes passos:

- Colocação dos materiais anidros (cimento, cal e areia) na tigela da argamassadeira;
- Acionamento do misturador na velocidade baixa por 30 segundos e adição de 75% da água;
- Acionamento da velocidade alta por 60 segundos;
- Desligamento da argamassadeira para raspagem do material que ficou no fundo da tigela;
- Mistura da polpa de CNF nos 25% de água restantes e adição à argamassa;
- Acionamento do misturador na velocidade baixa por mais 60 segundos.

3.2.4 Estimativa da relação água/cimento

Uma vez obtida a quantidade de materiais necessária para a produção das argamassas, estimou-se a relação água/cimento (a/c) da argamassa de referência de acordo com as recomendações da NBR 16541 (ABNT, 2016), que preconiza um índice de consistência de 260 ± 10 mm na *flow table*. O ensaio para se obter o índice de consistência das argamassas seguiu as recomendações da NBR 13276 (ABNT, 2010).

Na Tabela 3 estão apresentados os valores da relação água/cimento e seus respectivos índices de consistência. Nos casos em que a argamassa ficou muito seca, o que impossibilitava o ensaio por conta da falta de fluidez, os dados de índice de consistência foram deixados em branco.

Tabela 3 - Relação água/cimento e índice de consistência resultante

Relação água/cimento	Índice de consistência (mm)
1,50	-
1,75	-
2,00	205
2,25	207
2,35	259
2,50	289

Fonte: Autor (2022)

Além da variação dos índices de consistência, as argamassas também se mostraram bastante diferentes visualmente. Para demonstrar isso, a Figura 8 apresenta o aspecto das argamassas produzidas.

Figura 8 - Aspecto das argamassas produzidas. Relação água cimento de: (a) 1,5; (b) 1,75; (c) 2; (d) 2,25; (e) 2,35 e (f) 2,5



Fonte: Autor (2022)

Como observado na Tabela 04, a argamassa de referência produzida seguindo uma relação água/cimento de 2,35 resultou num índice de consistência de 259 mm, dentro dos parâmetros estabelecidos pela NBR 16541 (ABNT, 2010). Dessa forma, fixou-se o valor dessa relação água/cimento para a produção de todos os tratamentos que compuseram os ensaios abordados neste trabalho.

3.2.5 Correção do volume de água

O volume de água necessário para produzir cada um dos tratamentos teve seu valor corrigido por conta de a solução conter uma concentração de 1% de CNF. Em outras palavras, 99% da polpa é constituída de água. Por isso, corrigiu-se a quantidade de água de amassamento levando isso em consideração, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Volume de água necessário para cada tratamento

Nomenclatura do tratamento	Polpa de CNF (g)	Volume de água (mL)
REF 0,0%	0,00	496,60
CNF 1,5%	3,17	493,46
CNF 2,5%	5,28	491,37
CNF 3,5%	7,40	489,28

Fonte: Autor (2022)

3.2.6 Ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco

Depois de esclarecido o método de produção das argamassas, prosseguiu-se com a investigação das propriedades no estado fresco. Para isso, foram realizados os ensaios de índice de consistência (conhecido também como *flow table*), regulamentado pela NBR 13276 (ABNT, 2010) e de densidade de massa e teor de ar incorporado, conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005).

Para o ensaio de consistência, foi colocado um molde em forma de tronco de cone no centro da *flow table* e despejou-se argamassa em camadas de um terço em um terço em seu interior, aplicando quinze, dez e cinco golpes em cada uma delas

com um soquete metálico. Esse procedimento é realizado para adensar o material dentro do molde.

Em seguida, o molde foi retirado verticalmente e o motor da *flow table* foi acionado. Com isso, a mesa iniciou um movimento para cima e para baixo por meio de 30 golpes aplicados dentro de 30 segundos, fazendo com que a argamassa fluísse e se espalhasse.

Como resultado desse ensaio, o índice de consistência (IC) é dado, em milímetros, pela média aritmética de três diâmetros de espalhamento aleatórios medidos por meio de um paquímetro.

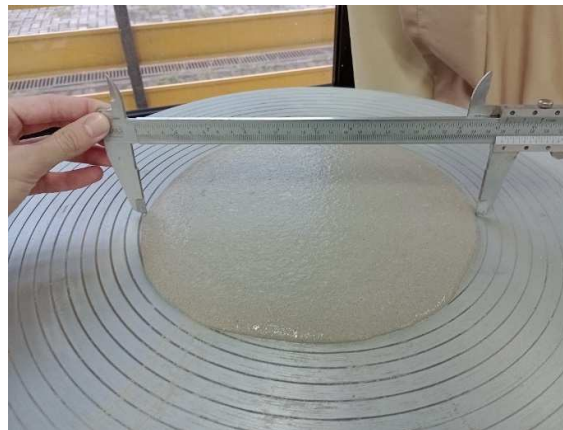
A Figura 9 mostra o formato que uma argamassa adquire logo após a retirada do molde troncônico. Por sua vez, a Figura 10 ilustra o estado da argamassa no fim do ensaio e o método de medição de um diâmetro de espalhamento.

Figura 9 - Argamassa logo após remoção do tronco de cone na *flow table*



Fonte: Autor (2022)

Figura 10 - Medição do diâmetro de espalhamento da argamassa usando o paquímetro



Fonte: Autor (2022)

Para o ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado, utilizou-se um recipiente cilíndrico vazio de volume conhecido para determinar a densidade de massa real de cada um dos quatro tratamentos (REF 0,0%, CNF 1,5%, CNF 2,5% e CNF 3,5%), conforme a Equação 8.

$$d = \frac{m_c - m_v}{v_r} \quad \text{Equação 8}$$

Em que:

m_c é a massa do recipiente contendo a argamassa, em g;

m_v é a massa do recipiente vazio, em g;

v_r é o volume do recipiente, em cm^3 .

Em seguida, calculou-se a densidade de massa teórica das argamassas, dividindo a soma das massas dos materiais pelo volume teórico ocupado por cada um deles, conforme mostra a Equação 9:

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{\gamma_i}} \quad \text{Equação 9}$$

Em que:

d_t é a densidade de massa teórica da argamassa, em g/cm^3 ;

m_i é a massa de cada componente da argamassa, mais a massa de água, em g;

γ_i é a massa específica de cada componente da argamassa, em g/cm³.

Usualmente, a densidade de massa teórica apresenta um valor maior do que a densidade de massa real, e essa diferença está associada ao teor de ar incorporado. Por meio da Equação 10, que correlaciona as duas grandezas, é possível determinar o teor de ar incorporado à argamassa.

$$A = 100 * \left(1 - \frac{d}{d_t}\right) \quad \text{Equação 10}$$

Em que:

A é o teor de ar incorporado, em porcentagem;

d é a densidade de massa real da argamassa, em g/cm³;

d_t é a densidade de massa teórica da argamassa, em g/cm³.

3.2.7 Ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido

Após a realização dos ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco, prosseguiu-se com a análise das argamassas no estado endurecido. Para isso, foram realizados os ensaios de absorção de água por capilaridade, regulamentado pela NBR 15259 (ABNT, 2005), absorção de água por imersão, conforme a NBR 9778 (ABNT, 1987), e resistência à compressão, adaptado da NBR 7215 (ABNT, 2019).

Utilizando as recomendações fornecidas pela NBR 7215 (ABNT, 2019) para o preparo e o enchimento dos moldes, foi possível produzir os corpos de prova necessários para os ensaios citados. As dimensões do molde cilíndrico padrão, por norma, são 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura.

O Quadro 6 resume a quantidade de corpos de prova produzidos por tratamento para cada ensaio. Ao todo, foram moldados 12 corpos de prova para ambos os ensaios de absorção de água (3 por tratamento, ensaiados aos 28 dias de idade) e 72 corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão (6 por tratamento, ensaiados aos 7, 14 e 28 dias de idade).

Quadro 6 - Quantidade de corpos de prova por tratamento

Idade	7 dias	14 dias	28 dias
Ensaio	Quantidade de corpos de prova por tratamento		
Absorção de água por capilaridade	-	-	3
Absorção de água por imersão	-	-	3
Resistência à compressão	6 (*)	6	6

(*) Foram produzidos seis corpos de prova para ensaiar aos 7 dias de idade, exceto para a argamassa REF 0,0%. Para este tratamento, foram ensaiados somente três corpos de prova

Fonte: Autor (2022)

Anteriormente à mistura dos materiais na argamassadeira, os moldes metálicos foram untados com desmoldante e deixados próximos do misturador para que o processo de enchimento fosse feito de forma ágil.

Com o auxílio de uma colher, a argamassa no estado fresco foi colocada em camadas de um quarto em um quarto no interior do molde. Para cada camada, foram aplicados 30 golpes com um soquete metálico para adensar o material. Por fim, depois de preenchidos, os moldes com argamassa foram rasados com uma régua metálica, identificados e reservados.

