

Análise do processo de dispersão da nanocelulose cristalina para a produção de compósitos cimentícios

Analysis of crystalline nanocellulose dispersion process for the production of cementitious composites

Allana Ribeiro Mendes 
Romel Dias Vanderlei 
Matheus Augusto Basso 

Resumo

Este artigo tem por objetivo apresentar uma investigação do processo de dispersão de suspensões aquosas com nanocelulose cristalina (NCC) para fabricação de compósitos cimentícios reforçados com microcelulose cristalina (MCC) e fibras de polipropileno (FPP).

Inicialmente foram caracterizadas as soluções aquosas com nanocelulose com diferentes teores de surfactante (Pluronic F-127) quanto à qualidade da dispersão, por meio do espalhamento dinâmico de luz, potencial zeta e espectroscopia UV-Vis, para determinar o teor ideal de surfactante. Em seguida, as suspensões aquosas foram adicionadas à mistura cimento-areia para preparação dos compósitos. As propriedades no estado fresco e endurecido foram investigadas em cada um dos teores de adição combinados. O teor ótimo de Pluronic para dispersar a nanocelulose foi de 40% em relação à massa dela. Verificou-se redução da trabalhabilidade nas amostras. Os compósitos do traço 1 (0,3% FPP, 0,5% MCC e 0,3% NCC), quanto ao desempenho mecânico, apresentaram incrementos em torno de 17% de resistência à compressão aos 56 dias e de 18% no módulo de elasticidade, e de aproximadamente 7% na resistência à tração na flexão aos 28 dias.

Palavras-chave: Dispersão da nanocelulose cristalina. Fibras de polipropileno. Microcelulose cristalina. Compósitos cimentícios. Propriedades mecânicas.

Abstract

This paper aims to investigate the dispersion process of aqueous suspensions with crystalline nanocellulose (NCC) for the production of cementitious composites reinforced with crystalline microcellulose (MCC) and polypropylene fibers (FPP). Initially, aqueous solutions with nanocellulose with different levels of surfactant were characterized in terms of dispersion quality through dynamic light scattering, zeta potential and UV-Vis spectroscopy, aiming to determine the ideal surfactant content. Subsequently, the aqueous suspensions were added to the cement/sand mixture to prepare the composites. The properties in the fresh and hardened states were investigated for each addition level. The optimal content of Pluronic to disperse the nanocellulose was 40% in relation to its mass. The results showed a reduction in the workability of the samples. In terms of mechanical performance, the composites of recipe 1 (0.3% FPP, 0.5% MCC and 0.3% NCC) showed increases of around 17% in compressive resistance at 56 days, 18% in elasticity modulus and around 7% in tensile strength in flexion at 28 days.

¹Allana Ribeiro Mendes

¹Universidade Estadual de Maringá
Maringá - PR - Brasil

²Romel Dias Vanderlei

²Universidade Estadual de Maringá
Maringá - PR - Brasil

³Matheus Augusto Basso

³Universidade Estadual de Maringá
Maringá - PR - Brasil

Recebido em 07/04/22

Aceito em 26/06/22

Keywords: Crystalline nanocellulose dispersion. Polypropylene fibers. Crystalline microcellulose. Cementitious composites. Mechanical properties.

Introdução

A engenharia civil vem buscando desenvolver materiais de construção que atendam a normativas técnicas, aliando tecnologia de insumos mais resistentes e com durabilidade superior aos comercializados atualmente. Nos últimos anos, cientistas de todo o mundo têm focado no estudo da modificação de diversos materiais e no uso e aplicação de fibras sintéticas. De acordo com Rahman e Putra (2019), isso é importante na manufatura de compósitos de alto desempenho devido ao fato de suas propriedades serem superiores às das fibras naturais. “Entre as fibras usadas para reforço de materiais cimentícios, o uso de fibras sintéticas (poliméricas), vem ganhando importância, com destaque especial às de polipropileno, extensivamente utilizadas [...]” (LUCENA, 2017, p. 30). Concomitante às pesquisas com fibras sintéticas, o desenvolvimento de estudos que trabalham com adições vegetais na área da tecnologia dos materiais acendeu novas perspectivas aos pesquisadores, ao possibilitar analisar e trabalhar a estrutura das adições com maior precisão, e compreender melhor suas características mecânicas, físicas e químicas. Conforme Barnat-Hunek *et al.* (2019), isso decorre dos fatores ambientais.

Entre a ampla gama de matérias-primas de base biológica, a celulose é a mais abundante na natureza. Para Dhali *et al.* (2021), é considerada uma das candidatas mais adequadas para a síntese de produtos verdes devido a suas inúmeras características atrativas, incluindo renovabilidade, não toxicidade, biodegradabilidade, estabilidade coloidal e baixo custo.

A partir da celulose, segundo Santos *et al.* (2021), é possível obter a nanocelulose, que vem sendo utilizada para diversas finalidades. A utilização de nano e micropartículas de celulose nas pesquisas podem melhorar o comportamento de hidratação de compósitos cimentícios, facilitando a difusão de moléculas de água para as partes não hidratadas do cimento (SOUZA FILHO *et al.*, 2020). Nesse sentido, o uso de nanomateriais é uma questão importante para o desenvolvimento futuro do mercado, ainda mais se levados em consideração os aspectos de sustentabilidade. As nanoceluloses são naturais, abundantes e renováveis, portanto atraentes para o desenvolvimento de materiais sustentáveis para a construção.

Contudo, Hoyos, Cristia e Vázquez (2013) verificaram que a adição direta do pó dessas nanopartículas aos compósitos cimentícios não foi eficaz devido à distribuição não uniforme das aglomerações. Sanchez e Sobolev (2010) ressaltam que a dispersão adequada das nanopartículas é o critério mais significativo, pois esses materiais possuem cargas eletrostáticas elevadas e, por consequência, acabam se agregando uns com os outros, reduzindo, assim, seus benefícios, uma vez que formam regiões que não reagem com os demais constituintes, o que permite o surgimento de zonas com potencial falha na microestrutura. Para resolver esse problema, Souza Filho *et al.* (2020) afirmam haver técnicas de dispersão para garantir uma dispersão homogênea das nanopartículas na matriz cimentícia.

O cenário acima justifica a realização desta pesquisa, visto que grande parte dos trabalhos realizados nessa área aponta para a utilização de um ou mais tipos de adição em compósitos com resultados satisfatórios, e não há dúvidas de que o uso da nanocelulose como adição é promissor para adequar as propriedades do concreto, embora sejam necessários mais estudos para explorar o aprimoramento no desempenho mecânico em compósitos com adição de micro e nanocelulose por meio de um processo de dispersão eficaz e aplicável nas obras de engenharia. O presente trabalho propôs investigar a processo de dispersão da nanocelulose em soluções aquosas utilizando o surfactante Pluronic F-127 e, em seguida, as utilizou para a produção de compósitos cimentícios com microcelulose cristalina (MCC) e fibras de polipropileno (FPP), e avaliou suas propriedades no estado fresco e endurecido.

Fundamentação teórica

Deb *et al.* (2018) observaram ganhos de resistência à tração na flexão e ductilidade em compósito cimentícios e/ou concretos de alto desempenho em razão da adição de fibras poliméricas sintéticas, tais como polipropileno, polietileno, fibras de carbono e fibras de aço. Hisseine *et al.* (2019) verificaram que o efeito dos filamentos de nanocelulose em pastas de cimento proporcionaram incrementos quanto à resistência à compressão, ao módulo de elasticidade e à capacidade de flexão e tenacidade, advindos de melhorias nas propriedades da microestrutura da matriz cimentícia. As nanopartículas melhoram a hidratação do cimento, pois atuam como núcleos nas fases do cimento. Segundo Sanchez e Sobolev (2010), essas partículas atuam como nanorreforço devido a sua alta reatividade.

