

Efeito da adição de polpa de celulose nanofibrilada nas propriedades de argamassas de revestimento

Effect of adding nanofibrillated cellulose pulp on the properties of coating mortars

Matheus Pereira de Lacerda¹, Géssica Katalyne Bilcati¹ , Rafaella Salvador Paulino² ,
Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa², Henrique Ajuz Holzmann³

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Civil. Av. Professora Laura Pacheco Bastos, 800, Industrial, 85053-525, Guarapuava, PR, Brasil.

²Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Civil. Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100, 8130-000, Curitiba, PR, Brasil.

³Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecatrônica. Av. Professora Laura Pacheco Bastos, 800, Industrial, 85053-525, Guarapuava, PR, Brasil.

e-mail: matheuslacerda1982@hotmail.com, gekatalyne@gmail.com, rafaellaspaolino@gmail.com, mariennemaron@gmail.com, haholzmann@utfpr.edu.br

RESUMO

A incorporação de adições de nanomateriais à base de celulose aos materiais cimentícios é interessante pois utiliza uma matéria-prima renovável e de grande disponibilidade global. Esta pesquisa buscou avaliar o efeito da adição de polpa de celulose nanofibrilada (CNF) em argamassas de revestimento. Foi produzido um traço referência (1:2:8, em volume), e outros três traços, com adição de polpa de CNF nos teores de 1,5%, 2,5% e 3,5%, em relação a massa de cimento. As argamassas foram avaliadas nos estados fresco (consistência, densidade de massa, ar incorporado e comportamento reológico pelo método *squeeze-flow*) e, endurecido (absorção de água por capilaridade, por imersão e resistência à compressão). Os resultados mostraram que, no estado fresco, as maiores diferenças em relação à argamassa referência foram apresentadas pela argamassa CNF_3,5%. Além do que, à medida que o teor de polpa de CNF aumentava, havia uma redução na capacidade de espalhamento das argamassas, um aumento do índice de absorção de água por capilaridade e imersão e evidenciou-se ainda que o ganho da resistência ocorria mais tardiamente. As amostras com polpa de CNF se mostraram estatisticamente iguais às de referência no que diz respeito à resistência à compressão na maior parte dos casos.

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

ABSTRACT

The incorporation of additions of cellulose-based nanomaterials to cementitious materials is interesting because it uses a renewable raw material that is widely available globally. This research sought to evaluate the effect of adding nanofibrillated cellulose pulp (NFC) in coating mortars. A reference mix (1:2:8, by volume) was produced, and three other mixes, with the addition of NFC pulp at the levels of 1.5%, 2.5%, and 3.5%, about the mass of cement. The mortars were evaluated in the fresh state (consistency, bulk density, air content and rheological behavior by the squeeze-flow method) and, hardened (water absorption by capillarity, immersion, and compressive strength). The results showed that, in the fresh state, the greatest differences in the reference mortar were presented by NFC_3.5% mortar. In addition, as the NFC pulp content increased, there was a reduction in the spreading capacity of the mortars, and an increase in the index of water absorption by capillarity and immersion and it was also evidenced that the compressive strength gain occurred later. Samples with NFC pulp were statistically equal to the reference ones about compressive strength in most cases.

Keywords: nanomaterials; nanofibrillated cellulose; coating mortar.

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 [1]. Como resultado do avanço da nanotecnologia nos últimos anos, pesquisas indicam [2, 3] que a adição de nanomateriais em argamassas de revestimento possibilita melhorias em suas propriedades, como aumento do desempenho mecânico e durabilidade. Dentre os nanomateriais que podem ser adicionados às argamassas está a celulose nanofibrilada (CNF).

A celulose é o polímero natural mais abundante encontrado no planeta e trata-se de um material renovável, biodegradável, sustentável e atóxico [4]. O uso da celulose em aplicações de alto valor agregado ainda é incomum devido à sua insolubilidade em água e na maior parte dos solventes orgânicos. A CNF, por sua vez, é produzida a partir do isolamento da parede das células de materiais compostos por lignina e celulose e o processo para sua obtenção é dado por desfibrilação mecânica, dispensando o uso de produtos químicos ácidos, prejudiciais ao meio ambiente [5]. Devido ao potencial hidrofílico, alta reatividade e elevada área superficial específica da CNF, a sua incorporação em materiais cimentícios pode proporcionar uma maior formação de produtos de hidratação do cimento no início do período de cura [6].