Por conta de as argamassas conterem cal em sua composição, convencionou-se que a desmoldagem acontecesse somente 48 horas depois da produção. Isso foi decidido para que os corpos de prova estivessem firmes o suficiente no ato da desmoldagem, evitando assim danificá-los. A Figura 11 mostra alguns moldes metálicos preenchidos com argamassa no estado fresco.

Figura 11 - Moldes cilíndricos preenchidos e identificados



Fonte: Autor (2022)

Depois de desmoldados, os corpos de prova foram acondicionados em uma câmara ao abrigo de luz solar, à temperatura e umidade ambiente para continuar seu processo de cura. Eles permaneceram nesse local até a idade estipulada para realização dos ensaios.

Para dar início ao ensaio de absorção de água por capilaridade, foi necessário utilizar três corpos de prova secos em estufa a 100 ± 5 °C por 24 horas, por tratamento, na idade de 28 dias. A princípio, determinou-se a massa inicial de cada um deles e, em seguida, foi preparado o recipiente de ensaio, que consistiu em uma forma metálica preenchida com uma lâmina de água de 5 mm acima de pequenos suportes metálicos. Esses suportes tinham como função diminuir a área de contato dos corpos de prova com a superfície da forma, proporcionando uma maior área molhada nas suas bases.

Depois de acondicionar os corpos de prova sobre os suportes, determinou-se a massa de cada um deles aos 10 minutos. Para isso, eles foram enxutos com um pano, pesados e logo depois retornados ao recipiente de ensaio. Da mesma forma, o procedimento foi repetido aos 90 minutos e os dados foram anotados. Por fim, a absorção de água por capilaridade pôde ser expressa pela Equação 11.

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{A} \quad \text{Equação 11}$$

Em que:

A_t é a absorção de água por capilaridade, para cada tempo, em g/cm³;

m_t é a massa do corpo de prova em cada tempo, em g;

m_0 é a massa inicial do corpo de prova seco, em g;

A é a área da seção transversal do corpo de prova, em cm².

Além disso, calculou-se também, através da Equação 12, o coeficiente de capilaridade dos corpos de prova, que por definição é igual ao coeficiente angular da reta que passa pelos pontos representativos das medições realizadas aos 10 e 90 minutos, considerando o eixo das abscissas a raiz do tempo em minutos e o eixo das ordenadas a absorção de água por capilaridade em g/cm².

$$C = (m_{90} - m_{10}) \quad \text{Equação 12}$$

Em que:

C é o coeficiente de capilaridade, em g/dm².min^{1/2}.

Além do ensaio de absorção de água por capilaridade, realizou-se também o ensaio de absorção de água por imersão. Para este último, retirou-se os corpos de prova da estufa, utilizou-se uma balança para obter a massa seca e, em seguida, procedeu-se com a submersão total por 24 horas num recipiente com água. A seguir, a Figura 12 mostra a disposição dos corpos de prova dentro do recipiente.

Figura 12 - Corpos de prova dispostos dentro de um balde com água



Fonte: Autor (2022)

Passadas as 24 horas, os corpos de prova foram retirados da água, secos com um pano e pesados para se obter a massa deles na condição de saturada superfície seca. Com isso, utilizando a Equação 13, foi possível se obter a absorção de água por imersão à temperatura ambiente.

$$AA_{imersão} = \frac{(B - A)}{A} * 100 \quad \text{Equação 13}$$

Em que:

$AA_{imersão}$ é a absorção de água por imersão, em porcentagem;

B é a massa do corpo de prova na condição saturada superfície seca, em g;

A é a massa do corpo de prova seco em estufa, em g.

Por fim, para concluir os ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido, foi realizado o ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova. Para isso, empregou-se a prensa hidráulica EMIC DL30000N, cuja capacidade de carga máxima é de 300 KN e velocidade de carregamento aplicada nos ensaios de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s. A seguir, a Figura 13 apresenta um corpo de prova centralizado na prensa EMIC.

Figura 13 - Corpo de prova centrado na prensa EMIC



Fonte: Autor (2022)

O *software* Tesc, instalado no computador de apoio do laboratório, fornece as condições para conduzir o ensaio e compila os resultados obtidos em forma de relatório. Os dados de entrada para realizar o ensaio de resistência à compressão são: a área da base do corpo de prova, fornecido pelo usuário, e a força máxima aplicada pela prensa, mensurada pelo próprio sistema. Com isso, foi possível se obter a resistência à compressão do corpo de prova.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Caracterização dos aglomerantes

A Tabela 5 apresenta os valores de massa específica e massa unitária dos aglomerantes.

Tabela 5 - Massa específica e massa unitária dos aglomerantes

Propriedade	Valor (g/cm³)
Massa específica do cimento	2,93
Massa unitária do cimento	1,16
Massa específica da cal	2,26
Massa unitária da cal	0,66

Fonte: Autor (2022)

Canova (2017) obteve dados ligeiramente maiores para o cimento. O autor observou uma massa específica de 3,08 g/cm³ e massa unitária de 1,29 g/cm³. Por sua vez, Perin (2019) encontrou os valores de 2,23 g/cm³ e 0,62 g/cm³ para a massa específica e a massa unitária da cal hidratada, respectivamente. Assim, é possível dizer que os resultados obtidos nesta pesquisa condizem com os encontrados na literatura.

4.1.2 Caracterização do agregado miúdo

A massa específica e a massa unitária da areia podem ser visualizadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Massa específica e massa unitária da areia

Propriedade	Valor (g/cm³)
Massa específica	2,62
Massa unitária	1,44

Fonte: Autor (2022)

Os resultados encontrados foram próximos aos de Carasek *et al.* (2016), os quais obtiveram as medidas de 2,73 g/cm³ e 1,53 g/cm³, respectivamente, para as amostras de areia natural estudadas. Dessa forma, é possível dizer que os valores obtidos nesta pesquisa refletem os dados encontrados na literatura.

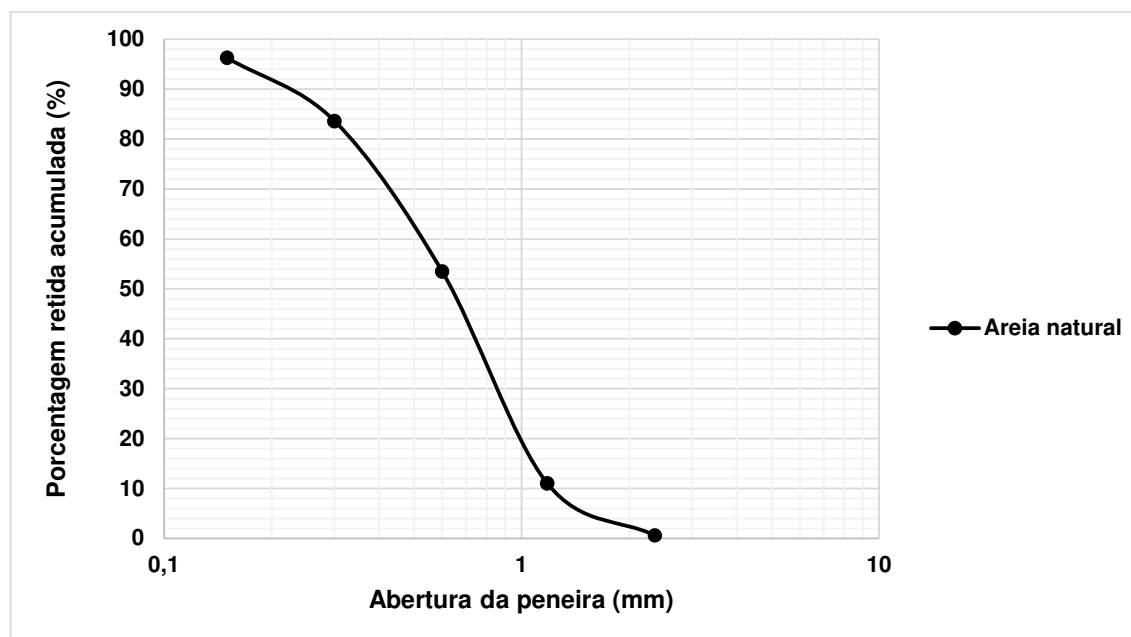
A composição granulométrica da areia pode ser observada na Tabela 7, bem como sua curva granulométrica, na Figura 14.