A dispersão da microcelulose cristalina (MCC) em solução aquosa, e posterior emprego como adição em compósitos cimentícios, foi utilizada na pesquisa desenvolvida por Parveen *et al.* (2017). Inicialmente foram preparadas diferentes suspensões aquosas, mediante processo de ultrassom aliado à utilização do surfactante Pluronic F-127. Essas soluções foram caracterizadas por meio de espectroscopia UV-Vis e de microscopia

óptica, quanto à qualidade da dispersão. Após as análises, os autores constataram que a utilização de 20% de Pluronic F-127 em relação à massa de microcelulose indicou maior quantidade de fibras dispersas na solução e, consequentemente, melhores resultados no desempenho mecânico dos compósitos.

Alshaghel *et al.* (2018) utilizaram suspensões de microcelulose cristalina (MCC) e nanotubo de carbono (CNT) dispersas em água por meio de Pluronic F-127 e brometo de cetrimônio (CTAB), mediante processo de ultrassom. Os autores constataram que, em proporções adequadas dos agentes dispersivos, as soluções apresentaram as melhores condições de dispersão, tais como homogeneidade e estabilidade. Em consequência, verificaram ganhos de 23% na resistência à flexão aos 56 dias e incrementos de 28% quanto à resistência à compressão.

A dispersão da MCC por meio do método de dispersão física com uma energia intensiva menor, segundo Silva *et al.* (2018), é recomendada até o valor de 0,2% de MCC. Constatou-se que a consistência da pasta de argamassa reduziu em função do aumento do teor de adição. Já no desempenho mecânico evidenciou-se melhorias nos primeiros dias de hidratação (3 e 7 dias) em porcentagens inferiores a 0,2% de adição de MCC. Os resultados obtidos laboratorialmente mostraram ganhos de 20,4% na resistência à flexão utilizando 0,6% de MCC e de 19,8% na resistência à compressão com 0,2% de MCC. Além disso, após 28 dias de hidratação houve um incremento de 27,2% na energia de fratura do compósito produzido, no teor de adição de 0,2% de MCC.

Pescarolo *et al.* (2022) avaliaram a influência da inserção de microfibras de celulose no teor de ar, na retenção de água e na reologia de argamassas. Os resultados obtidos evidenciaram que a inserção de microfibras promoveu a incorporação de ar devido a sua dispersão e ao efeito recorrente do atrito entre as partículas da mistura. As argamassas apresentaram retenção de água devido à adição das microfibras, uma vez que estas são constituídas de microtubos de celulose e são hidrofílicas.

Materiais e métodos

Materiais

A nanocelulose (NCC) e a microcelulose (MCC), ambas empregadas na pesquisa, foram fabricadas pela empresa Fibria, representante da Celluforce Montreal, e pela Sigma Aldrich respectivamente. Suas propriedades se encontram listadas na Tabela 1.

A análise de difração de raios X (DRX) das amostras de MCC e NCC (Figura 1) foi realizada em difratômetro de raios X do modelo Shimadzu XRD 6000 com fonte de cobalto (Co) e monocromador de cristal de grafite. Os parâmetros utilizados para análise foram radiação de cobalto $\text{CoK}\alpha$ (tensão 40 kV e 30 mA), ângulo de incidência dos raios X de 2θ , com intervalo angular 2θ de 3° (2θ inicial) e 80° (2θ final), velocidade angular de 2° por minuto, modo passo de $0,02^\circ$ e fenda de 0,3 mm.

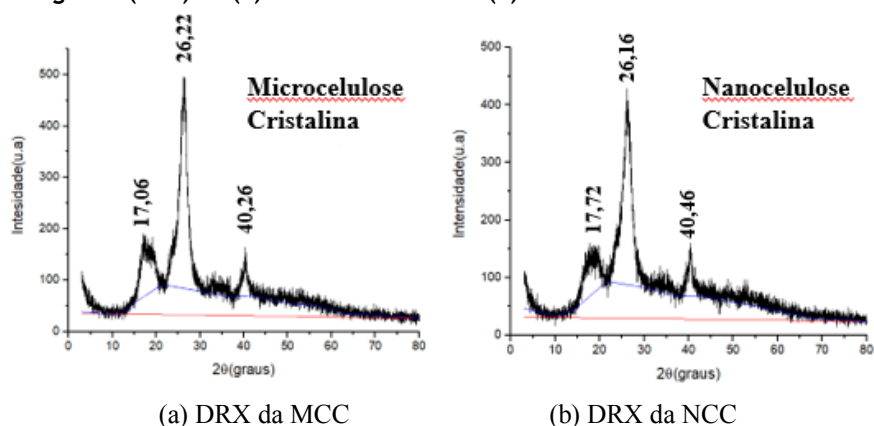
Verificaram-se picos cristalinos e halos amorfos (Figura 1) característicos da celulose de tipo I. Foram definidos os picos para 2θ iguais a $17,06^\circ$, $26,22^\circ$ e $40,26^\circ$ para a microcelulose, e os picos para 2θ iguais a $17,72^\circ$, $26,16^\circ$ e $40,46^\circ$ para a nanocelulose.

Tabela 1 - Propriedades da MCC e da NCC

Propriedades	MCC	NCC
Aparência (cor)	Branca ou praticamente branca	Branca
Aparência (forma)	Pó	Pó (<i>spray dryer</i>)
pH	4,5-7,5	6-7
Densidade	0,6 g/cm ³	0,7 g/cm ³
Tamanho da partícula	51 µm	1-50 µm

Fonte: fabricante Sigma Aldrich (2020).

Figura 1 - Difratoograma (DRX) da (a) microcelulose e da (b) nanocelulose cristalina



Os índices de cristalinidade (I_c) das amostras foram calculados utilizando-se os difratogramas obtidos pelo ensaio de DRX, pelo método de subtração do halo amorfo, de acordo com Park *et al.* (2010) e Correia (2015). Os I_c foram obtidos através das curvas de DRX, resultantes da razão entre as regiões cristalinas e a total do difratograma de DRX. Elas foram determinadas utilizando-se o programa Origin 8, e para a delimitação da região cristalina foi criada uma linha-base, anteriormente à determinação das regiões abaixo da curva, conforme mostra a Figura 1. Obteve-se para a MCC um I_c de 44,90%, e para a NCC, de 39,20%. Os valores baixos de cristalinidade também foram verificados na pesquisa de Santos (2016).

As amostras de MCC e NCC foram submetidas a microscopia eletrônica de varredura (MEV) em um equipamento FEG-SEM (NOVA 200 Nano SEM, FEI), usando o modo de elétron secundário, com tensão de aceleração de 10 kV após revestimento com película de 30 nm Au-Pd. Constatou-se que a nanocelulose (Figura 2) apresenta uma morfologia esférica, com regiões de aglomerados. No trabalho de Travalini *et al.* (2016), durante a análise por microscopia eletrônica, verificou-se que os dois tipos de celulose nanocristalina, uma extraída da fibra do bagaço de mandioca branqueada e a outra extraída da celulose microcristalina, também apresentaram morfologia esférica. Os autores afirmam que o processo de secagem das suspensões contendo o material é responsável pela formação de aglomerados esféricos, devido ao efeito de tensão superficial das gotas de água que são evaporadas e do fato de seu tamanho ser maior que o comprimento das fibras de celulose nanocristalina.