ONUAGULUCHI *et al.* [7] verificaram que a incorporação de 0,1% de CNF a compósitos cimentícios aumentou a resistência à tração destes materiais em até quase duas vezes. Entretanto, para teores maiores de adição, notou-se a formação de aglomerações na mistura, as quais impactaram negativamente nas resistências mecânicas do material, especialmente para o teor de 0,4%. DEZE *et al.* [8] sugeriram que a capacidade das CNF's de reforçarem os materiais cimentícios é decorrente da combinação e da aceleração das reações de hidratação. GARCIA [9] adicionou CNF ao concreto permeável e percebeu que pequenos incrementos de CNF aumentaram significativamente a espessura da pasta de cimento que envolvia os agregados, proporcionando aumentos tanto na resistência à compressão quanto na resistência à tração na flexão.

MORAES *et al.* [10] avaliaram a adição de CNF's em argamassas e perceberam que o caráter hidrofílico desse material fazia com que a relação água/cimento aumentasse, e determinou a dosagem ótima de CNF para incorporação em argamassas igual a 0,2% da massa de cimento. KOLOUR [11], por sua vez, observou que a adição de CNF tanto na pasta de cimento quanto ao concreto levou a uma redução da trabalhabilidade, o que sugere que CNF's são capazes de reter água no estado fresco dos compósitos. GUO *et al.* [12] concluiu, assim como KOLOUR [11], 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.

Por outro lado, uma questão amplamente discutida sobre o uso de adições de CNF em materiais cimentícios é a sua dispersão. Autores apontam que as alterações das propriedades dos materiais cimentícios dependem diretamente do método de dispersão das partículas [12–15]. Assim, teores muito elevados de CNF aliados a uma má dispersão poderiam contribuir para a formação de aglomerados de celulose, acarretando no prejuízo de algumas de suas propriedades.

Levando em consideração a importância de revestimentos de argamassa na construção civil e a crescente busca pela utilização de materiais provenientes de fontes renováveis [2], este estudo buscou avaliar os efeitos da adição de um nanomaterial à base de celulose em argamassas de revestimento, a fim de validar seu desempenho e motivar sua possível incorporação no mercado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Os materiais utilizados para a produção das argamassas foram cimento Portland CP II-F-32, cal hidratada CH-III, areia quartzosa lavada de rio, polpa de CNF e água.

O cimento CP II F-32 possui massa unitária de 1160,00 kg/m³ [16] e massa específica de 2,93 g/cm³ [17]. A cal hidratada possui massa unitária de 660,00 kg/m³ [16] e massa específica de 2,26 g/cm³ [17]. As Tabelas 1 e 2 apresentam as especificações físicas e químicas do cimento Portland e da cal hidratada, respectivamente, fornecidas pelos fabricantes.

A caracterização física da areia utilizada está apresentada na Tabela 3.

A massa unitária da celulose utilizada para produção da polpa de CNF utilizada nesta pesquisa foi determinada em 1020 kg/m³ [16]. Outras características da CNF foram fornecidas por ONUAGULUCHI *et al.* [7] e estão apresentadas na Tabela 4. A polpa de CNF foi preparada a partir da espécie *Pinus sp.*, inicialmente submetida a um processo de desintegração mecânica em moinho Bauer, durante cinco minutos, a fim de promover a sua individualização, obtendo-se uma baixa concentração, de 2%. O material resultante

Tabela 1: Especificações físicas e químicas do cimento CP II-F-32.

CARACTERÍSTICA	VALOR	LIMITE NBR 16697 [18]
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	–

Tabela 2: Especificações físicas e químicas da cal hidratada.

CARACTERÍSTICA	VALOR – NBR 7175 [19]
Granulometria #30 (%)	≤0,5
Granulometria #200 (%)	≤15
Óxidos (%)	≤15
CO ₂	≤15
Composição	Hidróxido de cálcio, magnésio, silicatos e aluminatos de cálcio

Tabela 3: Caracterização física da areia.

