




## Nanofibras de celulose (NFC) como reforço de matrizes cimentícias: revisão sistemática da literatura

J. H. A. Rocha<sup>1\*</sup> , L. do N. Farias<sup>1</sup> , T. P. L. Siqueira<sup>1</sup> 

\* Autor de Contato: [joaquin.rocha@coc.ufrj.br](mailto:joaquin.rocha@coc.ufrj.br)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.594>

Recepção: 13/03/2022 | Aceitação: 08/07/2022 | Publicação: 01/09/2022

### RESUMO

O objetivo deste estudo é realizar uma revisão sistemática da literatura dos últimos cinco anos sobre o uso de nanofibras de celulose (NFC) em compósitos cimentícios. São apresentadas as principais formas de produção e dispersão, com destaque para o efeito sobre o comportamento dos materiais à base de cimento. O estudo considerou a influência das NFC nas propriedades no estado fresco e endurecido: reologia, hidratação, resistência à compressão, resistência à flexão, energia de fratura, entre outras. As NFC têm efeitos benéficos nas propriedades mecânicas; no entanto, maior pesquisa ainda é necessária para otimizar a produção e os processos de pré-tratamento das NFC; estabelecer relações sobre a durabilidade dos compósitos com NFC, e identificar possíveis impactos ambientais da sua utilização.

**Palavras-chave:** nanomateriais de celulose; compósitos cimentícios; estado fresco; estado endurecido; propriedades mecânicas.

**Citar como:** Rocha, J. H. A., Farias, L. do N., Siqueira, T. P. L. (2022), “*Nanofibras de celulose (NFC) como reforço de matrizes cimentícias: revisão sistemática da literatura*”, Revista ALCONPAT, 12 (3), pp. 311-327., DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.594>

<sup>1</sup>Programa de Engenharia Civil, PEC/COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

#### Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor J. H. A. Rocha, contribuiu com a ideia original em um 33%, coleta de dados em um 40%, escolha e desenvolvimento da metodologia de trabalho em um 40%, redação e discussão dos resultados em um 40%; a autora L. do N. Farias contribuiu com ideia original em um 33%, coleta de dados em um 30%, escolha e desenvolvimento da metodologia de trabalho em um 30%, redação e discussão dos resultados em um 30%, e a autora T. P. L. Siqueira contribuiu com ideia original em um 34%, coleta de dados em um 30%, escolha e desenvolvimento da metodologia de trabalho em um 30%, redação e discussão dos resultados em um 30%.

#### Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2023.

## Cellulose nanofibers (CNF) as reinforcement for cementitious matrices: a systematic literature review

### ABSTRACT

The aim of this study is to conduct a systematic literature review of the last five years on the use of cellulose nanofibers (CNF) in cementitious composites. The main production and dispersion methods are presented with emphasis on their effect on the behavior of cement-based materials. The study considered the influence of CNF on the fresh and hardened state properties: rheology, hydration, compressive strength, flexural strength, fracture energy, among others. CNF show positive effects on mechanical properties. However, further research is still necessary to optimize the production and pretreatment processes of CNF, establishing relationships regarding the durability of composites with CNF, and identifying possible environmental impacts of their use.

**Keywords:** cellulose nanomaterials; cementitious composites; fresh state; hardened state; mechanical properties.

## Nanofibras de celulosa (NFC) como refuerzo para matrices cementicias: revisión sistemática de la literatura

### RESUMEN

El objetivo de este estudio es realizar una revisión sistemática de la literatura de los últimos cinco años sobre el uso de nanofibras de celulosa (NFC) en compuestos a base de cemento. Se presentan las principales formas de producción y dispersión, con énfasis en el efecto sobre el comportamiento de los materiales a base de cemento. El estudio consideró la influencia de las NFC en las propiedades en estado fresco y endurecido: reología, hidratación, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, energía de fractura, entre otras. Las NFC tienen efectos beneficiosos sobre las propiedades mecánicas; sin embargo, aún se necesita más investigación para optimizar la producción de NFC y los procesos de pretratamiento; establecer relaciones sobre la durabilidad de los compuestos con NFC, e identificar los posibles impactos ambientales de su uso.

**Palabras clave:** nanomateriales de celulosa; compuestos de cemento; estado fresco; estado endurecido; propiedades mecánicas.

### Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

## 1. INTRODUÇÃO

A busca por materiais de construção mais sustentáveis e com reduzida emissão de CO<sub>2</sub> vêm crescendo significativamente ao longo das últimas décadas devido, principalmente, ao aquecimento global e ao fato de a indústria da construção ser considerada uma das mais poluentes do mundo (UN Environment *et al.*, 2018; CAO *et al.*, 2020). Nesta busca por materiais com menor impacto ambiental encontra-se a utilização dos chamados biomateriais, ou seja, materiais que incorporam em sua formulação produtos de origem vegetal (Barnat-Hunek *et al.*, 2019; Nishimura *et al.*, 2019; Abdellaoui; Bouhfid, 2020; Barría *et al.*, 2021). Segundo Hoyos *et al.* (2019) a sustentabilidade de um material é definida pela sua capacidade e taxa de regeneração e pela possibilidade de ser reassimilado ao meio ambiente após o uso.

Além disso, a utilização de materiais de escala nanométrica, chamados nanomateriais, em materiais de construção também vêm ganhando força ao longo dos últimos anos. Através da nanomodificação é possível alterar a nano e microestrutura das matrizes cimentícias visando modificar diversas propriedades do material (Santos *et al.*, 2021; Tang *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2021). Estas alterações afetam o comportamento macro das matrizes, podendo aumentar a resistência, a deformabilidade e a condutividade térmica dos materiais. Assim sendo, as nanofibras de celulose (NFC) se apresentam como um material promissor a ser incorporado nos materiais de construção (Hisseine *et al.*, 2019; Claramunt *et al.*, 2019).

As NFC são uma categoria de biopolímero que pode ser sintetizada por plantas, bactérias e algas (Hoyos *et al.*, 2019; Ogura *et al.*, 2020) e que apresenta elevada resistência, rigidez e módulo de elasticidade, podendo melhorar diversas características das matrizes cimentícias tradicionais (Mejdoub *et al.*, 2016; Dongre; Suryawanshi, 2021). Além disso, as NFC apresentam como uma das principais vantagens ambientais uma elevada biodegradabilidade, baixa toxicidade e riscos ambientais e à saúde mínimos (Hisseine *et al.*, 2019).

Estudos mostram que a incorporação de nanofibras de celulose pode aumentar a viscosidade das matrizes, atuando de maneira similar à um aditivo modificador de viscosidade, e apresentam a capacidade de reter água o que, conseqüentemente, reduz a exsudação das misturas (Hisseine *et al.*, 2018a; Bakkari *et al.*, 2019). Analisando o desempenho mecânico das matrizes com incorporação de NFC, percebe-se uma tendência a um ganho de resistência à compressão e à flexão das matrizes quando comparadas às misturas de referência (Cengiz *et al.*, 2017; Kolour *et al.*, 2020). Porém, quando a adição se dá em teores muito elevados os efeitos podem ser negativos devido ao aumento da porosidade das misturas (Sun *et al.*, 2016; Correia *et al.*, 2018; Alzoubi *et al.*, 2020).

Com isso, o presente estudo apresenta como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura (RSL) visando levantar dados existentes acerca da utilização de nanofibras de celulose (NFC) em matrizes cimentícias e identificar lacunas de conhecimento ainda não exploradas. Para isso foi realizado tanto um levantamento dos trabalhos mais recentes publicados sobre o tema como uma análise dos dados encontrados de maneira que este trabalho sirva de base para estudos futuros.

## 2. METODOLOGIA

Para realizar este estudo foram definidas algumas perguntas que serviram de base para escolha e análise dos estudos encontrados. As perguntas formuladas foram:

1. - Quais as dimensões das fibras mais utilizadas atualmente e o percentual de incorporação mais empregadas na literatura?
2. - Quais são os métodos de tratamento/dispersão mais empregados nas NFC observados nos estudos?
3. - Quais as propriedades mais analisadas dos compósitos reforçados com NFC e,

consequentemente, quais os ensaios mais realizados?