Observa-se que a microcelulose (Figura 3) tem formato de haste e superfície rugosa. Semelhante morfologia foi verificada na pesquisa de Parveen *et al.* (2017), em que apontaram que a microcelulose tem formato de grandes hastes fibrosas. Bertan (2018), ao analisar a microcelulose, tanto a cristalina quanto a amorfa, constatou diferenças entre a morfologia superficial delas. Verificou que a celulose cristalina possuía um arranjo superficial mais definido e com aspecto de fibras cilíndricas. Já a amostra amorfa exibiu desarranjo de sua microestrutura superficial, evidenciando formas e tamanhos irregulares, além de não ter formato fibroso.

Informações semelhantes às observadas por Bertan (2018) são verificadas nas imagens do MEV (Figuras 2 e 3) da presente pesquisa. Constatou-se que ambas exibiram morfologias distintas, tendo a microcelulose formato mais fibroso, enquanto a nanocelulose uma morfologia mais esférica. Esta também apresentou maior heterogeneidade quanto a tamanho e forma. Os dados obtidos com o MEV corroboram os índices de cristalinidade, ao se constatar que a microcelulose exibe maior índice do que a nanocelulose, além de ter morfologia superficial mais homogênea.

As fibras de polipropileno (FPP) utilizadas na pesquisa têm diâmetro médio de 1 a 1,3 dtex, uma unidade usada para classificar as características da grama sintética, comprimento de 10 mm e densidade de 0,905 g/cm³, cujo fabricante é a empresa Brasilit Saint-Gobain. O cimento Portland utilizado foi o do tipo CPV-ARI (correspondente na norma internacional ASTM C150 ao tipo V), da marca Cauê, da InterCement Brasil. As propriedades do cimento são listadas na Tabela 2. O agregado miúdo foi areia média de origem quartzosa da região de Maringá, PR, massa específica de 2,64 g/cm³, massa unitária solta de 1,49 g/cm³, massa unitária compactada de 1,61 g/cm³, módulo de finura 2,47, diâmetro máximo característico #2,36 mm; o aditivo superplastificante (ADVA 458), fabricado pela empresa Grace, base química de poliacrilato, aspecto líquido alaranjado e massa específica de 1,075-1,115 g/cm³; o surfactante não iônico Pluronic F-127, produzido pela Sigma Aldrich, CAS 9003-11-6, massa molar de 12.600 g/mol; CMC (ppm) – 25 °C de 950-1.000; e o agente antiespuma tributil fosfato (TBP), produzido pela Sigma Aldrich, CAS 126-73-8, massa molar de 266,31 g/mol, densidade 0,97 g/cm³ (20 °C) e solubilidade de 6 g/l.

Figura 2 - Morfologia da NCC observada no MEV

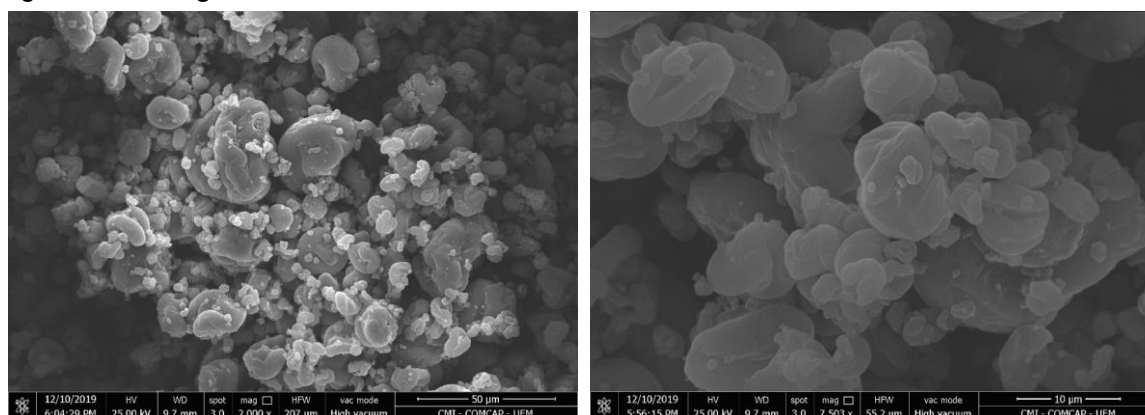


Figura 3 - Morfologia da MCC observada em MEV

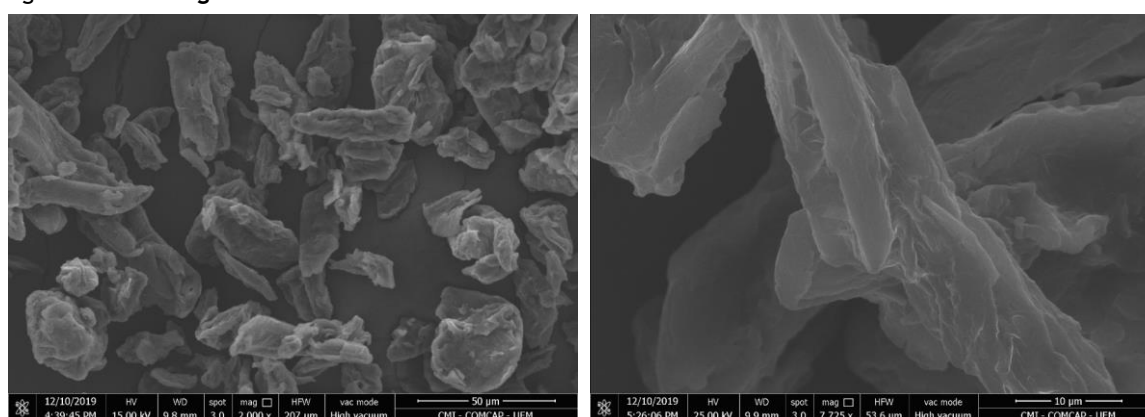


Tabela 2 - Resultados das características físicas e químicas do cimento CPV - ARI

Ensaio	Componentes/Propriedades	Média	Desvio máximo	Limites normativos
Físicos e mecânicos	Resistência à compressão – 1 dia (MPa)	21,8	0,77	≤ 14
	Resistência à compressão – 3 dias (MPa)	37,1	0,56	≥ 24
	Resistência à compressão – 7 dias (MPa)	42,0	0,69	≥ 34
	Blaine (cm /g)	4,79	121,74	-
Químicos	Perda ao fogo (%)	5,5	9,26	≤ 6,5
	MgO (%)	5,0	0,52	≤ 6,5
	SO ₃ (%)	3,1	0,10	≤ 4,5
Massa específica (g/cm ³)		3,04		

Fonte: InterCement Brasil (2019).

Métodos

Preparação das Soluções Aquosas de NCC

O método de preparo e dispersão da nanocelulose cristalina seguiu o procedimento metodológico empregado por Parveen *et al.* (2017) e Alshaghel *et al.* (2018), e os dados sobre a dispersão se encontram na Tabela 3.

Iniciou-se o procedimento misturando a NCC em água com um agitador magnético por 10 min. Em seguida, esse material foi armazenado por 2 dias para a completa hidratação da nanopartícula. Após essa etapa, o agente tensoativo Pluronic F-127, em pó, foi adicionado às soluções através de agitação magnética por 5 min. Então, as suspensões de NCC, juntamente com o Pluronic F-127, foram armazenadas por mais 2 dias. Transcorrido o período de armazenamento, as soluções foram agitadas em um banho ultrassônico (USC-1400) durante 15 min à frequência de 40 kHz e potência de 135 W. Por fim, foram realizadas as caracterizações.