PROPRIEDADE	VALOR	NORMA TÉCNICA
Módulo de finura (–)	2,45	NBR NM 248 [20]
Dimensão máxima característica (mm)	2,4	
Classificação (–)	média	
Massa unitária – estado solto (kg/m ³)	1440,00	NBR NM 45 [16]
Massa específica (g/cm ³)	2,62	NBR NM 52 [21]
Absorção de água (%)	1,13	NBR NM 30 [22]
Umidade crítica (%)	1,75	NBR 6467 [23]
Coefficiente de inchamento	1,23	NBR 6467 [23]

deste processo foi lavado, teve seu excesso de licor de cozimento retirado e em seguida, foi centrifugado, dando origem à polpa, com concentração de 1% de celulose nanofibrilada e 99% água.

2.2. Procedimento experimental

A argamassa de referência foi preparada no traço 1:2:8 (cimento:cal:areia), em volume, a partir da qual foram produzidas outras três formulações de argamassas, adicionando-se polpa de CNF, em teores de 1,5%, 2,5% e 3,5%, em função da massa de cimento. Estes teores de adição foram escolhidos a partir dos resultados apresentados por CZOVNY [24], que indicou melhorias nas propriedades mecânicas de pastas de cimento, com

Tabela 4: Características da CNF.

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).

Tabela 5: Traço e consumo de materiais das argamassas.

ARGAMASSAS	TRAÇO (EM VOLUME)	TRAÇO (EM MASSA)	CIMENTO (g)	CAL (g)	AREIA (g)	POLPA DE CNF (g)	ÁGUA (ml)	RELAÇÃO A/C	RELAÇÃO A/MS
REF_0,0%	1:2:8	1:1,14:9,87	211,32	239,97	2085,35	0,00	496,60	2,35	0,20
CNF_1,5%						3,17	493,46	2,34	0,19
CNF_2,5%						5,28	491,37	2,33	0,19
CNF_3,5%						7,40	489,28	2,32	0,19

a adição de polpa de CNF no teor de 2,5%. Os consumos de materiais, traços, relações água/cimento (a/c) e água/materiais secos (a/ms) utilizados para o preparo das argamassas estão apresentados na Tabela 5.

O processo de mistura das argamassas seguiu as recomendações da NBR 16541 [25]. A relação água/cimento foi determinada a partir do ensaio de índice de consistência [25], fixado em 260 ± 10 mm. No estado fresco, as argamassas foram avaliadas quanto à densidade de massa e teor de ar incorporado [26] e ensaiadas em relação ao seu comportamento reológico pelo método *squeeze-flow* [27]. No estado endurecido, as argamassas foram avaliadas quanto à absorção de água por capilaridade [28] e por imersão [29], aos 28 dias, e à resistência à compressão [30], aos 7, 14 e 28 dias.

2.3. Análise estatística

Para a interpretação dos resultados, 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 as argamassas com adições e mensurar quais diferiram significativamente entre si.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização das argamassas no estado fresco

As propriedades das argamassas no estado fresco estão apresentadas na Tabela 6.

A análise estatística das diferentes argamassas quanto ao índice de consistência mostrou que não há diferença estatística significativa entre os resultados para esta propriedade ($\rho = 0,3182$).

Referente aos resultados de densidade de massa no estado fresco das argamassas, elas demonstraram um pequeno aumento, em torno de 0,20%, para os teores de 1,5% e 2,5% de adição de polpa de CNF, em relação à referência. Para o teor de 3,5%, o aumento foi de 0,49%, aproximadamente. A análise de variância (ANOVA), com intervalo de confiança de 95%, dos resultados desta propriedade não permitiu constatar se há diferença estatística significativa entre as argamassas ($\rho = 0,0497$). Através do teste de Tukey de comparação múltipla, verificou-se que apenas a argamassa CNF_3,5% apresentou um aumento estatisticamente significativo em relação a argamassa referência (REF_0,0%) para esta propriedade. BARNAT-HUNEK *et al.* [31] também

Tabela 6: Resultados de índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado das argamassas.