Além destas perguntas foi realizado um mapeamento dos estudos encontrados analisando os países, instituições e autores que mais publicaram acerca do tema e as palavras-chave mais empregadas.

Para responder a essas perguntas foram escolhidas duas bases de dados para levantamento dos artigos: *ScienceDirect* e *Google Scholar*. A primeira base de dados engloba diversas revistas indexadas em *Scopus* e *Web of Science*. Além disso, através do método conhecido como *snowball*, foram adicionados artigos relevantes e com alto índice de citação presentes no *Google Scholar* que não estivessem presentes na primeira base de dados e que foram publicados em revistas com fator de impacto (*Scopus* e *Web of Science*).

Este estudo analisou todos os artigos de pesquisa relacionados ao tema publicados entre os anos de 2016 e 2021 e escritos em inglês. A *string* de pesquisa utilizada para realizar o levantamento dos estudos foi: "CELLULOSE NANOFIBERS" AND ("CEMENT MATRICES" OR "MORTAR" OR "CONCRETE") resultando em um total de 163 artigos para análise.

Após a exclusão dos capítulos de livro e artigos de revisão de literatura e adição dos artigos relevantes através do método *snowball* foram analisados os títulos e resumos dos artigos. Aqueles que não respondiam às perguntas propostas ou que não incorporaram as fibras em matrizes cimentícias foram excluídos. Por fim, todos os 29 artigos considerados relevantes foram analisados em sua integridade.

O programa *VOSViewer* (versão 1.6.17) foi utilizado para uma análise bibliométrica complementar dos artigos selecionados.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Mapeamento dos estudos

No mapa da Figura 1, percebe-se que os países que mais publicaram acerca do tema foram os Estados Unidos, com 10 artigos publicados, Canadá, com 7 artigos, China com 4 artigos e Espanha e Brasil com 3 artigos cada. Todos os outros países que aparecem representados com tom mais claro de verde contribuíram com uma publicação cada. Com estes resultados pode-se perceber uma predominância dos países do hemisfério norte em publicar sobre o tema estando presentes em 43% das publicações. Apesar disso, consegue-se perceber que este é um assunto que está sendo estudado ao redor de todo o mundo, com participação de 16 países distintos nos artigos encontrados.

Os autores que mais publicaram sobre o tema estão apresentados na Figura 2, onde as cores claras (amarelo) indicam um maior número de trabalhos publicados, diferenciados por grupos de autores. Notou-se que alguns autores se envolveram em mais de uma publicação sobre o tema. Enquanto 70% dos estudos apresentaram diferentes autores. Esta análise mostra que existe um elevado interesse sobre a incorporação de NFC em matrizes cimentícias uma vez que diversas instituições e diversos autores se encontram envolvidos nestas pesquisas.

A Figura 3 apresenta as palavras mais utilizadas nos títulos e nas palavras-chave dos artigos estudados. De acordo com os dados levantados percebe-se uma predominância das palavras "*cellulose nanofibers*". Além disso, percebe-se a presença das propriedades que os artigos analisaram, entre elas, "*mechanical properties*" e "*compressive strength*". Através dos resultados encontrados percebe-se que existem uma grande variedade de abordagens sendo empregadas atualmente quanto da utilização de NFC, indicando a gama de variedade vantagens que esse material pode apresentar quando incorporado em diversos tipos de matrizes.

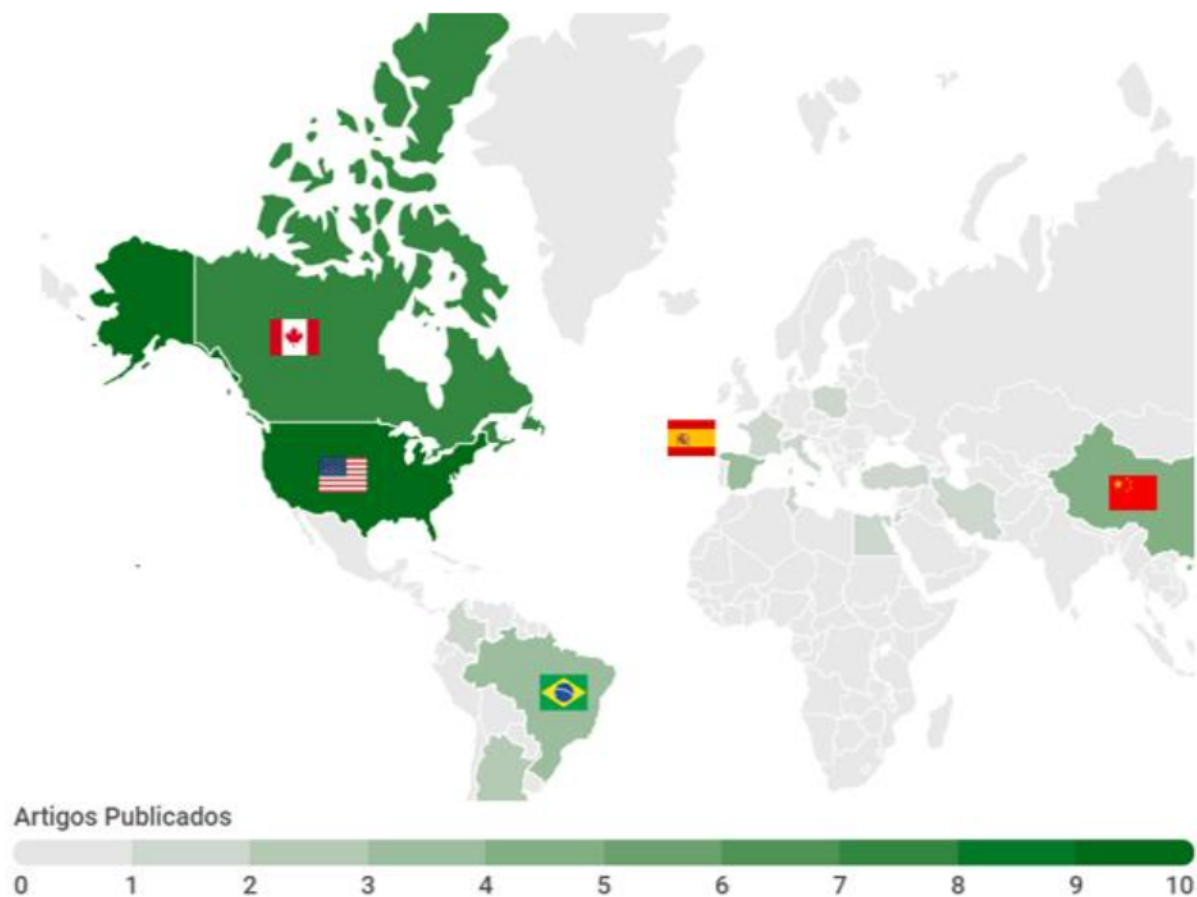


Figura 1. Países que mais publicaram acerca do tema.