Tabela 7 - Composição granulométrica da areia

Diâmetro peneira (mm)	Massa retida (g)	Percentual retido (%)	Percentual retido acumulado (%)	Percentual passante acumulado (%)
4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
2,36	5,82	0,58	0,58	99,42
1,18	104,73	10,47	11,06	88,95
0,6	423,9	42,39	53,45	46,56
0,3	301,27	30,13	83,57	16,43
0,15	127,47	12,75	96,32	3,68
< 0,15 (Fundo)	36,28	3,63	99,95	0,05

Fonte: Autor (2022)

Figura 14 - Curva granulométrica da areia

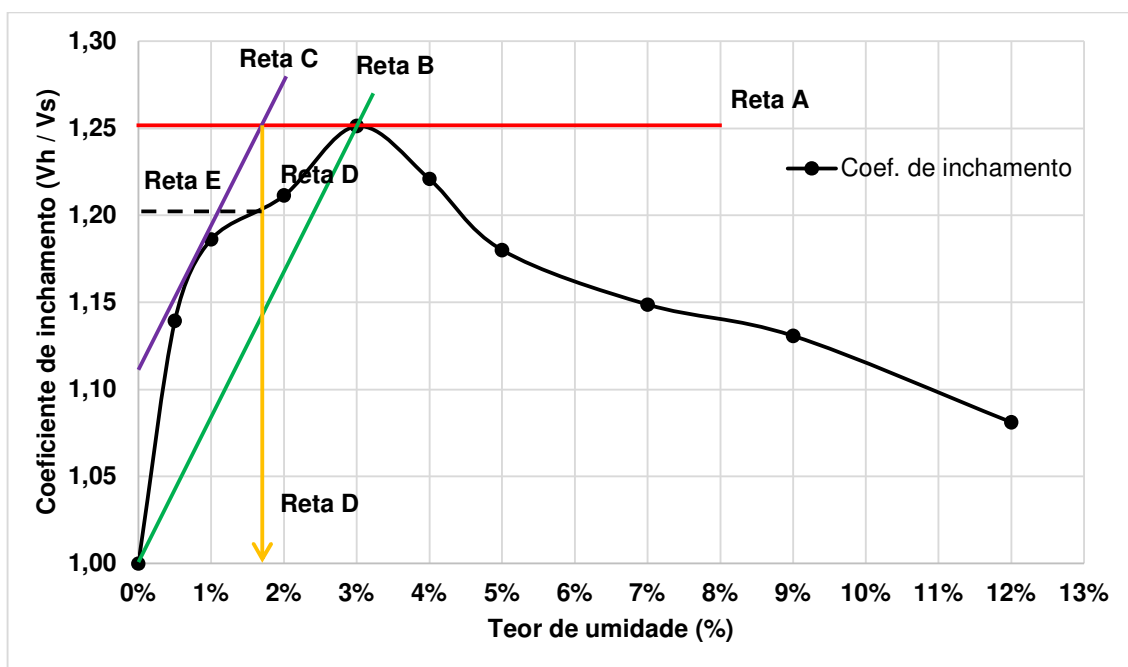


Fonte: Autor (2022)

Através do resultado do ensaio de composição granulométrica da areia, foi calculado um módulo de finura de 2,45 para a amostra em questão, o qual conferiu a classificação de areia média ao agregado miúdo utilizado nesta pesquisa. Carasek (2001) discute que areias grossas não são muito adequadas para argamassas de revestimento pois afetam sua reologia e diminuem a trabalhabilidade, o que consolida o uso da areia média nesse caso.

Na sequência, a Figura 15 mostra a curva de inchamento da areia. Para Silva (2017), o inchamento da areia se correlaciona com sua capacidade de absorver umidade, o que acaba afetando seu volume aparente. Esse parâmetro é importante quando o método de dosagem é dado em função do volume de materiais, apesar do inchamento em si não afetar o traço em massa (DA SILVA, 2017).

Figura 15 - Curva de inchamento da areia



Fonte: Autor (2022)

Para obtenção dos valores de coeficiente de inchamento médio e umidade crítica, foi necessário realizar uma construção gráfica sobre os resultados da curva de inchamento. Assim, construiu-se as retas A (paralela ao eixo das umidades e tangente à curva de inchamento), B (que liga a origem até o ponto de tangência da reta A), C (tangente à curva de inchamento no ponto de tangência da reta A), D (vertical descendente do ponto de tangência da reta A) e E (horizontal em 1,20).

(paralela à reta B e tangente à curva de inchamento), D (abscissa correspondente às duas tangentes) e E (ordenada correspondente à umidade crítica).

A umidade crítica da amostra da areia é dada pelo valor da abscissa correspondente à reta D e o coeficiente de inchamento médio é dado pela média entre o valor da ordenada correspondente à reta E e o coeficiente de inchamento máximo.

Dessa forma, como resultado dessa construção, obteve-se o valor de 1,23 para o coeficiente de inchamento médio e 1,75% para a umidade crítica da areia. Meier (2011) obteve curvas de inchamento com um comportamento similar para suas amostras e Silva (2017) observou resultados de coeficiente de inchamento médio e umidade crítica similares em seus ensaios (1,31 e 2%, respectivamente).

Por fim, a absorção de água obtida para a areia neste estudo foi de 1,13%, valor que se encontra próximo do intervalo de dados observados na literatura. A saber, Paulino *et al.* (2022), Martins *et al.* (2017) e Furtado (2021), obtiveram porcentagens de 0,90%, 1,40% e 3,17%, respectivamente. Essa propriedade é muito importante para mensurar a capacidade do agregado miúdo de absorver a água disponível dentro de um compósito cimentício.

4.1.3 Caracterização da celulose nanofibrilada

A massa unitária da polpa de celulose nanofibrilada utilizada nessa pesquisa foi de 1,02 g/cm³, bastante próxima da massa específica da água, o que é justificado pela sua baixa concentração.

4.2 Caracterização das argamassas no estado fresco

4.2.1 Índice de consistência

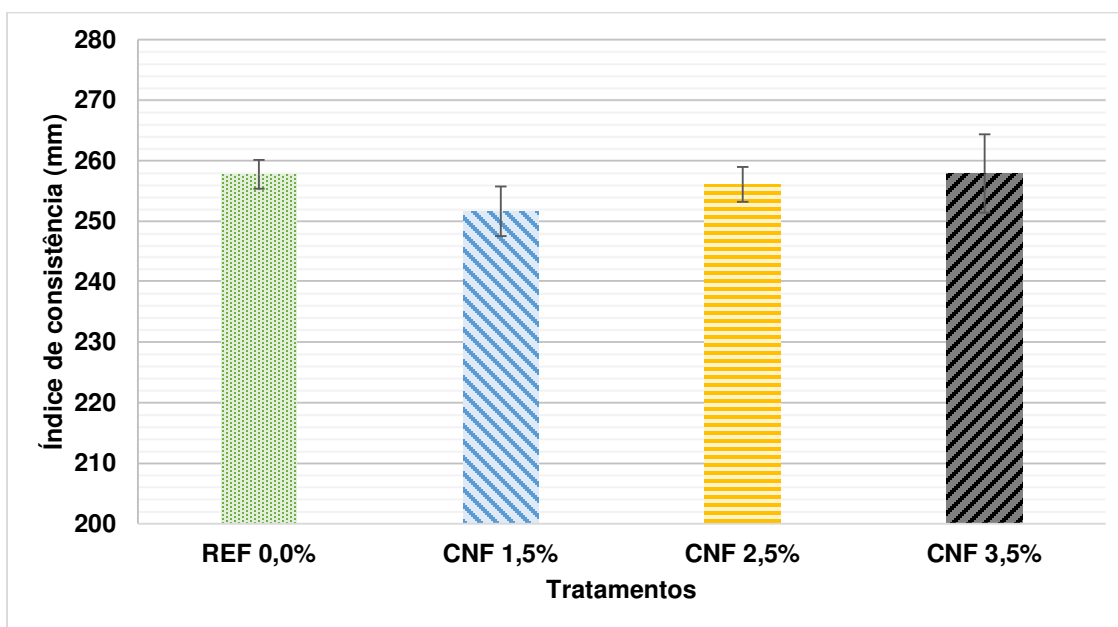
Após realizar o ensaio da *flow table* para determinar o índice de consistência das argamassas, foi possível compilar os resultados na Tabela 8 e construir o gráfico apresentado na Figura 16.

Tabela 8 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação do índice de consistência das argamassas

Tratamento	IC Médio (mm)	Desv. Pad. (mm)	C.V. (%)
REF 0,0%	258	2,39	0,93
CNF 1,5%	252	4,09	1,63
CNF 2,5%	256	2,89	1,13
CNF 3,5%	258	6,47	2,51

Fonte: Autor (2022)

Figura 16 - Índice de consistência das argamassas



Fonte: Autor (2022)

Pode-se observar que a existe uma redução do índice de consistência logo no primeiro tratamento de adição da polpa de celulose nanofibrilada. Esse comportamento também foi observado por Zhang *et al.* (2021). Entretanto, conforme a proporção de CNF aumenta, o índice de consistência tende a retornar aos valores de referência.

Em sua pesquisa, Gonçalves *et al.* (2021) observaram que a adição de celulose nanofibrilada reduz a exsudação em pastas de cimento no estado fresco. Isso faz com

que a água retida pelas CNF's (por conta da maior superfície específica e hidrofiliçidade do material) impeça a movimentação das partículas de água livre da pasta, aumentando a aglutinação da pasta e oferecendo resistência ao movimento. Esse comportamento também foi observado por Haddad Kolour (2021).