ARGAMASSAS	CONSISTÊNCIA (MM)			DENSIDADE DE MASSA (g/cm ³)			AR INCORPORADO (%)		
	MÉDIA	DESV. PAD.	C.V. (%)	MÉDIA	DESV. PAD.	C.V. (%)	MÉDIA	DESV. PAD.	C.V. (%)
REF_0,0%	258	2,1	0,81	2,014	0,002	0,09	2,22	0,09	4,11
CNF_1,5%	252	3,8	1,50	2,018	0,003	0,14	2,04	0,14	6,65
CNF_2,5%	256	2,6	1,03	2,018	0,005	0,24	2,01	0,24	11,78
CNF_3,5%	258	6,7	2,58	2,024	0,003	0,16	1,69	0,05	2,93

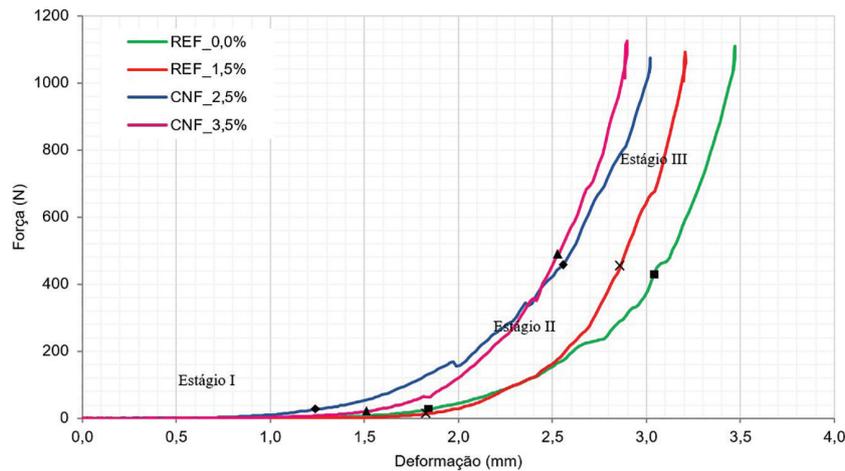


Figura 1: Curvas do ensaio *squeeze-flow* para as argamassas.

observaram que a adição de 1,5% de celulose nanocristalina contribuiu para um aumento de aproximadamente 3,9% na densidade de massa das argamassas em fresco.

Os resultados apresentados para o teor de ar incorporado das argamassas demonstraram que houve uma redução do mesmo com o aumento do teor de adição de polpa de CNF, para todas as argamassas, gradativamente. GUO *et al.* [12] correlacionaram o teor de ar incorporado com a diminuição da fluidez das argamassas, mostrando que argamassas aeradas têm sua consistência reduzida pelas bolhas de ar presentes no seu interior. A análise estatística dos resultados desta propriedade demonstrou que há diferença estatística significativa entre as argamassas ($p = 0,0141$). Dentre elas, apenas a argamassa CNF_3,5% apresentou uma redução estatisticamente significativa de teor de ar incorporado em relação a referência (REF_0,0%).

A caracterização reológica das argamassas foi avaliada a partir do método *squeeze-flow* e os resultados estão ilustrados no gráfico da Figura 1.

As curvas de carga-deslocamento do *squeeze-flow* mostram três comportamentos diferentes: primeiro, estágio I ou estágio elástico, onde o material se comporta como sólido em pequenas deformações, associado à tensão de escoamento e a deformação elástica; segundo, estágio II ou estágio plástico, grandes deformações com pouco aumento da carga, associado à deformação radial elongacional, tensão de cisalhamento e a deformação plástica e fluxo viscoso; terceiro, estágio III ou estágio de embricamento – grandes cargas para aumentar pouco a deformação, associado a forças que restringem o fluxo pela proximidade das partículas e ao enrijecimento por deformação [32]. Quando comparadas as curvas resultantes do ensaio *squeeze-flow* para a análise reológica das argamassas, observou-se uma redução na capacidade de espalhamento com a incorporação da polpa de CNF para todas as formulações de argamassas em comparação com a referência. Isso pode ter ocorrido, possivelmente, devido ao fato da adição de CNF reduzir a exsudação em pastas de cimento no estado fresco, o que faz com que a água retida pelas CNF's impeça a movimentação das partículas de água livre da pasta, aumentando a aglutinação da pasta e oferecendo resistência ao movimento [33, 34]. Além disso, este comportamento pode ser decorrente da tendência de aglomeração dos nanomateriais para altos teores e ainda estar relacionado ao fato de que a CNF possui uma maior área de superfície específica em relação ao cimento. Foi observado [35] um aumento de até 93% na viscosidade e na tensão de escoamento de argamassas com adição de celulose