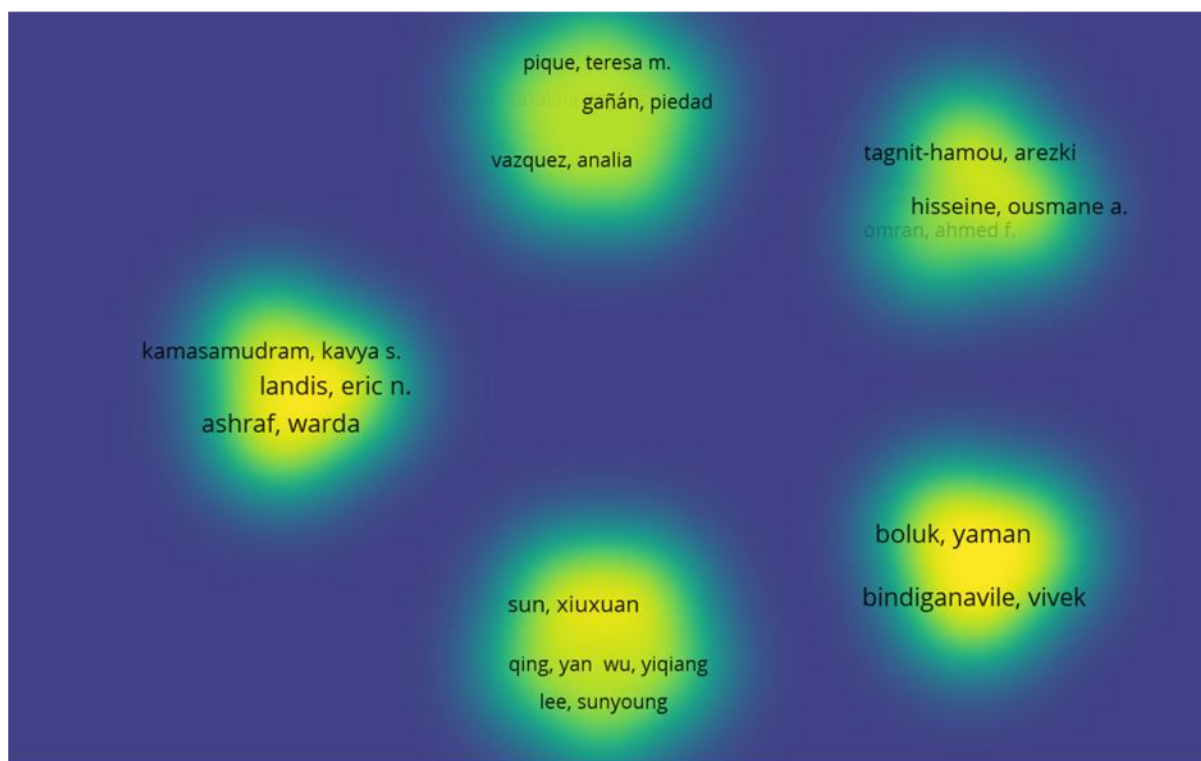


Figura 2. Mapa de densidade dos autores que mais publicaram acerca do tema.

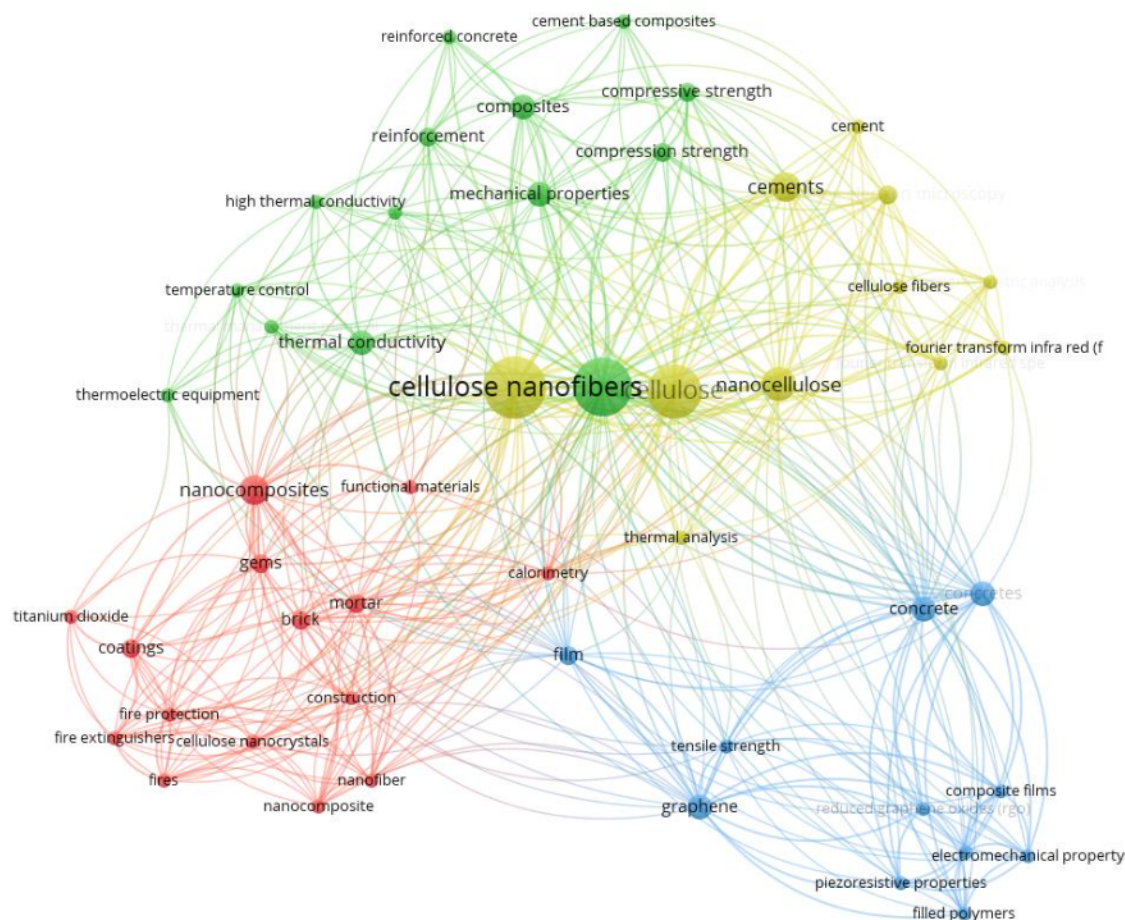


Figura 3. Principais palavras nos títulos e palavras-chave dos artigos.

### 3.2 Nanofibras de celulose (NFC)

A celulose passa por diversos tratamentos químicos ou físicos até dar origem a nanocelulose. Por sua vez, conforme o método de extração utilizado, a nanocelulose também pode ser dividida em alguns grupos, como nanofibras de celulose (NFC) e nanocristais de celulose (NCC). Os NCC são comumente conhecidos como celulose nanocristalina, *nanowhiskers*, nanocristais e os monocristais, enquanto os NFC são muito mais finos pois são extraídos das microfibras de celulose presentes na biomassa, são geralmente citados como microfibrilas de celulose, nanofibrilas ou nanofibrilada de celulose e consistem basicamente em nanopartículas/nanofibrilas flexíveis longas com domínios cristalinos e amorfos alternados (Abdul Khalil *et al.*, 2012; Guo *et al.*, 2020; Dhali *et al.*, 2021).

As NFC têm dimensões entre 5-50 nm de largura e 1–5 µm de comprimento, possuem entre 50–70% de cristalinidade e uma área de superfície extremamente alta (Goncalves *et al.*, 2021). As NFC possuem uma natureza hidrofílica, por isso, um baixo teor, entre 0,1% e 5% em peso, é geralmente utilizado como reforço em matrizes cimentícias. No entanto, mesmo que em pequenas quantidades, as NFC diluídas em água podem criar um gel estável e uniforme (Zhang; Scherer, 2020).

Alguns estudos relatam o uso de NFC como reforço em compósitos cimentícios, o que tem sido visto na presente revisão de literatura. O Apêndice 1 apresenta o resumo das características gerais das nanofibras utilizadas pelos autores, observa-se entre os estudos que as dimensões das NFC utilizadas variaram na faixa de 10-500 nm de diâmetro, 2-20 nm de largura e chegaram até vários

mícrons de comprimento. No entanto, é importante destacar que na literatura a dimensão transversal das NFC é designada tanto diâmetro como largura. Quanto ao percentual de NFC utilizados como reforço da matriz cimentícia variou entre 0,02% e 3%. Além das denominadas NFC, os estudos designaram outros nomes/tipos de nanofibras celulósicas, como nanofibrilas hidrofílicas de celulose (Zhang; Scherer, 2020), celulose nanofibrilada (Correia *et al.*, 2018) e as NFC bacterianas (Akhlaghi *et al.*, 2020; Barría *et al.*, 2021). Estudos como Cengiz *et al.* (2017) realizaram comparativos entre nanofibras naturais e comerciais. As nanofibras naturais foram derivadas de *Cladophora sp* (algas) que apresenta uma forma residual em um rio. Em geral, as NFC estudadas pelos autores foram utilizadas em matrizes cimentícias de pastas (62%); pastas e concretos (17%); pastas e argamassas (13,7%) – alguns estudos relacionam simultaneamente dois tipos de matrizes. Uma exceção ao trabalho de Panesar *et al.* (2017) que apenas realizou um estudo do tratamento alcalino nas NFC.