De forma contrária, Montes (2020) foi capaz de mostrar uma melhor dispersão em pastas de cimento utilizando CNC's, o que mostra a diferença entre os dois tipos de nanomateriais.

4.2.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

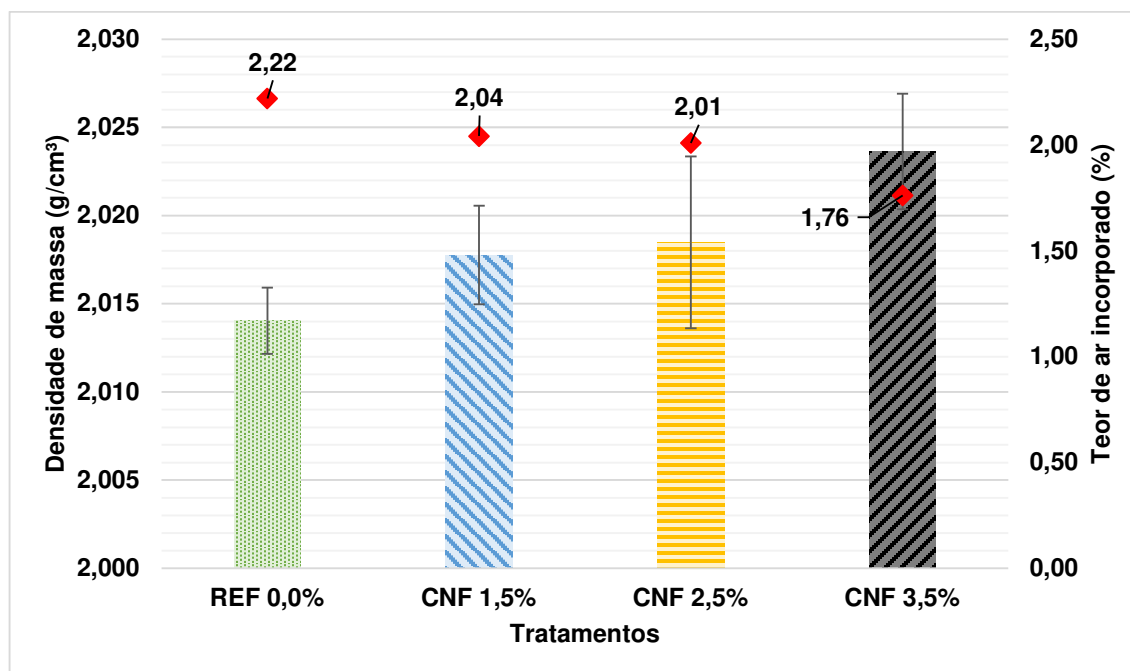
De forma semelhante, os dados da densidade de massa e teor de ar incorporado foram organizados conforme mostra a Tabela 9 e o gráfico da Figura 17.

Tabela 9 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação da densidade de massa e do teor de ar incorporado das argamassas

Tratamento	Densidade de massa média (g/cm³)	Desv. Pad. (g/cm³)	C.V. (%)	Teor de ar incorporado médio (%)	Desv. Pad. (%)	C.V. (%)
REF 0,0%	2,014	0,002	0,093	2,22	0,09	4,11
CNF 1,5%	2,018	0,003	0,139	2,04	0,14	6,65
CNF 2,5%	2,018	0,005	0,242	2,01	0,24	11,78
CNF 3,5%	2,024	0,003	0,162	1,76	0,16	9,02

Fonte: Autor (2022)

Figura 17 - Densidade de massa e teor de ar incorporado das argamassas



Fonte: Autor (2022)

Como observado na Figura 17, houve um aumento da densidade ao adicionar polpa de celulose nanofibrilada às argamassas. De forma semelhante, um acréscimo na densidade de massa também foi constatado por Barnat-Hunek et (2019), onde uma adição de 1,5% de celulose nanocristalina contribuiu para um aumento de 3,9% na densidade. Segundo os autores, a nanocelulose foi capaz de diminuir a porosidade das argamassas ao selar sua estrutura.

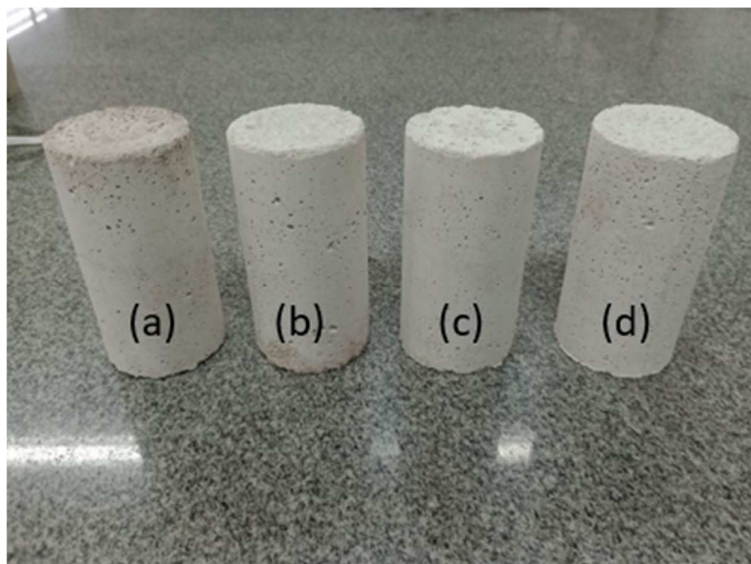
Além disso, o teor de ar incorporado decresceu nas argamassas com adição de polpa de celulose nanofibrilada da pesquisa, o que se relaciona com o aumento da densidade de massa. Guo *et al.* (2022) foram capazes de correlacionar o teor de ar incorporado com a diminuição da fluidez, mostrando que argamassas aeradas têm sua consistência reduzida pelas bolhas de ar presentes no seu interior.

Ainda, de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005), todas as argamassas da pesquisa puderam ser classificadas como classe D6, pois todas obtiveram uma densidade de massa maior do que 2000 kg/m³.

4.3 Caracterização das argamassas no estado endurecido

Logo após a desmoldagem dos corpos de prova, foi possível realizar uma análise visual de cada uma das argamassas produzidas. A Figura 17 mostra a aparência dos corpos de prova.

Figura 18 - Aparência dos corpos de prova de cada um dos tratamentos: (a) REF 0,0%, (b) CNF 1,5%, (c) CNF 2,5% e (d) CNF 3,5%



Fonte: Autor (2022)

Não foram observadas diferenças visuais significativas entre corpos de prova, seja de cor ou porosidade superficial.

4.3.1 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

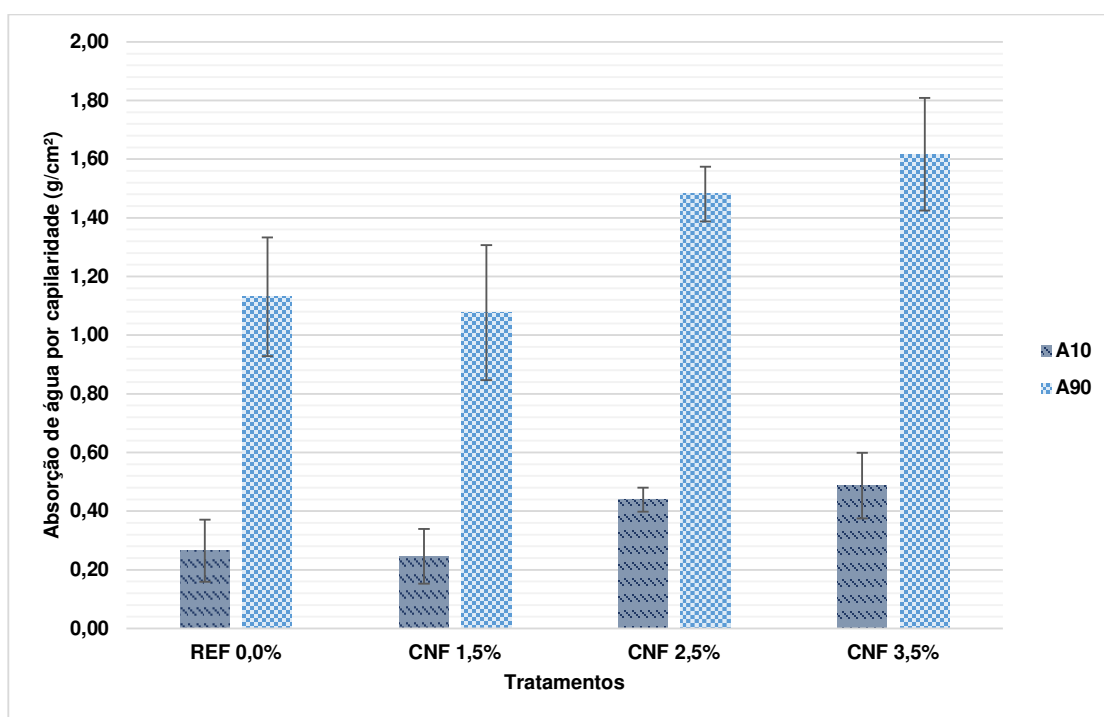
Na Tabela 10 estão apresentados os resultados de absorção de água por capilaridade aos 10 minutos (A10) e aos 90 minutos (A90). Na sequência, o gráfico da Figura 19 ilustra conjuntamente essas duas grandezas.