nanofibrilada. Todas as argamassas com adição atingiram o estágio de embricamento com baixo deslocamento, variando de 2,5 mm a 3,0 mm. As argamassas CNF_0,0% e CNF_1,5% apresentaram a transição para o estágio de imbricamento a aproximadamente 2,9 mm e 3,0 mm de deformação, respectivamente. As argamassas CNF_2,5% e CNF_3,5%, por sua vez, apresentaram a transição entre 2,5 mm e 2,6 mm, aproximadamente. No estágio III, a CNF_1,5% demandou maior esforço para que ocorresse a mesma deformação apresentada pela CNF_0,0%. A CNF_2,5% foi a que obteve a transição para o estágio II, com menor deformação, no entanto, observou-se que a CNF_3,5% foi o que menos se deformou, mediante a mesma aplicação de carga, no estágio III. O comportamento de embricamento está associado ao atrito entre as partículas devido à restrição da geometria ou aumento da concentração de sólidos na região central entre as placas, o que está relacionado à segregação líquido-sólido [36]. Para argamassas de revestimento, quanto mais extenso for o estágio plástico (estágio II), melhor será o desempenho à aplicação. Isso acontece porque a capacidade de se deformar indica uma argamassa que poderia ser mais facilmente espalhada, especialmente se associada a uma força mais baixa, indicando um menor esforço requerido do operário de obra que realiza o serviço [32]. Portanto, as argamassas estudadas indicam que os menores teores de adição de polpa de CNF promoveriam um melhor espalhamento quando utilizadas como revestimento, para um mesmo índice de consistência.

3.2. Caracterização das argamassas no estado endurecido

Os resultados de absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade das argamassas estão apresentados na Tabela 7 e o padrão visual do comportamento das argamassas podem ser visualizados na Figura 2.

É possível observar um padrão de crescimento da absorção de água por capilaridade com o aumento do teor de polpa de CNF incorporada às argamassas, tanto aos 10 minutos quanto aos 90 minutos, o que pode ser justificado pelo fato de que quanto menor o diâmetro dos poros capilares, maiores são as pressões capilares desenvolvidas. Por esse motivo, a água consegue ser transportada com mais facilidade para dentro do volume de argamassa [37]. A adição de CNF leva a uma diminuição nos macroporos (vazios maiores do que 10 µm) e um aumento dos micros e mesoporos (vazios de dimensões entre 60 nm e 10 µm). Esse efeito, chamado

Tabela 7: Resultados de absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade das argamassas.

ARGAMASSAS	A10 (g/cm ²)			A90 (g/cm ²)			COEF. CAPILARIDADE (g/dm ² .min ^{1/2})		
	MÉDIA	DES. PAD.	C.V. (%)	MÉDIA	DES. PAD.	C.V. (%)	MÉDIA	DES. PAD.	C.V. (%)
REF_0,0%	0,26	0,11	9,89	1,09	0,20	7,90	16,29	1,90	11,18
CNF_1,5%	0,26	0,09	7,97	1,12	0,23	11,40	17,02	2,72	6,65
CNF_2,5%	0,44	0,04	9,32	1,48	0,09	6,29	20,47	1,22	5,94
CNF_3,5%	0,49	0,11	2,92	1,62	0,19	11,87	22,17	1,59	7,18

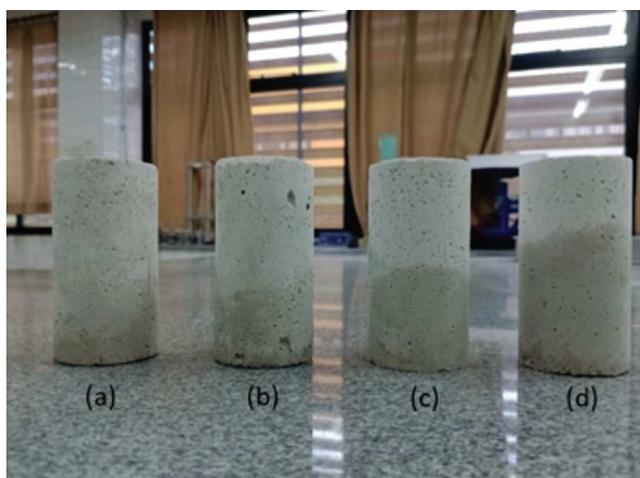


Figura 2: Padrão visual na altura da água que subiu por capilaridade nos corpos de prova: (a) REF_0,0%, (b) CNF_1,5%, (c) CNF_2,5% e (d) CNF_3,5%.

de refinamento do tamanho dos poros é decorrente da alta densidade de C-S-H promovida pelas CNF's na argamassa [38].