Um dos grandes desafios para a utilização de NFC em matrizes cimentícias é a dispersão, desse modo, pré-tratamentos nas nanofibras são de grande importância. A cristalinidade das nanofibrilas é reduzida devido à característica amorfa da lignina e da hemicelulose presentes na celulose, o que também afeta as propriedades mecânicas conferidas aos compósitos cimentícios. Dessa forma, métodos de tratamento químicos ou enzimáticos também são realizados (Dhali *et al.*, 2021).

O pré-tratamento alcalino, também conhecido como mercerização, realizado pelos autores Panesar *et al.* (2017) e Fonseca *et al.* (2019), consiste em expor as nanofibras a uma solução como hidróxido de sódio. Fonseca *et al.* (2019) explicam que o tratamento alcalino foi realizado para melhoria da desfibrilação das fibras de juta em nanofibrilas. Segundo Abdul Khalil *et al.* (2012), o pré-tratamento alcalino também tem como função remover completamente a lignina e a hemicelulose das NFC, porém o tratamento alcalino não é suficiente para remoção dos constituintes celulósicos, neste caso, a remoção posterior de uma lignina residual pode ser feita por meio do método do branqueamento.

O método da homogeneização foi realizado por autores como Hoyos *et al.* (2019), Tang *et al.* (2019), Sun *et al.* (2017), Mejdoub *et al.* (2016) e Jiao *et al.* (2016), e é um tipo de tratamento mecânico para as fibras de celulose que consiste em processos de refino e homogeneização de alta pressão. As fibras são geralmente submetidas a repetidas tensões cíclicas. Conforme Abdul Khalil *et al.* (2012), este tratamento aumenta o potencial de utilização das fibras porque modifica parte da sua morfologia.

O sistema de oxidação mediado por TEMPO também foi mencionado e utilizado por Jiao *et al.* (2016). A oxidação realizada na presença de TEMPO é um método utilizado para modificar a característica hidrofílica da superfície da nanocelulose. No entanto, a eficiência deste tipo de método foi comprovada em NCC, pois eles demonstram uma melhor dispersibilidade devido à introdução de grupos carboxilato densos em suas superfícies (Hassan *et al.*, 2021).

A sonicação é considerado um dos métodos mais utilizados para dispersão de NFC e foi encontrado com incidências na presente revisão, nos estudos de Sun *et al.* (2017), Claramunt *et al.* (2019), Barnat-Hunek *et al.* (2019), Nassiri *et al.* (2021) e Ez-zaki *et al.* (2021) foi apresentado esse tipo de tratamento. Porém, embora a sonicação possa ser eficaz na dispersão da nanocelulose, Guo *et al.* (2020) relataram desafios para este tratamento, como a dificuldade de conversão da nanocelulose adsorvida nas partículas de cimento em nanocelulose livre que possibilita o surgimento de aglomerados de fibras nas matrizes cimentícias.

### 3.3 NFC em compósitos cimentícios

O Apêndice 2 apresenta o detalhe das propriedades avaliadas na literatura de pastas, argamassas e concreto com NFC. Esta seção apresenta um breve resumo sobre a influência da adição de NFC na hidratação, reologia, retração, propriedades mecânicas (resistência à compressão e flexão), entre outras.

### 3.3.1 Hidratação

Diversos estudos indicam que o grau de hidratação do cimento aumenta com a presença de NFC, uma vez que promove a hidratação para produzir mais silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio (CH); portanto, uma melhora nas propriedades mecânicas é apresentada (Mejdoub *et al.*, 2016; Sun *et al.*, 2017; Hoyos *et al.*, 2019; Hiseine *et al.*, 2019). Embora nenhum efeito adverso seja relatado no grau de hidratação, há uma influência em sua cinética (Hiseine *et al.*, 2018a).

Jiao *et al.* (2016) indicam que as amostras de pasta de cimento com e sem NFC não apresentam diferenças na hidratação nas primeiras idades (10 horas), uma vez que a superfície exposta das partículas de cimento domina a liberação de calor e há água suficiente ao redor as partículas para hidratação (Lootens; Bentz, 2016). A adição de NFC prolonga os períodos de indução e atrasa os fluxos de pico de calor. Os grupos hidroxila e carboxila das moléculas de celulose são hidrofílicos (Klemm *et al.*, 2011), o átomo de oxigênio presente nesses grupos possui elétrons desemparelhados que podem reagir com o íon cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e formar um complexo hidrofílico que retarda o período de indução de hidratação e endurecimento. Portanto, menos locais de contato são gerados entre as partículas de cimento e a água, diminuindo as taxas de formação de C-S-H e CH (Sedan *et al.*, 2008).

Devido a esse mesmo fenômeno, Goncalves *et al.* (2019) e Kamasamudram *et al.* (2020) relataram haver também uma redução na formação de etringita. Kamasamudram *et al.* (2021a) descobriram que as nanofibras de lignocelulose (LCNF) e as nanofibras de celulose deslignificadas (DCNF) reduzem as quantidades de etringita e CH na pasta de cimento hidratada. No entanto, o NFC com nanopartículas de sílica mostrou aumentar a quantidade de CH, em torno de 4%, devido ao aumento na velocidade de reação do cimento (efeito de enchimento); enquanto, para as amostras de apenas com NFC, uma redução de CH foi observada (Kamasamudram *et al.*, 2020).

Já em tempos prolongados, as NFC liberam água nas regiões próximas e contribuem para a hidratação das partículas de cimento não hidratadas, isso melhora a microestrutura e as propriedades mecânicas das pastas de cimento (Jiao *et al.*, 2016). Nesse sentido, Ez-zaki *et al.* (2021) indicam a mesma tendência ao usar escória granulada de alto-forno moída ativada por álcali com NFC. Kolour *et al.* (2020) indicam que o grau de hidratação aumenta com a presença de NFC após 3 dias. Zhang e Scherer (2020) também mencionam que as NFC melhoram a hidratação do cimento a longo prazo; no entanto, isso pode variar dependendo da fonte de NFC.

Por outro lado, Mejdoub *et al.* (2016), Kamasamudram *et al.* (2020) e Kamasamudram *et al.* (2021b) indicam que as NFC aceleram a hidratação do cimento em estágio inicial como resultado do efeito de nucleação e que esse efeito é maior para o NFC com nanopartículas de sílica. Após 80 h de hidratação, as adições de NFC não mostraram efeitos significativos no grau de hidratação (Kamasamudram *et al.*, 2021a). Kamasamudram *et al.* (2021b) concluem que a influência de NFC na hidratação depende da relação a/c (a concentração de íons alcalinos nos poros depende da relação a/c), onde para uma relação a/c de 0,35 há uma hidratação acelerada nas primeiras idades; enquanto, para uma relação a/c de 0,45, a hidratação não foi tão proeminente.

Embora não sejam relatados efeitos adversos na hidratação, são necessários mais estudos da cinética de hidratação nas primeiras horas, a fim de definir possíveis aplicações na construção, além da análise de outras variáveis como o tipo de cimento, diferentes relações a/c, etc.

### 3.3.2 Reologia

Todos os estudos que analisaram a reologia da pasta de cimento e concreto com NFC relataram melhorias, como limite elástico e viscosidade (Hiseine *et al.*, 2018a; Bakkari *et al.*, 2019; Ez-zaki *et al.*, 2021). Em geral, as NFC atuam como um agente modificador na viscosidade das pastas de cimento, aumentando seu limite de escoamento com pequenas adições de NFC, isso é atribuído a dois motivos: a) a capacidade de retenção de água, uma vez que a hidrofiliabilidade é uma



característica intrínseca das NFC (Hisseine *et al.*, 2018a; Hisseine *et al.*, 2018b; Ez-zaki *et al.*, 2021), e b) a formação de redes de NFC, proeminentes em NFC de comprimentos maiores e flexíveis (Hoyos *et al.*, 2019; Nassiri *et al.*, 2021).