Tabela 3 - Dados sobre a dispersão da NCC em soluções aquosas

Concentração de NCC (em relação à água)	Tipo de surfactante	Concentração de Pluronic F-127 (em relação à massa de NCC)	Condições de dispersão	Tempo de agitação (minutos)
0,21%	Pluronic F-127	20% 25% 30% 35% 40%	Banho ultrassônico	15

Na execução das amostras foram adicionado às soluções o agente antiespuma, uma vez que a incorporação de Pluronic F-127 produziu espuma. A concentração do agente antiespuma utilizada foi na razão de 1:0,5 em relação à concentração de Pluronic F-127.

Caracterização de suspensões aquosas de NCC

Durante esta etapa foi realizada caracterização das soluções aquosas de NCC com diferentes teores de Pluronic F-127 em relação à massa da nanopartícula, a fim de encontrar o teor ótimo de surfactante para dispersar a nanopartícula. As soluções de NCC foram preparadas com diferentes concentrações de Pluronic F-127 (sem adição de agente antiespuma) e caracterizadas em termos de tamanho das partículas dispersas nas soluções, através da técnica de espalhamento dinâmico de luz (em inglês, Dynamic Light Scattering, DLS). Concomitantemente a esse ensaio, foi determinado o potencial Zeta das soluções aquosas, que consiste na medida da magnitude da atração ou da repulsão eletrostática ou das cargas entre partículas, um dos parâmetros que afetam a estabilidade delas. De acordo com Mirhosseini, Hamid e Yusof (2008), a solução com potencial Zeta cujo valor em módulo é superior a 25 mV é considerada estável, sem tendência a flocular. Ambas as suspensões aquosas contendo nanocelulose foram analisadas utilizando-se o equipamento analisador de partículas Litesizer 500, da Anton Paar. Para a realização dessa análise, as soluções foram colocadas em cubetas de acrílico e levadas ao aparelho de leitura. A caracterização pela técnica DLS e o potencial Zeta foi realizada após as amostras serem agitadas em banho ultrassônico. As leituras foram feitas em triplicatas.

Por fim, as suspensões aquosas de NCC preparadas com Pluronic F-127 (sem adição de agente antiespuma) foram caracterizadas por UV-Vis (após o banho ultrassônico) para medir a absorvância das soluções preparadas. O ensaio foi realizado em uma leitora de microplacas (Molecular Devices, Flex Station 3). Para a determinação das concentrações de NCC construiu-se uma curva de calibração mediante a leitura da absorvância a 300 nm de diferentes soluções aquosas de NCC com concentrações conhecidas (0,1%, 0,2%, 0,4%, 0,7% e 1%). Essas soluções também foram preparadas em triplicata para a construção da curva. Após, foram preparadas diferentes soluções fixando-se a concentração de nanocelulose e variando as porcentagens de adição do Pluronic F-127. Foram preparadas, ainda, soluções com Pluronic F-127 sem a presença das fibras de NCC, utilizados como branco para a realização das leituras da absorvância.

Preparação dos compósitos cimentícios FPP/MCC/NCC

Foram produzidos compósitos cimentícios reforçados com 0,3% de FPP, valor selecionado com base no estudo de Carnio (2009). As demais adições foram de 0,5%MCC, valor de teor de adição selecionado com base nos estudos de Alshaghel *et al.* (2018), e de 0,3%NCC, com base nos estudos de Hissiene *et al.* (2019), Onuaguluchi, Panesar e Sain (2014) e Cao *et al.* (2015). Com esses teores, variaram-se as diferentes taxas de FPP, MCC e NCC, conforme apresentado na Tabela 4. Nesta etapa foram realizados os ensaios no estado fresco e no estado endurecido. O traço utilizado foi de 1:3, a/c=0,48, o teor fixo de 0,3% FPP (em relação ao volume do compósito), e 0,2% de superplastificante (em relação à massa de cimento).

As soluções aquosas contendo MCC/NCC foram preparadas conforme descrito na etapa de preparação das soluções aquosas de NCC. Seguem descritas as informações das quantidades em massa dos materiais utilizados na produção dos compósitos (Tabela 5).

Ensaio de índice de consistência dos compósitos

O ensaio realizado no estado fresco foi o índice de consistência, que tem por finalidade avaliar a trabalhabilidade das argamassas por meio da medida do espalhamento do material. O ensaio seguiu o procedimento de acordo com o NBR 7215 (ABNT, 2019).

Tabela 4 - Teores de adição dos compósitos cimentícios

Amostras	FPP ^(a)	MCC ^(b)	NCC ^(b)
Traço 0 – (T0)		-	-
Traço 1 – (T1)		0,5%	0,3%
Traço 2 – (T2)	0,3%	0,5%	0,2%
Traço 3 – (T3)		0,5%	0,4%
Traço 4 – (T4)		0,4%	0,3%
Traço 5 – (T5)		0,6%	0,3%

Nota: (a) em relação ao volume do compósito; e (b) em relação à massa de cimento.

Tabela 5 - Quantidade de materiais dos compósitos cimentícios

Código da amostra	Cimento (g)	Areia (g)	FPP (g)	MCC (g)	NCC (g)	Pluronic (g)	TBP	Super	a/c	Condições de dispersão
T1				3,12	1,87	0,748	0,374			
T2				3,12	1,25	0,624	0,312			
T3	624	1.872	3,3	3,12	2,45	0,980	0,490	0,2% em relação a massa de cimento	0,48	Ultrassom (15 min)
T4				2,45	1,87	0,748	0,374			
T5				3,75	1,87	0,748	0,374			

Caracterização do desempenho mecânico dos compósitos

Os compósitos foram caracterizados quanto às propriedades mecânicas no estado endurecido em relação à resistência à compressão axial de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019). Neste procedimento experimental foram ensaiados por traço 8 corpos de prova por idade no formato cilíndrico de (50x100) mm. As idades de rompimento foram de 28 e 56 dias. Nessa propriedade foi determinado o índice de desempenho de acordo com a NBR 13956-3 (ABNT, 2012).

As amostras também foram ensaiadas em relação ao módulo de elasticidade estático. Os procedimentos de execução foram de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2017) – Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Utilizou-se a metodologia “A” apresentada na norma, que consiste no método da tensão fixa para o ensaio. Nesse procedimento experimental foram ensaiados 6 corpos de prova na idade de 28 dias por traço, no formato cilíndrico de (50x100) mm. O ensaio foi realizado na máquina universal Instron EMIC 23-600, com célula de carga com capacidade de máxima de 600 kN.

Por fim, os corpos de prova foram caracterizados quanto à resistência à tração na flexão, e os procedimentos de execução foram de acordo com a NBR 13279 (ABTN, 2005). Neste procedimento experimental foram ensaiados por traço, 6 corpos de prova na idade de 28 dias, no formato prismático de (40x40x160) mm. O ensaio foi executado na máquina Universal Instron/Emic 23-600.

Critérios das análises estatísticas dos resultados

Para verificar a influência dos fatores que afetam as propriedades das amostras, foi realizada uma análise de Variância (ANOVA one-way) e teste de Tukey. Os testes estatísticos foram realizados considerando-se um nível de confiança de 95%, sendo a ANOVA usada para avaliar a relevância da adição de diferentes teores da micro e da nanocelulose cristalina nas propriedades dos traços reforçados com fibras de polipropileno. O teste de Tukey, por sua vez, foi realizado para investigar quais os fatores foram responsáveis pelas alterações em tais propriedades. Foi utilizado o software estatístico Statistica 10.0 para a realização da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey.