Análogo a isso, os valores obtidos para o coeficiente de capilaridade também aumentaram conforme o teor de polpa de CNF aumentou nas argamassas. MARTINS *et al.* [2] apontam que a CNF 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.* [10] 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.* [39].

De acordo com a análise estatística, os resultados apresentaram diferença estatística significativa entre si ($\rho = 0,0171$). Dentre as três argamassas com adição de polpa de CNF, apenas a formulação de argamassa CNF_3,5% apresentou um aumento estatisticamente significativo de absorção de capilaridade e coeficiente de capilaridade em relação a referência (REF_0,0%).

A Tabela 8 apresenta os resultados de absorção de água por imersão.

Os resultados permitem analisar que as argamassas com maiores teores de adição de polpa de CNF proporcionaram uma maior absorção de água pelos corpos de prova. OH *et al.* [14] observaram uma tendência característica na absorção de água ao adicionar CNF's aos materiais cimentícios. Essa propriedade tende a ser inferior 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 na argamassa com menor porcentagem de CNF, a qual correspondia à menor porosidade e à maior resistência à tração. VESLASCO [40] 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 *et al.* [37]. De acordo com a análise estatística, os resultados apresentaram diferença estatística significativa entre si para esta propriedade ($\rho = 0,0368$). No entanto, nenhuma das três formulações de argamassas com adição de polpa de CNF apresentou diferença em relação à referência (REF_0,0%), sendo que o aumento estatisticamente significativo de absorção de água foi constatado entre as argamassas CNF_1,5% e CNF_3,5%.

A Tabela 9 apresenta os resultados de resistência à compressão das argamassas e a Figura 3 mostra as diferenças não significativas das médias entre as mesmas.

Os resultados mostram que aos 7 e 14 dias todas as argamassas produzidas com polpa de CNF (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

Tabela 8: Resultados de absorção de água das argamassas.

ARGAMASSAS	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO (%)		
	MÉDIA	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

Tabela 9: Resultados de resistência à compressão das argamassas.

ARGAMASSAS	RESIS. À COMP. AOS 7 DIAS (MPa)			RESIS. À COMP. AOS 14 DIAS (MPa)			RESIS. À COMP. AOS 28 DIAS (MPa)		
	MÉDIA	DESV. PAD.	C.V. (%)	MÉDIA	DESV. PAD.	C.V. (%)	MÉDIA	DESV. PAD.	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

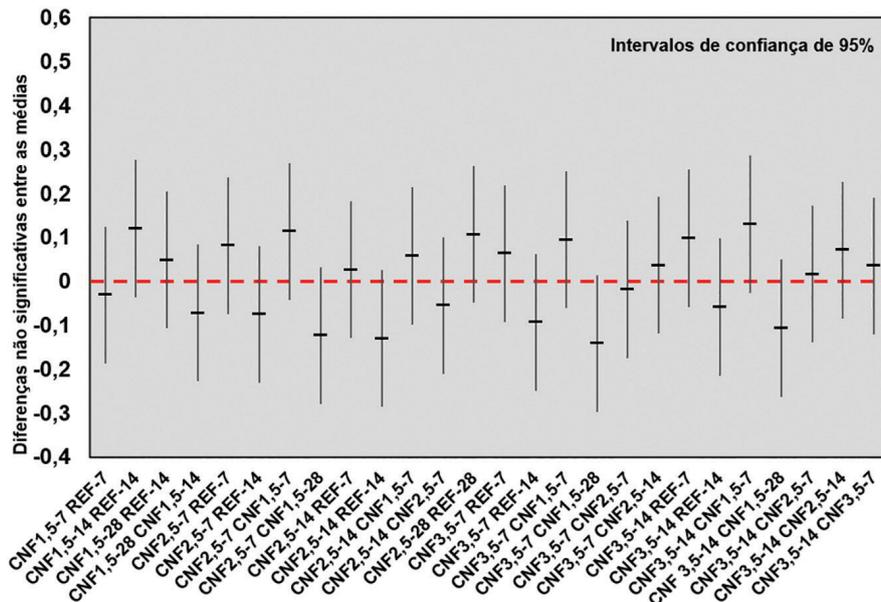


Figura 3: Diferenças não significativas das médias entre as argamassas.