Hisseine *et al.* (2018a) e Hisseine *et al.* (2019) indicam que a incorporação de NFC requer o uso de aditivos redutores de água de alta gama (HRWRA), devido à modificação da viscosidade produzida pelas NFC. Isso está associado à hidrofiliabilidade das NFC, aumentando a retenção de água e uma alta área de superfície e alta razão de aspecto das NFC, aumentando a formação das redes de NFC. Sobre este último ponto, Hisseine *et al.* (2018a) descobriram que as redes de NFC aumentam a viscosidade da mistura em baixas taxas de cisalhamento; porém, para altas taxas de cisalhamento, as redes de NFC levaram a uma menor viscosidade, isso devido à racionalização das NFC na direção do fluxo, apresentando um comportamento de desbaste de cisalhamento.

A adição de NFC aumentou o limite elástico da suspensão de cimento de poço de petróleo (CPP), melhorando as propriedades reológicas (Sun *et al.*, 2016). Tang *et al.* (2019) descobriram que a força do gel, o limite elástico e a viscosidade das suspensões de NFC e CPP foram maiores quando comparadas com as suspensões de nanocristais de celulose (NCC), isso porque as NFC têm maior probabilidade de formar a rede de intertravamento. Em outro estudo de NFC com CPP, foi descoberto que a adição de nanoplaquetas de grafeno (NPG) leva a maiores tensões de escoamento no estado fresco (Sun *et al.*, 2019). Observa-se que as NFC têm uma importante influência no comportamento reológico de materiais cimentícios; no entanto, poucos autores consideraram esse aspecto, sendo um ponto importante para futuras pesquisas.

### 3.3.3 Retração

Zhang e Scherer (2020) demonstraram o uso de NFC para estudar a retração química de pastas cimentícias com alta relação a/c em idades iniciais (3 dias), uma vez que não há efeito químico na hidratação de curto prazo. As NFC criaram uma estrutura estável para suportar as partículas de cimento e permitir que elas se hidratem sem sedimentar.

Kolour *et al.* (2020) descobriram que adicionar uma quantidade de 0,06% de NFC (por peso de cimento) leva a uma redução na retração autógena em até 49% em pastas de cimento com uma relação a/c de 0,30. Para concretos autoadensáveis, Hisseine *et al.* (2018b) relataram que o uso de NFC reduziu as deformações de retração autógena em até 31% em 7 dias.

O uso de NFC com maior nível de grupos carboxila em sistemas de cimento Portland mitiga as alterações dimensionais e fissuras associadas à retração das pastas de cimento (Bakkari *et al.*, 2019).

Os estudos mostram que as NFC reduzem a retração química e autógena, principalmente. No entanto, não há estudos de longo prazo, como retração por secagem e fluência, além de relacionar essas propriedades aos materiais, dosagem, umidade, temperatura, cura, entre outros.

### 3.3.4 Propriedades mecânicas

Conforme mencionado anteriormente, as propriedades mecânicas das pastas cimentícias melhoram com a adição de NFC, devido à retenção de água das NFC e ao aumento do grau de hidratação (cura interna), bem como a maior aderência das NFC e a matriz cimentícia. No entanto, altos teores de NFC são prejudiciais porque aumentam a porosidade e outros fatores devem ser levados em consideração para o desenvolvimento de propriedades mecânicas (Sun *et al.*, 2016; Correia *et al.*, 2018; Hisseine *et al.*, 2018a; Hisseine *et al.*, 2019; Kolour *et al.*, 2020; Alzoubi *et al.*, 2020).

a) Resistência à compressão: A maioria dos estudos relata um aumento na resistência à compressão com a adição de NFC (Hisseine *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2017). Mejdoub *et al.* (2016) encontraram um aumento na resistência à compressão em mais de 50% com 0,3% de NFC. Nos resultados de Kolour *et al.* (2020) para uma mistura com 0,15% de NFC, houve um aumento de até 31% após 7 dias e, para uma mistura com 0,09% de NFC, houve um aumento de até 16% após 28 dias. Em

concreto autoadensável, Hisseine *et al.* (2018b) indicam uma tendência positiva na adição de NFC, a resistência à compressão aumentou em até 16%.

Kamasamudram *et al.* (2020) demonstraram que a adição de 0,1% de NFC com nanopartículas de sílica aumenta a resistência à compressão em 13% (a 90 dias) em relação ao lote de controle e em 10% em relação ao lote sem nanopartículas de sílica.

A adição de DCNF mostrou um aumento máximo de 15% na resistência à compressão para 0,05% e 0,1% de DCNF após 90 dias de cura. O aumento máximo da resistência à compressão da pasta de cimento curada por 90 dias com a adição de 0,1% de LCNF foi em torno de 16% (Kamasamudram *et al.*, 2021a).

A adição de NFC e material de mudança de fase levaram ao aumento da resistência à compressão da argamassa de cimento, onde o melhor resultado é alcançado com a adição de 0,5% de NFC, devido à redução da porosidade da argamassa (Alzoubi *et al.*, 2020).

Por outro lado, alguns estudos relatam que a adição de NFC não tem um efeito considerável na resistência à compressão de pastas de cimento (Kamasamudram *et al.*, 2021b), até por ser afetada adversamente devido à entrada de ar e aglomeração das NFC (Hisseine *et al.*, 2018b). Embora Nasiri *et al.* (2019) relatam um aumento na resistência à compressão (17-18%) com a adição de NFC, concentrações acima de 0,065% resultaram em pequenas melhorias na resistência em 7 dias e uma diminuição na resistência em 28 dias em comparação com o controle.

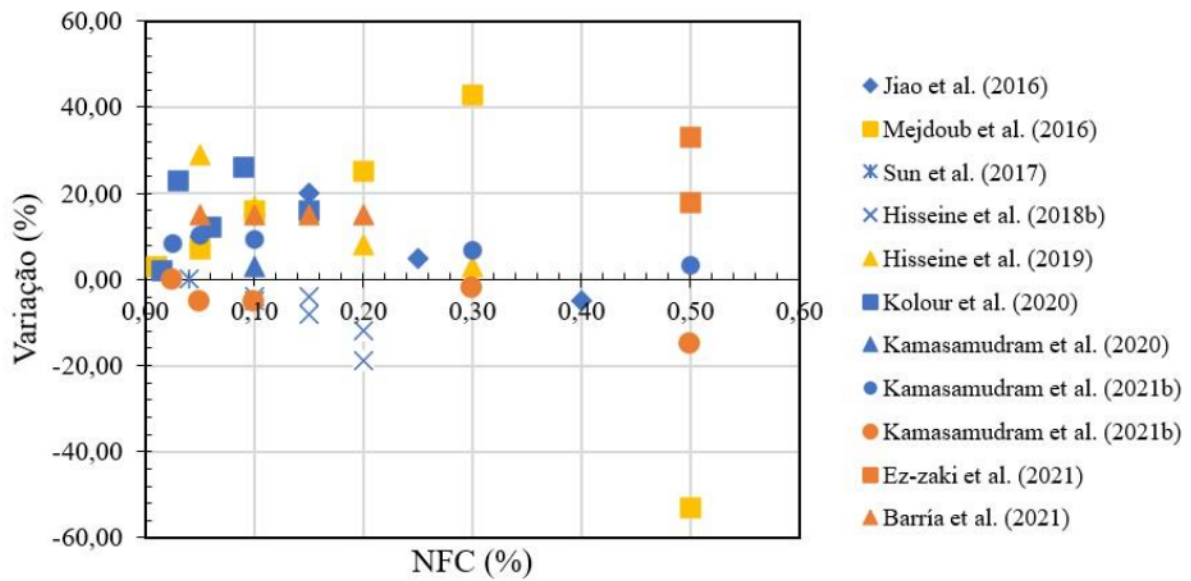
A Figura 4a apresenta o resumo da porcentagem de variação da resistência à compressão aos 28 dias em função da porcentagem de adição de NFC. É importante ressaltar que foram considerados apenas os estudos que disponibilizaram os dados. Quando os resultados da variação são classificados pela relação a/c (Figura 4b), observa-se que quanto menor a relação a/c, maior o percentual de variação positiva, 9,80% para uma relação a/c de 0,26 a 0,30, apresentando um único dado atípico. Adicionalmente, observa-se que, para esta relação a/c, existem apenas percentuais positivos e uma menor dispersão de dados (3-43%). Para as demais relações a/c, a dispersão dos dados é maior e são apresentados valores de redução da resistência à compressão.

b) Resistência à flexão: Para resistência à flexão, um efeito geralmente positivo é relatado (Hisseine *et al.*, 2018a; Hisseine *et al.*, 2018b; Hisseine *et al.*, 2019). Hisseine *et al.* (2019) descreve um aumento de até 25%. Kamasamudram *et al.* (2020) constataram que, com a adição de 0,1% do NFC, a resistência à flexão aumentou em 70%, valor próximo ao relatado por Kamasamudram *et al.* (2021b), 75%. Porcentagens ainda maiores foram apresentadas por Kolour *et al.* (2020), 116% e Cengiz *et al.* (2017), 169,7%.