Resultados e discussões

Análise e dispersão da nanocelulose cristalina

Após o preparo, as soluções aquosas foram caracterizadas quanto à qualidade de dispersão, cujos resultados se encontram na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados da caracterização das soluções aquosas de NCC (\pm desvio padrão)

Teores Pluronic F-127	DH (mm)	Pz (mV)	Concentração de NCC dispersa (mg/ml)
20%	217,17 \pm 8,23	-17,17 \pm 4,29	2,32 \pm 0,03
25%	225,70 \pm 9,80	-17,30 \pm 3,48	2,08 \pm 0,04
30%	228,40 \pm 4,23	-37,37 \pm 2,39	1,68 \pm 0,05
35%	220,00 \pm 3,22	-25,07 \pm 7,82	1,67 \pm 0,02
40%	220,10 \pm 3,90	-31,83 \pm 1,62	2,60 \pm 0,05

Nota: DH = diâmetro hidrodinâmico; e Pz = valor de potencial Zeta.

Os tamanhos das partículas de NCC nas suspensões aquosas foram determinados medindo-se o diâmetro hidrodinâmico através do DLS (Tabela 6). Foi realizada a análise ANOVA dos resultados obtidos para o p-valor dos compósitos, e os resultados confirmam que a baixa variação entre as médias do diâmetro hidrodinâmico entre as soluções não implica diferença significativa, pois o p-valor 0,26 é maior que o nível de significância de 5%. Portanto, nesta propriedade, a adição do agente tensoativo Pluronic F-127 não provocou alterações significativas no tamanho das partículas durante o processo de dispersão.

Posteriormente foram determinados os valores de potencial Zeta das soluções aquosas (Tabela 6) com as nanopartículas, e, pelos resultados obtidos pela análise de variância ANOVA, os teores de Pluronic influenciam, ao nível de 5% de significância, na propriedade do potencial Zeta, pois o p-valor foi menor que 0,05. Para saber quais médias são significativamente diferentes entre si, foi aplicado o teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. Através do tratamento estatístico é possível afirmar que o teor de Pluronic a 30% (grupo b) apresentou comportamento semelhante estatisticamente ao de 40%, sendo este grupo composto dos maiores valores em módulo de potencial Zeta. O segundo grupo homogêneo (grupo c) foi formado com os teores de 35% e 40%, com valores intermediários entre os demais. Por fim, o último grupo homogêneo foi de 35%, 25% e 20% (grupo a), teores considerados iguais entre si, ou seja, as médias não diferem significativamente.

Quanto à caracterização por espectrofotometria na região UV-Vis, foi construída a curva de calibração (Figura 4) com as diferentes concentrações e leituras de absorbância. As mesmas foram realizadas no comprimento de onda de 300 nm, de acordo com Parveen *et al.* (2017). Em virtude da determinação da curva de calibração, foi possível verificar que o coeficiente de correlação R possui valor de 0,98, próximo de 1, o que evidencia um bom ajuste dos valores de absorbância em função das concentrações conhecidas, uma vez que esse coeficiente determina o quanto a equação da reta da amostragem se ajusta aos dados analisados. Por meio da equação de reta (Figura 4) e das leituras de absorbância (Figura 5), foram determinadas as concentrações de NCC dispersa em solução (Tabela 6).

Os espectros de UV-Vis das soluções aquosas em diferentes comprimentos de onda estão representados na Figura 5.

Através da Figura 5 verifica-se que a curva que apresenta a maior absorbância ao longo dos comprimentos de onda foi a solução com 40% de Pluronic. Já para as demais soluções é possível verificar decréscimo no valor de absorbância. Por meio dos resultados da análise ANOVA constatou-se que os teores de Pluronic influenciam ao nível de 5% de significância na propriedade de absorbância, pois o p-valor foi menor que 0,05. Para saber quais médias são significativamente diferentes entre si, foi aplicado o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Através do tratamento estatístico verificou-se que o teor de Pluronic a 40% (grupo d) é superior e diferente significativamente dos demais. O teor de 20% (grupo c) difere dos demais e é o segundo maior valor de concentração de nanocelulose dispersa, ou seja, a segunda melhor média, inferior ao grupo d e superior ao grupo b. Da mesma maneira, o teor de 25% (grupo b) difere dos demais e é o terceiro maior valor de concentração de nanocelulose dispersa. Os teores 30% e 35% são considerados iguais entre si, ou seja, as médias não diferem significativamente.

Em razão dos resultados obtidos nesta etapa do programa experimental, constatou-se por meio do tratamento estatístico que, referente ao potencial Zeta, mesmo o teor de Pluronic a 30% apresentando valor superior ao teor de 40%, não diferiram entre si. E após analisar os dados referentes à espectrofotometria na região UV-Vis, verificou-se que o teor de 40% de Pluronic apresentou o maior valor de absorbância. Após o tratamento estatístico, constatou-se que esse teor era superior e diferente significativamente dos demais. Em virtude dessas constatações, pode-se concluir que o teor de Pluronic F-127 adequado para dispersar as fibras de nanocelulose cristalina é o de 40% em relação à massa de NCC.

Figura 4 - Curva de calibração para medição das concentrações das suspensões aquosas contendo NCC

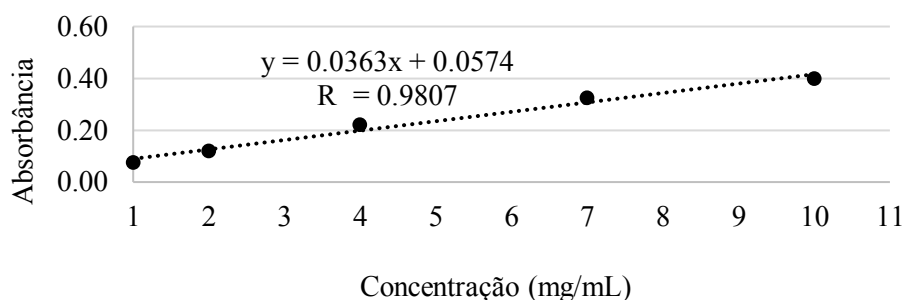
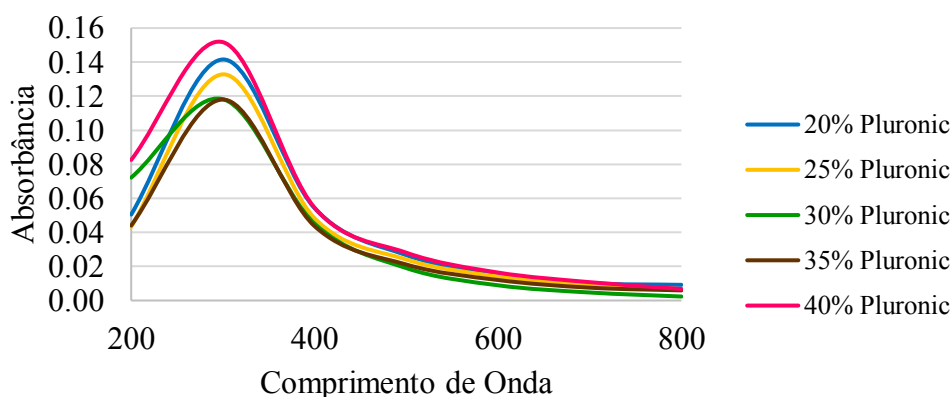


Figura 5 - Espectro UV-Vis de absorção das soluções de nanocelulose



Índice de consistência

É possível constatar que a junção das fibras favoreceu a redução dos valores de índice, sem necessariamente afetar a etapa de moldagem. Verificou-se que a maior redução do índice de consistência (Tabela 7) foi no traço 3, em torno de 30%, enquanto a menor foi no traço 2, por volta de 22%.