significativo da resistência à compressão conforme a evolução das idades estudadas. 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 CNF_2,5% não se mostraram significativamente diferentes das amostras de argamassa REF_0,0% aos 28 dias. Assim, é possível dizer que essas duas formulações de argamassas apresentaram resistências estatisticamente iguais. Adicionalmente, ALZOUBI *et al.* [13] perceberam que uma grande concentração de CNF pode afetar negativamente a resistência à compressão de compósitos cimentícios. Esse resultado é confirmado por OH *et al.* [14], os quais atestam que os benefícios da utilização de CNF são extremamente dependentes do seu estado de dispersão dentro do material cimentício.

4. CONCLUSÕES

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

- A consistência das argamassas tende a aumentar com a adição de teores de polpa de CNF, portanto para mantê-la trabalhável é necessário reduzir a relação a/c;
- Para uma mesma consistência, a adição de polpa de CNF promoveu a redução do espalhamento das argamassas, demonstrando menor trabalhabilidade;
- 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 CNF_3,5% apresentaram uma evolução significativa somente dos 14 aos 28 dias, podendo ser um indício do efeito de autocura da CNF.

5. BIBLIOGRAFIA

[1] HADDAD, L.D.O., NEVES, R.R., OLIVEIRA, P.V., *et al.*, “Influence of particle shape and size distribution on coating mortar properties”, *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, n. 4, pp. 9299–9314, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.068>

- [2] MARTINS, S.K., MARTINI, S., BUENO, R.M., *et al.*, “Influência da celulose nanofibrilada sobre as propriedades mecânicas de matrizes cimentícias”, In: *Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos*, pp. 1–5, Porto Alegre, ANTAC, 2019.
- [3] RECHES, Y., “Nanoparticles as concrete additives: review and perspectives”, *Construction & Building Materials*, v. 175, pp. 483–495, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.214>
- [4] NECHYPORCHUK, O., BELGACEM, M.N., BRAS, J., “Production of cellulose nanofibrils: a review of recent advances”, *Industrial Crops and Products*, v. 93, pp. 2–25, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.02.016>
- [5] HASSAN, M.L., MATHEW, A.P., HASSAN, E.A., *et al.*, “Nanofibers from bagasse and rice straw: process optimization and properties”, *Wood Science and Technology*, v. 46, n. 1, pp. 193–205, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00226-010-0373-z>
- [6] MEJDOUB, R., HAMMI, H., SUÑOL, J.J., *et al.*, “Nanofibrillated cellulose as nanoreinforcement in Portland cement: Thermal, mechanical and microstructural properties”, *Journal of Composite Materials*, v. 51, n. 17, pp. 2491–2503, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1177/0021998316672090>
- [7] ONUAGULUCHI, O., BANTHIA, N., GOURLAY, K., *et al.*, “Moisture transport and steel rebar corrosion in repair composites incorporating Nano-Fibrillated Cellulose (NFC)”, *Construction & Building Materials*, v. 309, n. 22, pp. 125154, Nov. 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125154>
- [8] DEZE, E.G., CUENCA, E., NÁSNER, A.M.L., *et al.*, “Nanocellulose enriched mortars: evaluation of nanocellulose properties affecting microstructure, strength and development of mixing protocols”, *Materials Today: Proceedings*, v. 54, pp. 50–56, 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.511>
- [9] GARCIA, H.B., “Influência da adição de celulose nanofibrilada sobre as propriedades físicas e mecânicas de um concreto permeável”, Tese de M.Sc., Universidade São Judas Tadeu, São Paulo (SP), 2021.
- [10] MORAES, K.K., VANDERLEI, R.D., SANTOS, V.C., *et al.*, “Avaliação das propriedades mecânicas de compósitos de matriz cimentícia com microcelulose cristalina”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 23, n. 3, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0514>
- [11] KOLOUR, H., “An investigation on the effects of cellulose nanofibrils on the performance of cement based composites”, *Advances in Civil Engineering Materials*, n. 7, pp. 463–478, Jul. 2018.
- [12] GUO, T., QIAO, M., SHU, X., *et al.*, “Characteristic analysis of air bubbles on the rheological properties of cement mortar”, *Construction & Building Materials*, v. 316, pp. 125812, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125812>
- [13] ALZOUBI, H.H., ALBISS, B.A., ABU SINI, S.S., “Performance of cementitious composites with nano PCMs and cellulose nano fibers”, *Construction & Building Materials*, v. 236, pp. 117483, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117483>
- [14] OH, J., AAKYIIR, M., LIU, Y., *et al.*, “Durable cement/cellulose nanofiber composites prepared by a facile approach”, *Cement and Concrete Composites*, v. 125, pp. 104321, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104321>
- [15] BILCATI, G.K., COSTA, M.R.M.M., PAULINO, R.S., “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, n. 4, pp. e20220220, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2022-0220>
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e volume de vazios*, Rio de Janeiro, ABNT, 2006.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica*, Rio de Janeiro, ABNT, 2001.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos*, Rio de Janeiro, ABNT, 2018.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 7175: Cal hidratada para argamassas – Requisitos*, Rio de Janeiro, ABNT, 2003.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica*, Rio de Janeiro, ABNT, 2003.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente*, Rio de Janeiro, ABNT, 2009.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR NM 30: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água*, Rio de Janeiro, ABNT, 2001.

- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 6467: Agregados – Determinação do inchamento de agregado miúdo – Método de ensaio*, Rio de Janeiro, ABNT, 2006.
- [24] CZOVNY, C.K., “Avaliação das propriedades frescas e endurecidas de compósitos cimentícios com adição de celulose nanofibrilada”, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava (PR), 2021.
- [25] 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, ABNT, 2016.
- [26] 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, ABNT, 2005.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 15839: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método squeeze-flow*, Rio de Janeiro, ABNT, 2010.
- [28] 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, ABNT, 2005.
- [29] 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, ABNT, 2010.
- [30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos*, Rio de Janeiro, ABNT, 2019.
- [31] BARNAT-HUNEK, D., SZYMAŃSKA-CHARGOT, M., JAROSZ-HADAM, M., *et al.*, “Effect of cellulose nanofibrils and nanocrystals on physical properties of concrete”, *Construction & Building Materials*, v. 223, n. 30, pp. 1–11, Oct. 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.145>
- [32] MARTINS, E.J., “Diretrizes para dosagem de argamassas de revestimento utilizando métodos de empacotamento de partículas e comportamento reológico”, Tese de D.Sc., Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 2021.
- [33] GONCALVES, J., BOLUK, Y., BINDIGANAVILE, V., “Turbidity-based measurement of bleeding in fresh cement paste as affected by cellulose nanofibres”, *Cement and Concrete Composites*, v. 123, pp. 104197, 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104197>
- [34] HADDAD KOLOUR, H., ASHRAF, W., LANDIS, E.N., “Hydration and early age properties of cement pastes modified with cellulose nanofibrils”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2675, n. 9, pp. 38–46, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1177/0361198120945993>
- [35] TÜRK, E., KARATAŞ, M., DENER, M., “Rheological, mechanical and durability properties of self-compacting mortars containing basalt powder and silica fume”, *Construction & Building Materials*, v. 356, n. 21, pp. 129229, Nov. 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129229>
- [36] CARDOSO, F.A., “Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico”, Tese de D.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo (SP), 2009.
- [37] BORGES, A.P.S.N., MOTTA, L.A.D.C., PINTO, E.B., “Estudo das propriedades de concretos com adição de fibras vegetais e de polipropileno para uso em paredes estruturais”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 24, n. 2, pp. e12364, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190002.0679>
- [38] GONCALVES, J., EL-BAKKARI, M., BOLUK, Y., *et al.*, “Cellulose nanofibres (CNF) for sulphate resistance in cement-based systems”, *Cement and Concrete Composites*, v. 99, pp. 100–111, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.03.005>
- [39] PATEL, P., WAYAL, A.S., BHARIMALLA, A.K., “Performance evaluation of cement mortar blended nanofibrillated cellulose”, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, v. 11, n. 3, 2020.
- [40] VELASCO, R.V., “Concreto de alto desempenho reforçado com fibras de polipropileno e sisal submetido a altas temperaturas”, Tese de M.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (RJ), 2002.