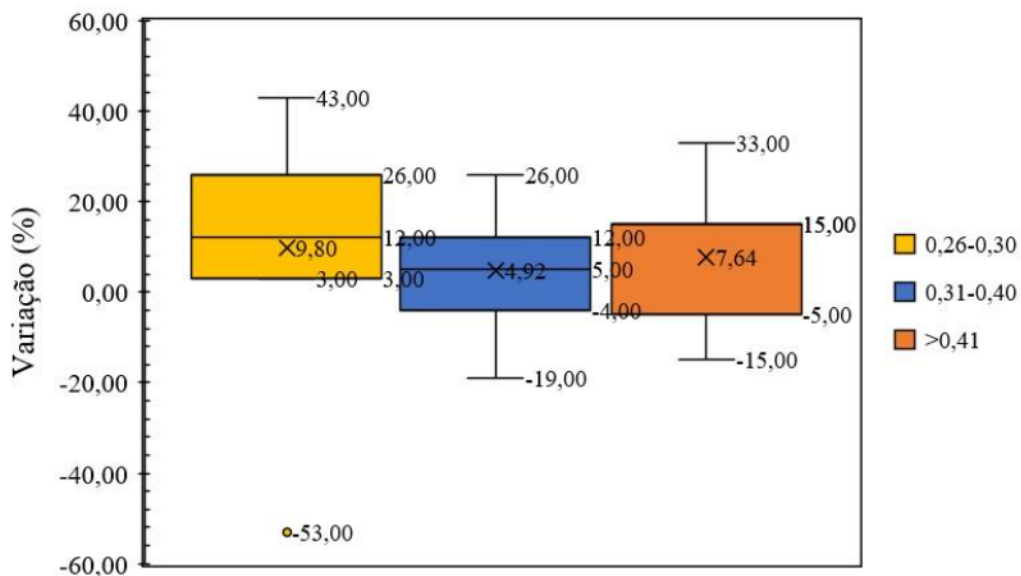
Sun *et al.* (2016) constataram que a flexão aumentou 20,7% para uma relação NFC/PPP de 0,04, atribuído ao aumento da hidratação e ao efeito de ligação dos NFC, mas também apontam que a adição excessiva de NFC é prejudicial devido à aglomeração das nanopartículas. Em trabalho mais recente dos mesmos autores, foi indicado que tanto a resistência à compressão quanto à flexão aumentou com a adição do GNP (2017).

No estudo de Cengiz *et al.* (2017) relata-se que a resistência à flexão em argamassas aumentou 2,7 vezes com a adição de NFC de algas, devido à alta relação de aspecto das NFC, que melhora a interface de ligação entre as NFC e pasta de cimento. No entanto, o uso de NFC comercial tem um efeito negativo sobre a tensão de flexão, devido à sua baixa relação de aspecto e insolubilidade.

Hisseine *et al.* (2018a) indicaram efeitos positivos das NFC no desempenho mecânico das pastas cimentícias, devido à maior homogeneidade e estabilidade. Já no concreto autoadensável, os autores demonstraram que a capacidade de flexão e a resistência à tração na ruptura aumentam em até 21 e 26%, respectivamente. Hisseine *et al.* (2018b) também relatam a mesma tendência no concreto autoadensável, onde todas as propriedades mecânicas medidas foram melhoradas, apenas na flexão 22%, devido ao nanoreforço e cura interna.



(a)



(b)

Figura 4. a) Variação da resistência à compressão aos 28 dias, e b) dispersão de dados considerando a relação a/c.

A resistência à flexão das pastas cimentícias pode aumentar de 20% até 111% com a adição de NFC, este último valor para 0,1% de NFC, tanto para DCNF quanto para LCNF (Kamasamudram et al., 2021a).

A Figura 5a apresenta um detalhamento dos resultados relatados na literatura quanto à resistência à flexão aos 28 dias, observando que a maioria é positiva e com percentuais superiores em relação à resistência à compressão. A Figura 5b mostra que os resultados relatados para uma relação a/c de 0,31 a 0,40, são menos dispersos, com uma média de 29,3% e um único dado atípico (116,67%). Para uma a/c maior que 0,41 há uma média de 69,16%, mas uma maior dispersão dos dados. A dispersão para uma relação a/c de 0,26 a 0,30 não é apresentada, pois, há apenas um estudo dentro

dessa faixa (Claramunt *et al.*, 2019).

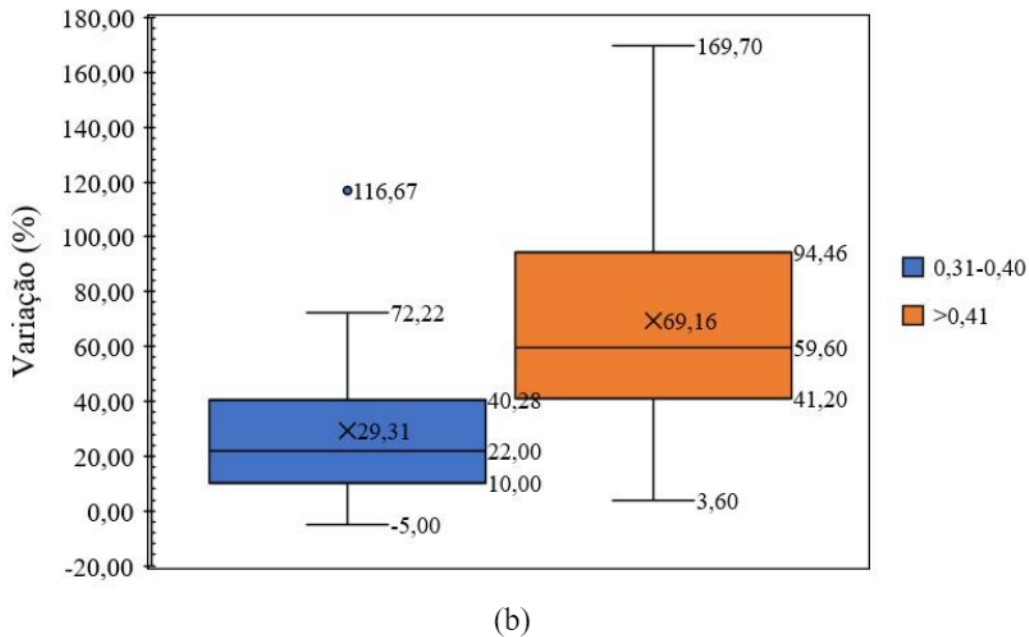
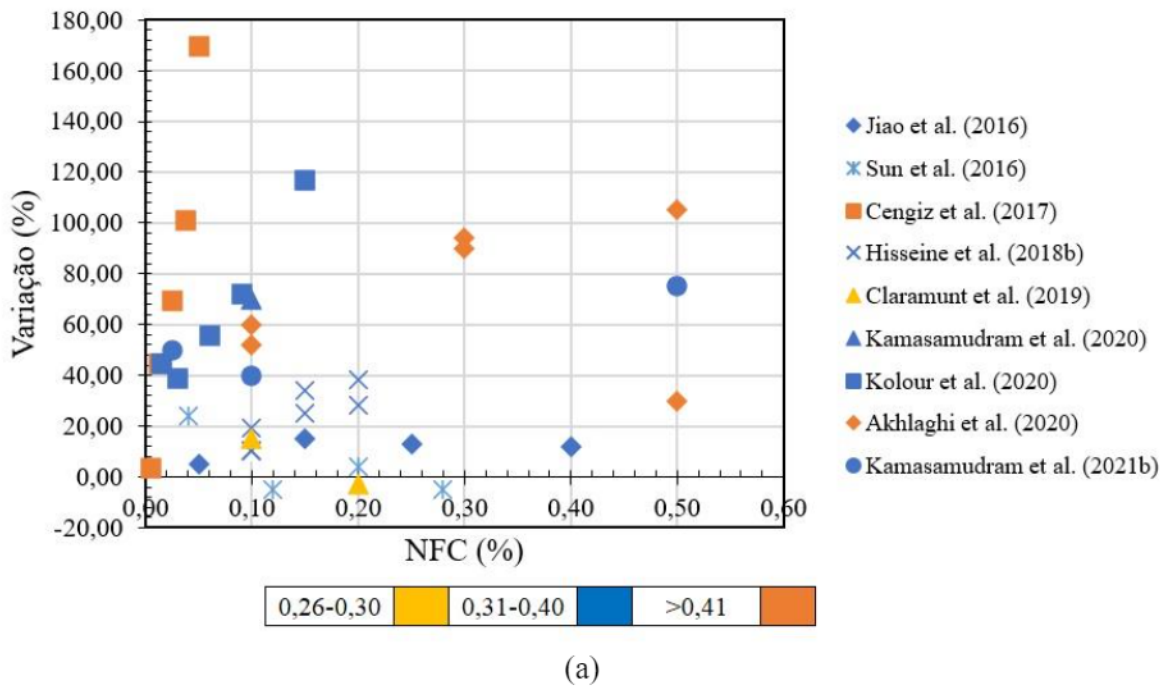