Através das imagens de MEV (Figuras 2 e 3) é possível verificar a morfologia de ambas as fibras e correlacionar com os valores obtidos de índice de consistência. Ao observarmos a Figura 3, constatamos que a superfície da microcelulose possui reentrâncias com características fibrosas e que as partículas se encontram espaçadas entre si. As partículas de nanocelulose, por sua vez, se encontram aglomeradas, além de exibir dimensões variadas, conforme visualizado na Figura 2. Em razão disso, acabam retendo determinada quantidade da água de amassamento, reduzindo, assim, a fluidez da argamassa. Da mesma forma, Pescarolo *et al.* (2022) constataram que a adição de microtubos de celulose favoreceu a retenção de água nas argamassas, em função de sua característica hidrofílica. Os autores ainda ressaltam que esta particularidade é potencializada pela elevada área superficial das nanopartículas.

Foi realizada a análise ANOVA dos resultados obtidos para o p-valor dos compósitos, e para a propriedade de índice de consistência esse índice foi menor que 0,05. Então, é válido afirmar que os valores médios dos índices são diferentes entre si ao nível de 5% de probabilidade, ou seja, pelo menos uma média é diferente entre si com o limite de confiança de 95%. Para saber quais médias são significativamente diferentes entre si, foi aplicado o teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. Através do tratamento estatístico é possível afirmar que não houve diferença significativa entre os valores médios dos traços T2, T4 e T5. Já o traço referencial apresentou média superior, além de ter valor diferente significativamente dos demais. Em contrapartida, os traços T1 e T3 apresentaram as menores médias, sendo semelhantes estatisticamente entre si.

Propriedades mecânicas

Segue abaixo a Tabela 8, com os valores médios obtidos nos ensaios de caracterização mecânica das amostras, referentes a seus traços.

Nos itens abaixo são discutidos os resultados obtidos em cada uma das propriedades mecânicas analisadas.

Resistência à compressão (NBR 7215:2019)

Os dados de resistência à compressão aos 28 e 56 dias são apresentados na Tabela 8 e nas Figuras 6 e 7. Observou-se que os traços T1, T3, T4 e T5 apresentaram acréscimos quanto à resistência à compressão e quanto aos valores do índice de desempenho em relação ao traço referencial (Figura 6).

Tabela 7 - Valores dos índices de consistência (\pm desvio padrão)

Amostras	Índice de consistência (mm)
T0	231,75 \pm 1,26
T1	169,11 \pm 7,86
T2	180,58 \pm 9,41
T3	163,01 \pm 3,78
T4	176,66 \pm 3,50
T5	174,32 \pm 7,69

Tabela 8 - Valores médios (\pm desvio padrão) dos ensaios referentes ao desempenho mecânico

Amostras	Resist. compressão 28 dias (MPa)	Resist. compressão 56 dias (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resist. tração na flexão (MPa)
T0	27,58 \pm 3,02	24,47 \pm 4,13	26,35 \pm 0,45	5,63 \pm 0,26
T1	31,51 \pm 2,00	32,26 \pm 3,67	31,12 \pm 1,73	6,02 \pm 0,37
T2	26,62 \pm 2,64	31,07 \pm 4,16	29,07 \pm 3,59	5,77 \pm 0,35
T3	28,51 \pm 3,70	28,95 \pm 2,83	29,86 \pm 1,08	6,42 \pm 0,28
T4	29,65 \pm 3,14	31,93 \pm 1,34	30,09 \pm 1,51	5,89 \pm 0,28
T5	30,04 \pm 1,28	28,92 \pm 4,82	30,77 \pm 1,61	5,32 \pm 0,52

Figura 6 - Resistência à compressão axial na idade de 28 dias

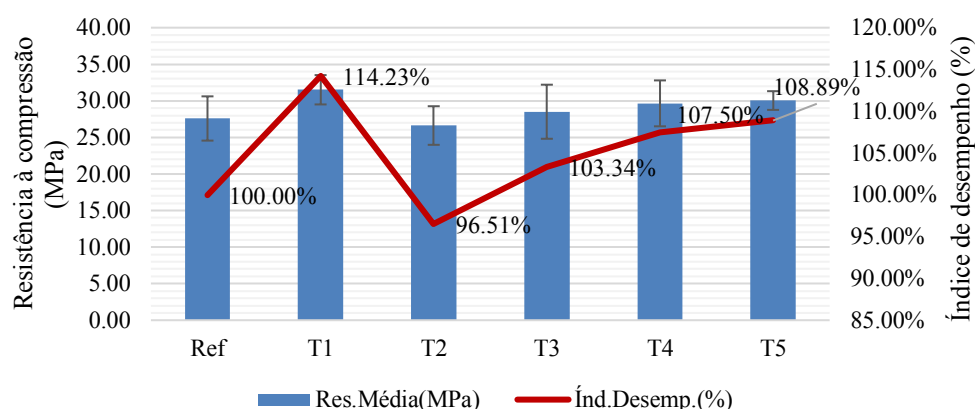
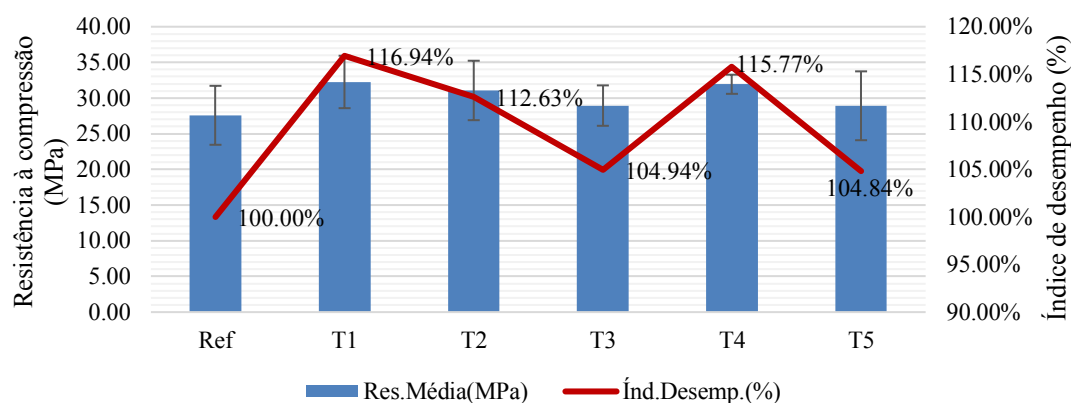


Figura 7 - Resistência à compressão axial na idade de 56 dias



Os ganhos foram de 14,23%, 3,34%, 7,5% e 8,89% respectivamente. O incremento no desempenho mecânico dos traços supracitados pode ser atribuído ao fato de que, nessas amostras, o processo de dispersão das nanopartículas se mostrou eficiente em termos de redução das regiões de acúmulo de produtos não hidratados e melhoria de desempenho mecânico das amostras, assim como verificado na pesquisa de Silva *et al.* (2018). Isso evidencia a importância de uma dispersão eficiente de nanopartículas em matrizes cimentícias.