Tabela 10 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação da absorção de água por capilaridade das argamassas aos 10 e 90 minutos

Tratamento	A10 Média (g/cm ²)	Desv. Pad. (g/cm ²)	CV (%)	A90 Média (g/cm ²)	Desv. Pad. (g/cm ²)	CV (%)
REF 0,0%	0,27	0,11	39,89	1,13	0,20	17,90
CNF 1,5%	0,25	0,09	37,97	1,08	0,23	21,40
CNF 2,5%	0,44	0,04	9,32	1,48	0,09	6,29
CNF 3,5%	0,49	0,11	22,92	1,62	0,19	11,87

Fonte: Autor (2022)

Figura 19 - Absorção de água por capilaridade média das argamassas aos 10 e aos 90 minutos



Fonte: Autor (2022)

É possível observar um padrão de crescimento da absorção de água por capilaridade conforme o teor de CNF dos corpos de prova aumentavam. Esse padrão se manteve tanto aos 10 minutos quanto aos 90 minutos, mostrando que as CNF's intensificaram a capacidade da argamassa de absorver água.

Segundo Borges *et al.* (2019), quanto menor o diâmetro dos poros capilares, maiores serão as pressões capilares desenvolvidas. Por esse motivo, a água consegue ser transportada com mais facilidade para dentro do volume de argamassa. Nesse sentido, Gonçalves (2019) pontua que a adição de celulose nanofibrilada leva

a uma diminuição nos macroporos (vazios maiores do que 10 μm) e um aumento dos micro e mesoporos (vazios de dimensões entre 60 nm e 10 μm). Esse efeito, chamado de refinamento do tamanho dos poros, é decorrente da alta densidade de C-S-H promovida pelas CNF's na argamassa.

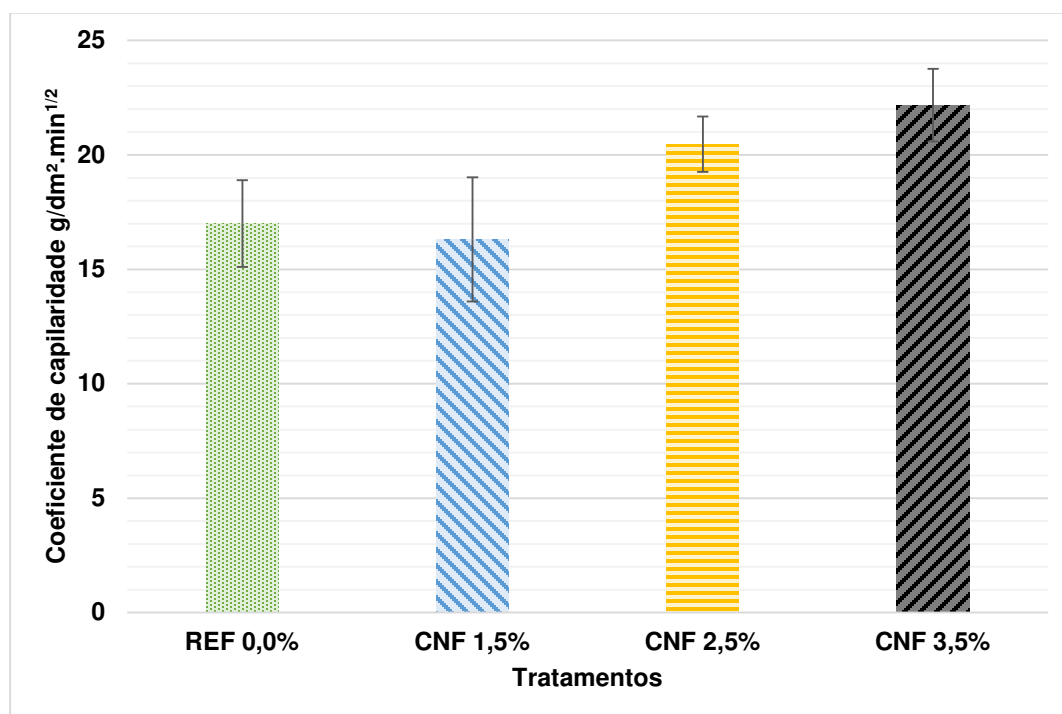
De forma semelhante, os valores obtidos do coeficiente de capilaridade podem ser observados na Tabela 11 e no gráfico mostrado na Figura 20.

Tabela 11 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação do coeficiente de capilaridade das argamassas

Tratamento	Coef. Capilaridade Médio ($\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$)	Desv. Pad. ($\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$)	CV (%)
REF 0,0%	17,00	1,90	11,18
CNF 1,5%	16,31	2,72	16,65
CNF 2,5%	20,47	1,22	5,94
CNF 3,5%	22,17	1,59	7,18

Fonte: Autor (2022).

Figura 20 - Coeficiente de capilaridade médio das argamassas



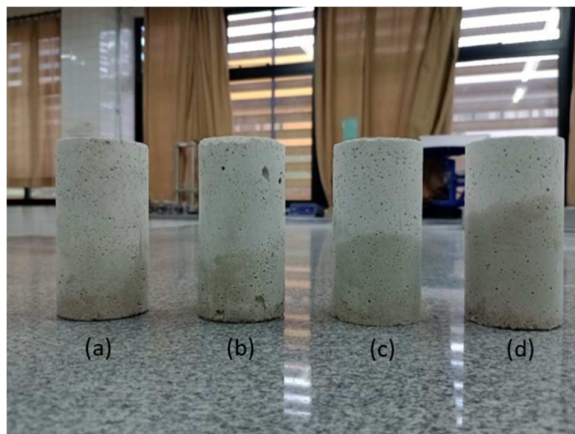
Fonte: Autor (2022)

Analogamente, o coeficiente de capilaridade também aumentou conforme o teor de CNF nos corpos de prova aumentava. Esse comportamento reflete os

resultados obtidos de absorção de água pois essa grandeza se trata de uma relação entre as porcentagens encontradas no ensaio anterior.

Além disso, também foi possível notar um padrão visual na altura da água que subiu por capilaridade nos corpos de prova, como mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Padrão visual na altura da água que subiu por capilaridade nos corpos de prova: (a) REF 0,0%, (b) CNF 1,5%, (c) CNF 2,5% e (d) CNF 3,5%



Fonte: Autor (2022)

Como observado, a absorção de água por capilaridade aumentou ao passo que se aumentava a adição de polpa de CNF às argamassas. Esse resultado se repete tanto nos resultados de absorção de água por capilaridade aos 10 minutos, aos 90 minutos, no coeficiente de capilaridade e também na análise visual dos corpos de prova.

Em sua pesquisa, Martins *et al.* (2019) apontam que a celulose nanofibrilada aumenta a difusibilidade de água por conta dos canais de transporte criados pelo anel de produtos de hidratação. De forma semelhante, os ensaios conduzidos por Moraes *et al.* (2018) também confirmaram um aumento da absorção de água conforme os produtos celulósicos eram adicionados às argamassas. O mesmo comportamento ocorreu nos resultados obtidos por Patel *et al.* (2020).

Ainda, de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005), todas as argamassas puderam ser categorizadas como classe C6, pois todas obtiveram um coeficiente de capilaridade maior do que $10 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$.