Figura 5. a) Variação da resistência à flexão aos 28 dias, e b) dispersão de dados considerando a relação a/c.

Por fim, a Figura 6 resume todos os resultados reportados na literatura tanto para a resistência à compressão (verde) quanto para a resistência à flexão (vermelho) de concretos e argamassas, mostrando efeitos positivos da adição de NFC, principalmente para resistência à flexão.

c) Mecânica de fratura: Hisseine *et al.* (2019) indica que a capacidade máxima de flexão ocorre com baixo teor de NFC (0,05-0,10%), mas a capacidade de absorção de energia aumenta com maiores teores de NFC, até 74%. Nesse sentido, Hisseine *et al.* (2018b) apontam que as NFC

melhoram a absorção de energia (96%) o que se reflete no aumento do deslocamento máximo, em até 43%, comportamento necessário para estruturas resistentes a impactos e explosões. Aumentos significativos na energia de fratura, 60% no estudo de Kolour *et al.* (2020), sugerem que as NFC são um mecanismo de endurecimento eficaz, atuando como pontes que aumentam a energia necessária para a propagação de trincas.

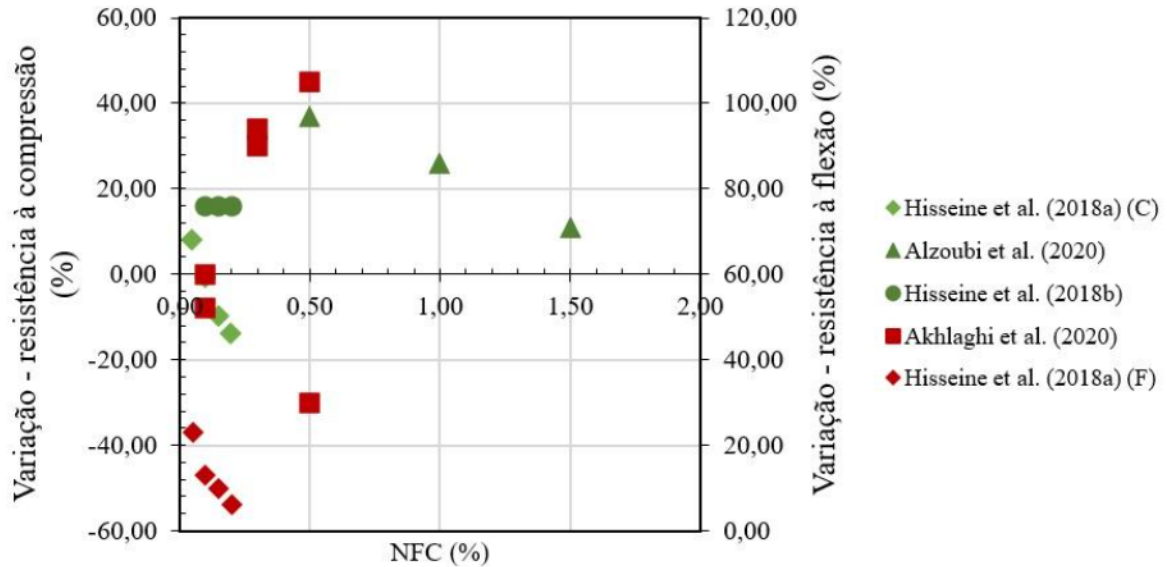


Figura 6. Resistência à compressão e à flexão de concreto e argamassa.

Hisseine *et al.* (2018b) também relatam a mesma tendência no concreto autoadensável, onde todas as propriedades mecânicas medidas foram melhoradas. Foram obtidas melhorias de até 16% na compressão, 34% na tensão de divisão, 22% na flexão e 96% na absorção de energia. Essas melhorias foram atribuídas a dois efeitos transmitidos pelas NFC: nano resistência e cura interna. O teor de 1% de NFC com 8% de polpa celulósica colabora na formação de pontes de transferência de tensões em nano e microfissuras, melhorando o desempenho mecânico dos compósitos antes e depois dos ensaios de envelhecimento acelerado: módulo de ruptura (MOR), tenacidade à fratura (KIC) e energia de fratura (FE), resultados atribuídos à aderência entre o NFC e a matriz de cimento (Correia *et al.*, 2018).

Compósitos reforçados com 2% de micro/nanofibras de celulose apresentaram maior limite de proporcionalidade (LOP), MOR e tenacidade do que os compostos de controle após 28 dias de cura (Fonseca *et al.*, 2019). Ez-zaki *et al.* (2021) indica que as NFC têm a capacidade de inchar, criando depósitos de água internos e podem se comportar como concentradores de estresse, causando o início de microfissuras.

A adição de baixos teores de NFC e NCC (entre 0,1 e 0,2% em peso), em sistemas de cimento de aluminato de cálcio (CAC), levou a um aumento geral nos valores de MOR em amostras não envelhecidas, ao contrário dos sistemas de cimento Portland (Claramunt *et al.*, 2019).

Na literatura, observa-se que as propriedades mecânicas têm sido amplamente investigadas, o que possibilita identificar tendências e entender melhor o efeito das NFC no comportamento mecânico de materiais cimentícios. No entanto, a maioria dos estudos apenas relatou resultados de resistência à compressão e flexão para pastas. O comportamento mecânico em outras aplicações específicas e de longo prazo ainda precisa ser explorado.