Na idade de 56 dias constatou-se incremento quanto à resistência à compressão e, conseqüentemente, no índice de desempenho de todos os traços em comparação ao de referência, conforme a Figura 7.

O ganho de resistência pode ser atribuído à hidratação tardia nos compósitos que utilizaram o Pluronic F-127 no processo de dispersão, além da água retida na superfície das micropartículas. Esse fato foi relatado em Alshaghel *et al.* (2018), seguindo a mesma tendência de melhorias no desempenho mecânico desses compósitos em idades avançadas.

Em contrapartida, o traço de referência indicou redução da resistência aos 56 dias, o que pode estar associado à perda de eficiência da ligação da fibra de polipropileno com a matriz cimentícia em função dos vazios oriundos da etapa de moldagem. Vasconcelos (2012), em pesquisa sobre concreto com adição de polipropileno, também verificou redução do desempenho mecânico na idade de 60 dias, tendo relacionado o fato a condições referentes ao comportamento do concreto, naturalmente por falha no adensamento.

Foi realizada a análise estatística ANOVA dos resultados obtidos para o valor-p dos compósitos cimentícios para a propriedade de resistência à compressão analisada nas idades de 28 e 56 dias. Como esse índice foi menor que 0,05, é válido afirmar que os valores médios são diferentes entre si no nível de 5% de probabilidade, ou seja, pelo menos uma média é diferente entre si com limite de confiança de 95%. Sendo assim, estatisticamente, o resultado da análise ANOVA mostrou que houve diferença significativa entre os cinco traços analisados. Para saber quais médias são significativamente diferentes entre si, foi aplicado o teste de Tukey.

Através do tratamento estatístico constatou-se que, em relação à resistência à compressão relativa à idade de 28 dias, o grupo (a) apresentou as menores médias, composto dos traços T0, T2, T3, T4 e T5, enquanto o grupo (b), as maiores médias, composto dos traços T0, T1, T3, T4 e T5, porém em ambos os grupos os traços apresentaram médias estatisticamente semelhantes ao compósito de referência. Esse comportamento análogo entre os traços pode ser justificado pelo fato de o p-valor de 0,04 ser próximo a 0,05. Esses resultados indicam que os diferentes traços analisados não promoveram ganhos de propriedade de resistência aos 28 dias nessa propriedade.

Na idade de 56 dias foi aplicado o teste de Tukey e, após o tratamento estatístico, verificou-se que o grupo (a), contendo os traços T1, T2, T3, T4 e T5, mostrou-se superior e significativamente diferente do compósito de referência, com limite de confiança de 95%, ao passo que o grupo (b), composto pelos traços T3 e T5, não apresentou diferença significativa em comparação ao compósito de referência. Esses resultados indicam que o aumento do teor de adição de nano e microcelulose nos compósitos dos traços T3 e T5 acarretou uma dispersão ineficaz, criando regiões de acúmulo de partículas, o que acarretou redução de resistência. Em contrapartida, os demais traços, com teores de até 0,3% da nano e de até 0,5% de microcelulose, indicaram ganhos de resistência mecânica à compressão, possivelmente relacionados à eficiência da dispersão das partículas nas soluções aquosas. Por fim, observou-se que na resistência à compressão o ganho de propriedade em relação ao traço de referência foi verificado apenas aos 56 dias, conforme informações supracitadas.

Módulo de elasticidade estático (NBR 8522:2017)

De maneira geral, observa-se que os compósitos (Tabela 8) apresentaram incremento na propriedade de módulo de elasticidade estático conforme se variaram os teores de adição. Entre os traços que apresentaram incremento no módulo de elasticidade, o T1 foi o que indicou crescimento maior, no valor de 18,08%. O ganho dessa propriedade, em virtude da melhor interface entre as nanopartículas e a matriz cimentícia, se deve à eficácia do processo de dispersão. O incremento verificado na presente pesquisa foi superior ao de Alshaghel *et al.* (2018), que trabalharam com argamassas com dupla adição de MCC e nanotubo de carbono, e obtiveram um ganho de 12,7% no módulo. Do mesmo modo que Silva *et al.* (2018), verificaram que a MCC apresentou grande número de cristais dispersos individualmente e ausência de regiões de aglomerados, resultando, assim, em um melhor desempenho mecânico devido à melhor interface (visto que os cristais dispersos adequadamente apresentaram maior área de superfície em comparação às regiões de aglomerados de MCC), além de uma transferência maior de força entre MCC e a matriz de cimento, bem como a presença de poros com tamanhos menores por toda a matriz de cimento. Housseine *et al.* (2019) também constataram

incrementos no módulo de elasticidade das diferentes misturas com filamentos de nanocelulose. Estes pesquisadores alegam que os filamentos de nanocelulose podem ter alterado o comportamento da matriz cimentícia e que os ganhos nessa propriedade são decorrentes do potencial da nanocelulose em aumentar a resistência à primeira fissura governada pela matriz cimentícia.

Pela análise de variância ANOVA, os traços influenciaram significativamente no desempenho mecânico do módulo de elasticidade aos 28 dias, ao nível de 5% de significância, pois o p-valor foi menor que 0,05. Para saber quais médias são significativamente diferentes entre si, foi aplicado o teste de Tukey. Após o tratamento estatístico, verificou-se que o grupo (a), contendo os traços T1, T2, T3, T4 e T5, mostraram-se superiores e significativamente diferentes do compósito de referência, num limite de confiança de 95%, ao passo que o grupo (b), composto pelos traços T2, T3 e T4, não apresentaram diferenças significativas em comparação ao compósito de referência. Quanto à análise dessa propriedade, constata-se novamente que o teor de adição de nanocelulose de até 0,3% combinado com o teor de até 0,5% de micro, verificado no traço T1, resultou em um compósito com maior módulo de elasticidade, sendo esta uma propriedade mecânica que mede a resistência dos compósitos à deformação quando submetidos a um carregamento.

Resistência à tração na flexão (NBR 13279:2005)

Constatou-se que houve incremento na propriedade de tração dos compósitos cimentícios (Tabela 8) referente aos traços T1, T2, T3 e T4; em especial, o T3 indicou um ganho de 14% na resistência à tração, sendo este superior ao valor encontrado no estudo de Alshaghel *et al.* (2018), que obtiveram um ganho de 12,3% na resistência à flexão quando comparado à argamassa sem adição. Esse incremento no desempenho mecânico é decorrente da dispersão adequada das nanopartículas. De acordo com Silva *et al.* (2018), os cristais de MCC dispersos também atuaram como pontos de nucleação para hidratação das partículas de cimento e controle do crescimento destas, resultando numa matriz cimentícia mais resistente, com melhor empacotamento dos produtos de hidratação.

Pela análise de variância ANOVA, os traços analisados influenciaram significativamente no desempenho mecânico da resistência à tração aos 28 dias, ao nível de 5% de significância nas propriedades analisadas, pois o p-valor foi menor que 0,05. Para saber quais médias são significativamente diferentes entre si, foi aplicado o teste de Tukey. Após o tratamento estatístico, os resultados apontaram que os grupos (a) e (b) apresentaram médias semelhantes estatisticamente ao traço de referência, além de indicarem valores inferiores ao grupo (c), composto dos traços T1, T3 e T4. Por fim, ao correlacionar a Tabela 4, composta dos teores de adição, com os valores dessa propriedade, presentes na Tabela 8, constatou-se que a maior média da resistência à tração na flexão se deu com o maior teor de NCC, pois, ao analisar os traços T2, T1 e T3 (nessa ordem), à medida que se aumenta o teor de NCC, a média da resistência à tração na flexão cresce. Por outro lado, ao se analisarem os traços T4, T1 e T5 (nessa ordem), verifica-se que, ao aumentar o teor de MCC, a média da resistência à flexão diminui, ou seja, a dupla adição de MCC e NCC promoveram melhora na média da resistência à tração na flexão dos compósitos com FPP, tendo a NCC um papel importante no incremento dessa propriedade de resistência à flexão.