4.3.2 Absorção de água por imersão

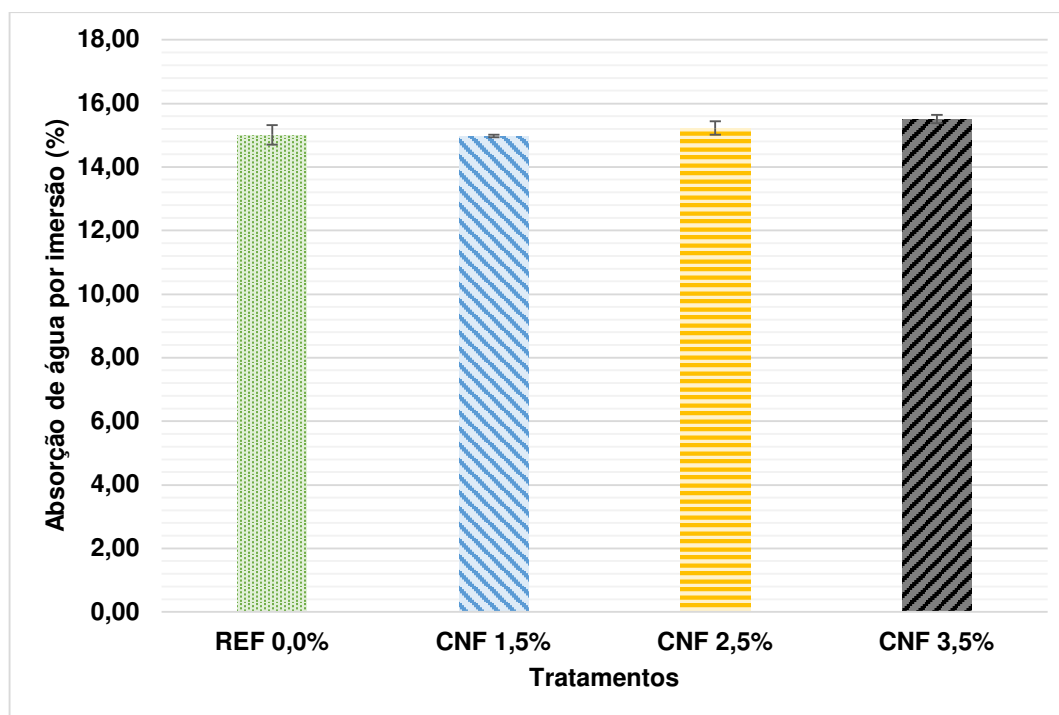
A Tabela 12 e o gráfico apresentado na Figura 21 apresentam os valores obtidos para a absorção de água por imersão das argamassas.

Tabela 12 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação da absorção de água por imersão das argamassas

Tratamento	Média AA Imersão (%)	Desv. Pad. (%)	C.V. (%)
REF 0,0%	15,01	0,31	2,05
CNF 1,5%	14,98	0,04	0,26
CNF 2,5%	15,22	0,21	1,38
CNF 3,5%	15,51	0,13	0,83

Fonte: Autor (2022)

Figura 22 - Absorção de água por imersão das argamassas



Fonte: Autor (2022)

É possível perceber que a absorção de água por imersão apresentou um comportamento parecido quando se comparada à absorção de água por capilaridade.

Em ambos os casos, teores maiores de adição de polpa de CNF resultaram numa maior absorção de água pelos corpos de prova.

Oh *et al.* (2022) observaram uma tendência característica na absorção de água ao adicionar CNF's aos materiais cimentícios. Essa propriedade tende a ser menor nos materiais com menor teor de adição, e então tende a crescer conforme se aumenta o acréscimo de CNF à mistura. Em seus ensaios, os autores obtiveram a menor absorção de água no tratamento com menor porcentagem de CNF (0,096%), o qual correspondia à menor porosidade e à maior resistência à tração.

Velasco (2002) afirma que a forma de compactação dos corpos de prova também influencia nos resultados de absorção de água por imersão. Argamassas adensadas de forma inadequada tendem a apresentar poros maiores, o que aumenta sua absorção de água, conforme aponta Borges (2019).

4.3.3 Resistência à compressão

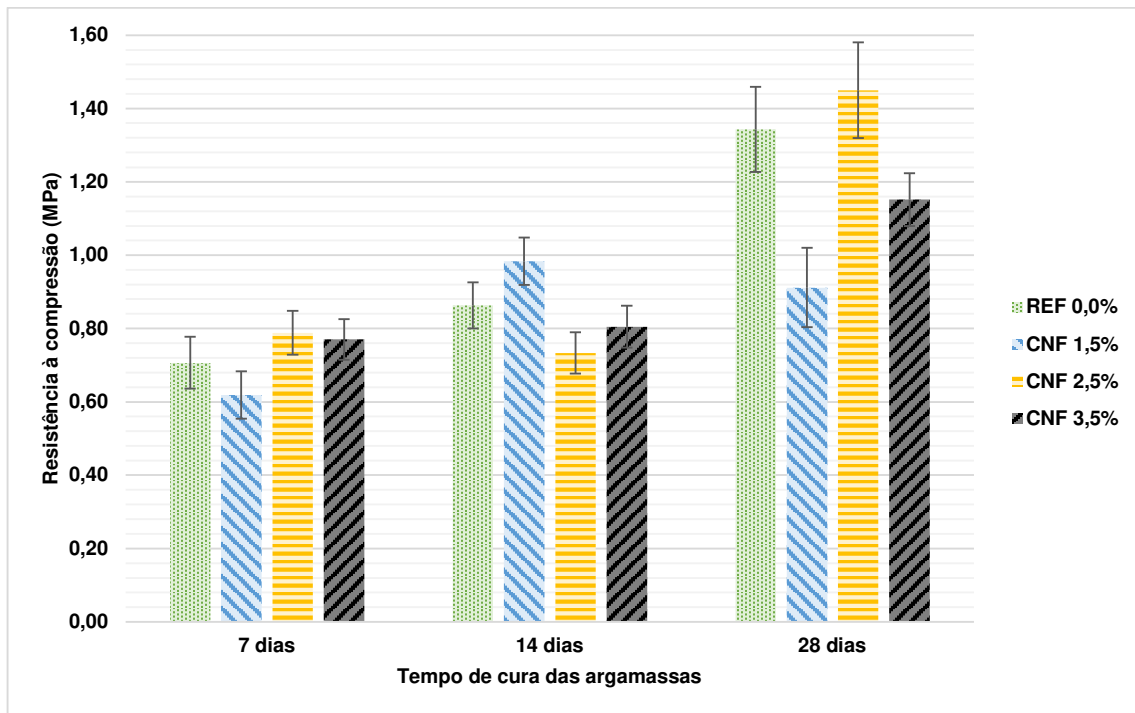
Na Tabela 13 estão apresentados os valores obtidos para a resistência à compressão das argamassas aos 7, 14 e 28 dias, respectivamente. Por fim, o gráfico da Figura 23 oferece uma visualização simultânea das grandezas apresentadas.

Tabela 13 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação da resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias das argamassas

Tratamento	7 dias			14 dias			28 dias		
	Média (MPa)	Desv. Pad. (MPa)	C.V. (%)	Média (MPa)	Desv. Pad. (MPa)	C.V. (%)	Média (MPa)	Desv. Pad. (MPa)	C.V. (%)
REF 0,0%	0,71	0,07	9,99	0,86	0,06	7,28	1,34	0,12	8,63
CNF 1,5%	0,62	0,06	10,45	0,98	0,06	6,55	0,91	0,11	11,88
CNF 2,5%	0,79	0,06	7,59	0,73	0,06	7,65	1,45	0,13	8,98
CNF 3,5%	0,77	0,06	7,16	0,81	0,06	7,06	1,15	0,07	6,25

Fonte: Autor (2022)

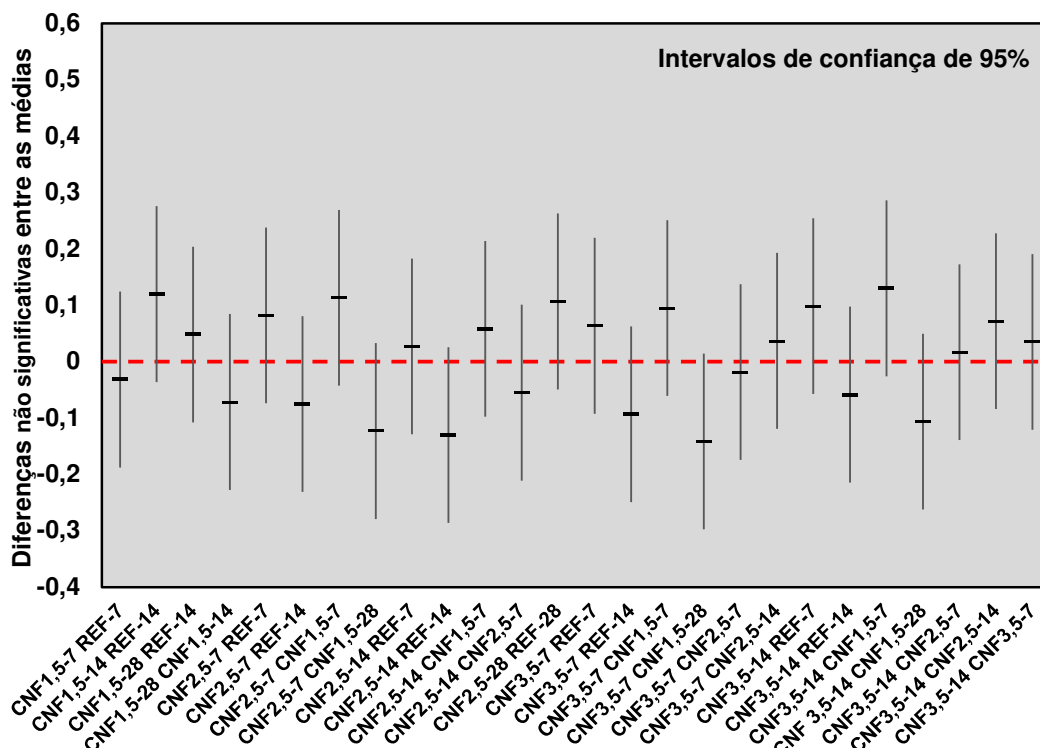
Figura 23 - Resistência à compressão das argamassas



Fonte: Autor (2022)

Para a interpretação dos resultados obtidos de resistência à compressão, utilizou-se a análise de variância (ANOVA), com intervalo de confiança de 95%, e o teste de Tukey de comparação múltipla entre grupos para verificar se houve diferença estatística entre os tratamentos e mensurar quais tratamentos diferiram significativamente entre si. A Figura 24 mostra as diferenças não significativas das médias entre os tratamentos.