Conclusões

Por meio dos ensaios de caracterização quanto à qualidade da dispersão, determinou-se o teor de Pluronic F-127 de 40% em relação à massa de NCC. Já em relação ao desempenho mecânico das amostras, averiguou-se que os compósitos pertencentes ao traço T1 (0,3%FPP, 05%MCC, 0,3%NCC) apresentaram melhores resultados entre os demais traços. As amostras (T1) investigadas apresentaram ganhos de resistência à compressão nas idades de 56 dias de 16,94%, além do incremento no módulo de elasticidade de 18,08%, e na resistência à tração na flexão de 6,87% aos 28 dias.

Ressalta-se que os resultados permitiram identificar a influência das adições no desempenho dos compósitos nos estados fresco e endurecido, evidenciando a importância de uma dispersão eficaz, o que possibilita alavancar o conhecimento quanto aos benefícios advindos da utilização de nanopartículas de celulose na tecnologia do concreto.

Referências

ALSHAGHEL, A. *et al.* Effect of multiscale reinforcement on the mechanical properties and microstructure of microcrystalline cellulose-carbon nanotube reinforced cementitious composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 149, p. 122-134, Sept. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13956-3**: sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta: determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 7 dias. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: concreto: determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

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

BERTAN, D. W. **Produção e caracterização de celulose cristalina e amorfa e de partículas de quitosana para aplicação como estabilizantes de emulsões óleo-em-água**. Pirassununga, 2018. 110 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Engenharia de Alimentos) – Curso de Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2018.

CAO, Y. *et al.* The influence of cellulose nanocrystal additions on the performance of cement paste. **Cement and Concrete Composites**, v. 56, p. 73-83, fev. 2015.

CARNIO, M. A. **Propagação de trincas por fadiga do concreto reforçado com baixos teores de fibra**. Campinas, 2009. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, Campinas, 2009.

CORREIA, C. A. **Obtenção e caracterização de PLA reforçado com nanocelulose**. São Paulo, 2015. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Curso de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

DEB, S. *et al.* Improvement in tensile and flexural ductility with the addition of different types of polypropylene fibers in cementitious composites. **Construction and Building Materials**, v. 180, p. 405-411, Aug. 2018.

DHALI, K. *et al.* A review of nanocellulose as a new material towards environmental sustainability. **Science of the Total Environment**, v. 775, p. 145871, Jun. 2021.

HISSEINE, O. A. *et al.* Nanocellulose for improved concrete performance: a macro-to-micro investigation for disclosing the effects of cellulose filaments on strength of cement systems. **Construction and Building Materials**, v. 206, p. 84-96, May 2019.

HOYOS, C. G.; CRISTIA, E.; VÁZQUEZ, A. Effect of cellulose microcrystalline particles on properties of cement based composites. **Materials & Design**, v. 51, p. 810-818, Oct. 2013.

INTERCEMENT BRASIL. **Boletim técnico**: cimento Cauê estrutura CPV ARI 40kg. 2019. Disponível em: <http://www.intercement.com/files/pdf/portugues-br/cpv-ari-estrutura.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2019.

LUCENA, J. C. T. **Concreto reforçado com fibras de polipropileno**: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina. São Carlos, 2017. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

MIRHOSSEINI, H.; TAN, C. P.; HAMID, N. S. A.; YUSOF, S. Effect of Arabic gum, xanthan gum and orange oil contents on zeta-potential, conductivity, stability, size index and pH of orange beverage emulsion. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 315, n. 1-3, p. 4756, 2008.

ONUAGULUCHI, O.; PANESAR, D. K.; SAIN, M. Properties of nanofibre reinforced cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 63, p. 119-124, Jul. 2014.

PARK, S. *et al.* Cellulose crystallinity index: measurement techniques and their impact on interpreting cellulase performance. **Biotechnology Biofuels**, n. 3, p. 1-10, 2010.

PARVEEN, S. *et al.* A novel approach of developing micro crystalline cellulose reinforced cementitious composites with enhanced microstructure and mechanical performance. **Cement and Concrete Composites**, v. 78, p. 146-161, Apr. 2017.

PESCAROLO, A. *et al.* A influência de microfibras de celulose no estado fresco de argamassas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 22, n. 1, p. 179-190, jan./mar. 2022.

RAHMAN, R.; PUTRA, S. Z. F. S. Tensile properties of natural and synthetic fiber-reinforced polymer composites. **Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-reinforced Composites and Hybrid Composites**, p. 81-102, 2019.

SANCHEZ, F.; SOBOLEV, K. Nanotechnology in concrete: a review. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 11, p. 2060-2071, Nov. 2010.

SANTOS, F. C. dos. **Nanocompósito de acetato de celulose com nanocelulose obtida a partir do bagaço de cana-de-açúcar**. Campos dos Goytacazes, 2016. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Centro de Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2016.

SANTOS, R. F. *et al.* Nanofibrillated cellulose and its applications in cement-based composites: a review. **Construction and Building Materials**, v. 288, p. 123122, Jun. 2021.

SIGMA-ALDRICH. **Ficha de dados de segurança**. 2020. Disponível em: <https://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/DisplayMSDSPage.do?country=PT&language=pt&productNumber=11365&brand=SIAL&PageToGoToURL=https%3A%2F%2Fwww.sigmaaldrich.com%2Fcatalog%2Fsearch%3Fterm%3D9004-34-6%26interface%3DCAS%2520No.%26N%3D0%26mode%3Dpartialmax%26>. Acesso em: 15 dez. 2020.

SILVA, L. *et al.* A facile approach of developing micro crystalline cellulose reinforced cementitious composites with improved microstructure and mechanical performance. **Powder Technology**, v. 338, p. 654-663, Oct. 2018.

SOUZA FILHO, A. *et al.* Mechanical and micro-structural investigation of multi-scale cementitious composites developed using sisal fibres and microcrystalline cellulose. **Industrial Crops and Products**, v. 158, Dec. 2020.

TRAVALINI, A. P. *et al.* Nanocelulose de elevada cristalinidade extraída da fibra do bagaço de mandioca. **O Papel**, Ponta Grossa, v. 77, n. 1, p. 73-80, jan. 2016.

VASCONCELOS, R. E. **Fratura do concreto reforçado com fibras de aço e de polipropileno em meios normal e agressivo**. Campinas, 2012. 158 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

Allana Ribeiro Mendes

Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Administração do projeto, Validação de dados e experimentos, Redação do manuscrito original.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Estadual de Maringá | Av. Colombo, 5790 | Maringá - PR - Brasil | CEP 87020-900 | Tel.: (44) 3011-4322 | E-mail: allanarmendes@hotmail.com

Romel Dias Vanderlei

Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Metodologia, Supervisão.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Estadual de Maringá | E-mail: rdvanderlei@uem.br

Matheus Augusto Basso

Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Metodologia.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Estadual de Maringá | E-mail: m.augustobasso@gmail.com

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.