Figura 24 - Diferenças não significativas das médias entre os tratamentos



Fonte: Autor (2022)

Aos 7 e 14 dias, todos os tratamentos produzidos com polpa de celulose nanofibrilada (CNF 1,5%, CNF 2,5% e CNF 3,5%) não apresentaram diferenças significativas em relação à argamassa de referência (REF 0,0%).

Além disso, as argamassas CNF 1,5% e CNF 3,5% tiveram uma redução dos valores médios em relação à argamassa REF 0,0% aos 28 dias, isto é, houve uma diferença significativa negativa entre os resultados.

Com relação à evolução da hidratação, as amostras da argamassa REF 0,0% tiveram um aumento estatisticamente significativo da resistência à compressão conforme a evolução das idades estudadas.

Por sua vez, as amostras de argamassa CNF 1,5% apresentaram um aumento significativo de resistência à compressão entre as idades de 7 e 14 dias, o que não ocorreu dos 14 aos 28 dias.

Já as amostras de argamassa CNF 2,5% e CNF 3,5% não apresentaram um aumento significativo dos 7 aos 14 dias. Porém, aos 28 dias, as amostras tiveram um aumento significativo na resistência à compressão.

Por último, as amostras da argamassa de CNF 2,5% não se mostraram significativamente diferentes das amostras de argamassa REF 0,0% aos 28 dias. Assim, é possível dizer que esses dois tratamentos apresentaram resistências estatisticamente iguais.

Adicionalmente, Alzoubi *et al.* (2020) perceberam que uma grande concentração de celulose nanofibrilada pode afetar negativamente a resistência à compressão de compósitos cimentícios. Esse resultado é confirmado por Oh *et al.* (2022), os quais atestam que os benefícios da utilização de CNF são extremamente dependentes do seu estado de dispersão dentro do material cimentício.

Em suma, todas as argamassas puderam ser classificadas como classe P1 de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005), pois todas obtiveram uma resistência à compressão menor do que 2 MPa.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho buscou analisar o efeito da adição de polpa de celulose nanofibrilada na produção de argamassas de revestimento. Dessa forma, foi possível concluir que:

- O índice de consistência de argamassas contendo polpa de celulose nanofibrilada tende a diminuir em pequenas porcentagens de adição, mas retorna para os valores de referência quando a porcentagem de adição aumenta;
- A densidade de massa no estado fresco de argamassas com polpa de CNF aumentou com maiores teores de adição, enquanto o teor de ar incorporado diminuiu na proporção inversa;
- A adição de polpa de CNF aumentou a absorção de água das argamassas em todos os casos, tanto por capilaridade quanto por imersão. De forma semelhante, a adição de polpa de CNF também elevou o coeficiente de capilaridade das argamassas;
- Argamassas produzidas com adição de polpa de CNF não apresentaram diferenças significativas no que diz respeito à resistência à compressão aos 7 e aos 14 dias. Por sua vez, a polpa de CNF influenciou negativamente os resultados aos 28 dias, em comparação à argamassa de referência;
- Com relação à evolução da hidratação das argamassas, as amostras de CNF 1,5% apresentaram uma evolução estatisticamente significativa somente dos 7 aos 14 dias, enquanto as amostras de CNF 2,5% e 3,5% apresentaram uma evolução significativa somente dos 14 aos 28 dias;
- A adição de polpa de CNF na produção das argamassas da pesquisa não foi capaz de alterar a classificação de nenhuma delas segundo a NBR 13281:2005.

Foram propostas também sugestões para trabalhos futuros, as quais incluem:

- Estudar o estado e o método de dispersão da polpa de CNF;
- Realizar análise química nas diferentes idades a fim de verificar a proporção de formação de produtos de hidratação do cimento;
- Utilizar corpos de prova prismáticos para realizar ensaio de resistência à tração na flexão;
- Usar aditivos para diminuir a relação água/cimento;
- Formular argamassas com cimento pozolânico para observar se há interação com as CNF's.

REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

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

ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). **NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). **NBR 6467**: Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). **NBR 9776**: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas. Normas do Mercosul). **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas. Normas do Mercosul). **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas. Normas do Mercosul). **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas. Normas do Mercosul). **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ALEA, A., FUENTE, E., BLANCO, A., *et al.*, "Nanocelluloses: natural-based materials for fiber-reinforced cement composites. A critical review", **Polymers**, v. 11, n. 3, pp. 518, 2019.

ALZOUBI, Hussain H. *et al.* Performance of cementitious composites with nano PCMs and cellulose nano fibers. **Construction and Building Materials**, v. 236, p. 117483, 2020.

ARARUNA, Júlio César Messias *et al.* Reaproveitamento de fibra de coco como alternativa de adição ecológica para o melhoramento de propriedades mecânicas em argamassas. **XVII Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação das Construções**. 2021.

ARAÚJO, Rísia Amaral. **Influência da utilização de resíduo de cerâmica vermelha nas propriedades de argamassas mistas**. 2017. Dissertação de Mestrado. Brasil.

BALEA, Ana *et al.* In situ production and application of cellulose nanofibers to improve recycled paper production. **Molecules**, v. 24, n. 9, p. 1800, 2019.

BARNAT-HUNEK, Danuta *et al.* Effect of eco-friendly cellulose nanocrystals on physical properties of cement mortars. **Polymers**, v. 11, n. 12, p. 2088, 2019.

BAUER, E.; SALOMÃO, M. C.; RODRIGUES FILHO, H. Avaliação de argamassas industrializadas quanto à capilaridade e retração de acordo com os critérios da NBR 13281 e do método MERUC/CSTB. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, XI**. 2015.

BAUER, E.; SOUSA, J. G. G.; GUIMARÃES, E. A. Estudo da consistência de argamassas pelo método de penetração estática de cone. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI**, p. 95-105, 2005.

BILCATI, Géssica Katalyne; COSTA, Marianne do Rocio de Mello Maron da; PAULINO, Rafaella Salvador. Efeito do reforço multi-escala fibra de celulose-microcelulose cristalina na fase de hidratação de pastas de cimento Portland. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, 2022.

BORGES, Ana Paula Silva Nascentes; MOTTA, Leila Aparecida de Castro; PINTO, Eliane Bernardes. Estudo das propriedades de concretos com adição de fibras vegetais e de polipropileno para uso em paredes estruturais. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, 2019.

BOUFI, Sami *et al.* Nanofibrillated cellulose as an additive in papermaking process: A review. **Carbohydrate polymers**, v. 154, p. 151-166, 2016.

CANOVA, José Aparecido. Substituição do cimento por finos de britagem em argamassa de revestimento. **Ciência & Engenharia**, v. 26, n. 2, p. 11-19, 2017.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M. Importância dos Materiais na Aderência dos Revestimentos de Argamassa. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 4.**, 2001, Brasília. Anais... Brasília: ANTAC, 2001.

CARASEK, Helena *et al.* Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 21, p. 714-732, 2016.

CARDOSO, Fábio Alonso. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico.** 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CORREIA, Viviane da Costa. **Produção de celulose nanofibrilada a partir de polpa organossolve de bambu para nanoreforço de compósitos cimentícios.** 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CZOVNY, Carolina Ksiaskiewicz. **Avaliação das propriedades frescas e endurecidas de compósitos cimentícios com adição de celulose nanofibrilada.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

DA SILVA, Jessica Pereira *et al.* Análise Comparativa entre a Resistência à Tração na Flexão e Compressão da Argamassa Convencional e Argamassa com Adição de Pó de Brita Granítica. **Ensaio e Ciência C Biológicas Agrárias e da Saúde**, v. 21, n. 3, p. 161-166, 2017.

DEZE, E. G. *et al.* Nanocellulose enriched mortars: Evaluation of nanocellulose properties affecting microstructure, strength and development of mixing protocols. **Materials Today: Proceedings**, v. 54, p. 50-56, 2022.

DJAFARI PETROUDY, Seyed Rahman *et al.* Recent advances in cellulose nanofibers preparation through energy-efficient approaches: A review. **Energies**, v. 14, n. 20, p. 6792, 2021.

ERTELT, Marvin Johannes *et al.* Bacterial additives improve the water resistance of mortar. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 8, n. 14, p. 5704-5715, 2020.

FREITAS, Cleverson de. **Argamassas de revestimento com agregados miúdos de britagem da região metropolitana de Curitiba**: propriedades no estado fresco e endurecido. 2010.

FURTADO, Gabriela Becker. **Influência da substituição do agregado miúdo natural por resíduo de cerâmica vermelha na produção de argamassas para revestimento**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

GARCIA, Hudson Balonecker. **Influência da adição de celulose nanofibrilada sobre as propriedades físicas e mecânicas de um concreto permeável**. 2021.

GIROTTO, L. S.; BARBOSA, M. P.; MACIEL, G. F. Avaliação do comportamento reológico na retração plástica e na fissuração de argamassas de concreto auto-adensável. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 7, p. 24-52, 2014.

GONÇALVES, Beatriz. **Evolução de fases durante a hidratação do cimento portland brasileiro por difração de raios x**. 2021.

GONCALVES, Jose *et al.* Cellulose nanofibres (CNF) for sulphate resistance in cement-based systems. **Cement and Concrete Composites**, v. 99, p. 100-111, 2019.

GONCALVES, Jose; BOLUK, Yaman; BINDIGANAVILE, Vivek. Turbidity-based measurement of bleeding in fresh cement paste as affected by cellulose nanofibres. **Cement and Concrete Composites**, v. 123, p. 104197, 2021.

GUO, A.; SUN, Z.; SATHITSUKSANO, N.; FENG, H. A Review on the Application of Nanocellulose in Cementitious Materials. **Nanomaterials**, 10, 2476, 2020.

GUO, Tengfei *et al.* Characteristic analysis of air bubbles on the rheological properties of cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 316, p. 125812, 2022.

HADDAD KOLOUR, Hosain; ASHRAF, Warda; LANDIS, Eric N. Hydration and early age properties of cement pastes modified with cellulose nanofibrils. **Transportation Research Record**, v. 2675, n. 9, p. 38-46, 2021.

HADDAD, Lucimar Dias de Oliveira *et al.* Influence of particle shape and size distribution on coating mortar properties. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 4, p. 9299-9314, 2020.

HASSAN, Mohammad L. *et al.* Nanofibers from bagasse and rice straw: process optimization and properties. **Wood science and technology**, v. 46, n. 1, p. 193-205, 2012.

HOBOLD FILHO, Frederico. **Caracterização de argamassa de revestimento a base de cal e aditivada**. 2015.

KOLOUR, H. An Investigation on the Effects of Cellulose Nanofibrils on the Performance of Cement Based Composites, **Advances in Civil Engineering Materials** **7**, 463-478, jul. 2018.

LI, L. G. *et al.* Roles of water film thickness and fibre factor in workability of polypropylene fibre reinforced mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 93, p. 196-204, 2018.

MARTINS, NURRIELLY DE DEUS *et al.* **ANÁLISE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE AREIA RECICLADA PROVENIENTE DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM ARGAMASSA DE REVESTIMENTO PARA HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL**. 2017.

MARTINS, Samantha Karina *et al.* Influência da celulose nanofibrilada sobre as propriedades mecânicas de matrizes cimentícias. In: **WORKSHOP DE TECNOLOGIA DE PROCESSOS E SISTEMAS CONSTRUTIVOS**. 2019. p. 1-5.

MARVILA, Markssuel Teixeira *et al.* ESTUDO DA CAPILARIDADE PARA ARGAMASSAS DE MÚLTIPLO USO. **CONGRESSO ANUAL DA ABM**, **72º**, v. 72, n. 1. 2017.

MEDEIROS, B. A. *et al.* Mechanical properties of mortar produced with the replacement of natural sand by scheelite residue. **Cerâmica**, v. 65, p. 443-451, 2019.

MEIER, Denis. **Análise da qualidade do agregado miúdo fornecido em Curitiba e região metropolitana**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

MEJDOUB, Roukaya *et al.* Nanofibrillated cellulose as nanoreinforcement in Portland cement: Thermal, mechanical and microstructural properties. **Journal of Composite Materials**, v. 51, n. 17, p. 2491-2503, 2017.

MONTES, Francisco *et al.* Rheological impact of using cellulose nanocrystals (CNC) in cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 235, p. 117497, 2020.

MORAES, Katherine Kaneda *et al.* Avaliação das propriedades mecânicas de compósitos de matriz cimentícia com microcelulose cristalina. **Revista matéria**, v. 23, n. 3, 2018.

NECHYPORCHUK, Oleksandr; BELGACEM, Mohamed Naceur; BRAS, Julien. Production of cellulose nanofibrils: A review of recent advances. **Industrial Crops and Products**, v. 93, p. 2-25, 2016.

OH, Jeong-A. *et al.* Durable cement/cellulose nanofiber composites prepared by a facile approach. **Cement and Concrete Composites**, v. 125, p. 104321, 2022.

ONUAGULUCHI, Obinna; PANESAR, Daman K.; SAIN, Mohini. Properties of nanofibre reinforced cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 63, p. 119-124, 2014.

PALOMAR, I.; BARLUENGA, G.; PUENTES, J. Lime-cement mortars for coating with improved thermal and acoustic performance. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 306-314, 2015.

PATEL, Priya; WAYAL, A. S.; BHARIMALLA, A. K. Performance evaluation of cement mortar blended nanofibrillated cellulose. **INTERNATIONAL JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND TECHNOLOGY**, v. 11, n. 03. 2020.

PAULINO, Rafaella Salvador *et al.* Ensaio squeeze-flow sobre substrato de cerâmica vermelha: comparativo com método normativo. **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, v. 19, p. 1-11, 2022.

PERIN, Lucas. **Avaliação de argamassas de revestimento contendo diferentes teores de aditivo incorporador de ar utilizados em substituição à cal.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso.

RATO, Vasco Nunes da Ponte Moreira. **Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas.** 2006.

RECHES, Yonathan. Nanoparticles as concrete additives: Review and perspectives. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 483-495, 2018.

RUDNITSKI, Jonas C.; NAKANISHI, E. Y. B.; MOHAMAD, Gihad. Avaliação de resíduo de construção e demolição de cor cinza e vermelho em argamassa de revestimento. In: **Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis**, Guimarães/Portugal. CLB-MS. 2014.

SANTIAGO, Cybèle Celestino. O Restauro de Argamassa de cal no Brasil. **CONSTRUINDO**, 2012.

SENNF, Luciano *et al.* **Efeito da adição de micro e nanossilica no comportamento reológico e propriedades no estado endurecido de argamassas e pastas de cimento.** 2009.

SILVA, Narciso G.; BUEST, Guilherme; CAMPITELI, Vicente C. Argamassas com areia britada: influência dos finos e da forma das partículas. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS**, Florianópolis, 2005.

SILVA, Narciso Gonçalves *et al.* Caracterização de argamassas industrializadas dos estados do Paraná e Santa Catarina segundo a NBR 13281/2005. **VIII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas.** 2009.

SILVA, Phelipe Gomes. **ESTUDO DA CONFORMIDADE DOS CONCRETOS PRODUZIDOS EM OBRAS DE PEQUENO E MÉDIO PORTE, NA CIDADE DE VARGINHA, CONFORME PARÂMETROS ESTABELECIDOS PELA ABNT NBR 12655: 2015.** 2017.

SOUSA, J. G. G.; BAUER, E. Contribuição ao estudo da trabalhabilidade das argamassas mistas. **ResearchGate**, v. 4, p. 279-289, 2003.

SOUSA, J. G. G.; BAUER, E. Estudo da reologia das argamassas de revestimento no estado fresco. **In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Brasil, Natal.** 2002.

TURRA, Daniel Giovanni. **Contribuições para o estudo de algumas propriedades nos estados fresco e endurecido da argamassa estabilizada por 72 horas.** 2016.

VELASCO, R. V. **Concreto de alto desempenho reforçado com fibras de polipropileno e sisal submetido a altas temperaturas,** Dissertação de M.Sc., Universidade Federal Do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

XIE, Hongxiang *et al.* Recent strategies in preparation of cellulose nanocrystals and cellulose nanofibrils derived from raw cellulose materials. **International Journal of Polymer Science**, v. 2018, 2018.

XU, Xuezhu *et al.* Cellulose nanocrystals vs. cellulose nanofibrils: a comparative study on their microstructures and effects as polymer reinforcing agents. **ACS applied materials & interfaces**, v. 5, n. 8, p. 2999-3009, 2013.

ZHANG, Guofang *et al.* Investigation on the performance of hydroxyethyl methyl cellulose modified cement mortars with Portland cement-calcium sulfoaluminate cement binders. **Construction and Building Materials**, v. 283, p. 122721, 2021.

ZHANG, Guoxue *et al.* Performance of mortar and concrete made with a fine aggregate of desert sand. **Building and Environment**, v. 41, n. 11, p. 1478-1481, 2006.

ZHANG, Yanxia *et al.* Cellulose nanofibrils. **Journal of Renewable Materials**, v. 1, n. 3, p. 195-211, 2013.