### 3.3.5 Outras propriedades

Neste tópico são apresentadas outras propriedades que têm sido investigadas em alguns trabalhos publicados, destacando que a durabilidade dos materiais cimentícios com NFC é o aspecto menos pesquisado, mas com crescente interesse nos últimos anos.

a) Penetração de íons sulfato: As NFC reduzem a penetração de íons sulfato dentro de um sistema cimentício. Foi observado que a adição de NFC (0,3–0,4%) ao cimento Portland Tipo GU proporcionou a mesma ou maior resistência ao ataque de sulfato do que um cimento Portland tipo HS especialmente formulado (Goncalves *et al.*, 2019).

b) Entrada de íons cloreto: O uso de NFC impede a penetração de íons cloreto. É atribuído à quantidade de grupos carboxila, que levam à restrição da entrada de cloreto, além de melhorar a trabalhabilidade (Goncalves *et al.*, 2020).

c) Módulo elástico: Kamasamudram *et al.* (2021b) observaram que 0,025% e 0,5% de NFC aumentaram o módulo de elasticidade da pasta de cimento em cerca de 200% e 250%. Hisseine *et al.* (2019) relataram um aumento de 18% e Fonseca *et al.* (2019) indicam que, em geral, compostos com NFC apresentam melhor desempenho mecânico e que o módulo de elasticidade dinâmico aumenta com o tempo mesmo quando expostos à intempérie. As NFC com cimento de aluminato de cálcio (CAC) apresentam um aumento no módulo de elasticidade em relação às misturas com cimento Portland (Claramunt *et al.*, 2019).

d) Porosidade: Mejdoub *et al.* (2016) indicaram que a porosidade em pastas de cimento foi reduzida com a adição de NFC, sendo o melhor resultado com 0,3% de NFC. Por outro lado, Goncalves *et al.* (2019) apontam que as NFC refinam o tamanho dos poros, registrando um aumento no volume total de micro e nanoporos; no entanto, houve uma redução da porosidade para tamanhos maiores que 10 mm.

e) Coeficiente de expansão térmica e condutividade térmica: O uso de NFC aumentou tanto o coeficiente de expansão térmica quanto a condutividade térmica das pastas cimentícias, principalmente devido ao potencial das NFC em reduzir a porosidade e melhorar a microestrutura da matriz cimentícia (Mejdoub *et al.*, 2016). Alzoubi *et al.* (2020) também relataram um aumento na condutividade térmica de compostos PCM/NFC.

f) Exsudação: As NFC atuam como um agente de retenção de água e reservatórios de água para evitar a segregação e exsudação (Ez-zaki *et al.*, 2021). Goncalves *et al.* (2021) mostrou que a adição de NFC reduz significativamente o volume de água de exsudação. As NFC dificultam o assentamento dos grãos de cimento e obstruem a migração ascendente da água livre. No entanto, na presença de superplastificantes, as NFC são menos eficazes na redução da exsudação. Os autores consideram que o efeito de NFC na exsudação atenua a retração plástica, bem como a retração autógena durante os estágios iniciais de hidratação.

Por fim, notou-se a carência de estudos de avaliação dos impactos ambientais de compostos cimentícios com NFC; e, nesse sentido, estudos de Análise do Ciclo de Vida (ACV) poderiam ser realizados de forma complementar.

## 4. CONCLUSÕES

Embora o uso de nanofibras de celulose (NFC) na construção civil seja um campo recente, ainda pouco explorado, estudos de NFC como reforço em matrizes cimentícias mostram que a sua utilização pode melhorar o desempenho das propriedades.

Estudos recentes de aplicação de NFC em matrizes cimentícias têm se concentrado em pastas de cimento, com 62% das pesquisas analisadas (para exclusivamente pastas).

Pequenas porcentagens de NFC são adicionadas aos compósitos à base de cimento, teores de reforço que geralmente variam entre 0,02% e 3%. No entanto, há desafios do uso destes materiais quanto à sua dispersão na matriz cimentícia, desse modo, pré-tratamentos nas nanofibras são de

grande importância porque aumentam o seu potencial de utilização. Os tratamentos/dispersão mais utilizados são sonicação, homogeneização, oxidação mediado por TEMPO e o pré-tratamento alcalino das fibras.

Quanto às dimensões das NFC mais utilizadas nas pesquisas foram reportadas faixas de 10-500 nm e 2-20 nm como diâmetro e largura, respectivamente.

A adição de NFC possibilita, de forma geral, um aumento do grau de hidratação do cimento, melhoria de propriedades reológicas, como viscosidade e limite elástico, favorece a retenção de água da mistura com indícios de redução da segregação e exsudação, além de melhorar o desempenho na retração de compósitos cimentícios.

A maioria dos estudos indica uma tendência de aumento em propriedades mecânicas, como resistência à compressão, resistência à flexão, mecânica de fratura e módulo de elasticidade. Com um destaque para a propriedade de resistência à flexão, com avanços nos resultados ainda mais positivos se comparados à resistência à compressão.

É importante ressaltar que a boa dispersão das fibras, homogeneidade da matriz e teor de NFC utilizado tem bastante influência nestas avaliações; contudo, uma maior incorporação tende a formar aglomerados de fibras ocasionando decrementos ou sendo prejudiciais aos resultados.

## 5. REFERÊNCIAS

- Abdellaoui, H., Bouhfid, R. (2020), *Review of nanocellulose and nanohydrogel matrices for the development of sustainable future materials*. In Sustainable Nanocellulose and Nanohydrogels from Natural Sources, 155-176. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816789-2.00007-9>
- Abdul Khalil, H. P. S., et al. (2012), *Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review*. Carbohydrate Polymers. 87(2):963–979. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.08.078>
- Akhlaghi, M. A., et al. (2020), *Application of bacterial nanocellulose fibers as reinforcement in cement composites*. Construction and Building Materials. 241:118061. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118061>
- Alzoubi, H. H., et al. (2020), *Performance of cementitious composites with nano PCMs and cellulose nanofibers*. Construction and Building Materials. 236:117483. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117483>
- Bakkari, M., et al. (2019), *Preparation of cellulose nanofibers by TEMPO-oxidation of bleached chemi-thermomechanical pulp for cement applications*. Carbohydrate Polymers. 203:238–245. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.09.036>
- Barnat-Hunek, D., et al. (2019), *Effect of cellulose nanofibrils and nanocrystals on physical properties of concrete*. Construction and Building Materials. 223:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.145>
- Barría, J. C., et al. (2021), *Effect of bacterial nanocellulose on the fresh and hardened states of oil well cement*. Journal of Petroleum Science and Engineering. 199. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108259>
- Cao, Z., et al. (2020), *The sponge effect and carbon emission mitigation potentials of the global cement cycle*. Nature communications. 11(1): 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17583-w>
- Cengiz, A., et al (2017), *Flexural stress enhancement of concrete by incorporation of algal cellulose nanofibers*. Construction and Building Materials. 149:289–295. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.104>
- Claramunt, J., et al. (2019), *Effect of nanocelluloses on the microstructure and mechanical performance of CAC cementitious matrices*. Cement and Concrete Research. 119:64–76, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.006>
- Correia, V. C., et al., (2018), *Nanofibrillated cellulose and cellulosic pulp for reinforcement of the extruded cement based materials*. Construction and Building Materials. 160:376–384.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.066>

Dhali, K., *et al.* (2021), A review of nanocellulose as a new material towards environmental sustainability. *Science of the Total Environment*. 775:145871.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145871>

Dongre, M., Suryawanshi, V. B. (2021), *Analysis of cellulose based nanocomposites & potential applications*. *Materials Today: Proceedings*. 45:3476–3482.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.943>

UN Environment, *et al.*, (2018), *Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry*. *Cement and Concrete Research*. 114:2-26.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>

Ez-zaki, H., *et al.* (2021), *Correction to: Influence of cellulose nanofibrils on the rheology, microstructure and strength of alkali activated ground granulated blast-furnace slag: a comparison with ordinary Portland cement*. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. 54(2).

<https://doi.org/10.1617/s11527-021-01665-2>

Fonseca, C. S., *et al.* (2019), *Jute fibers and micro/nanofibrils as reinforcement in extruded fiber-cement composites*. *Construction and Building Materials*. 211:517–527.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.236>

Goncalves, J., *et al.* (2019), *Cellulose nanofibres (CNF) for sulphate resistance in cement based systems*. *Cement and Concrete Composites*. 99:100–111.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.03.005>

Goncalves, J., *et al.* (2021), *Turbidity-based measurement of bleeding in fresh cement paste as affected by cellulose nanofibres*. *Cement and Concrete Composites*. 123:104197.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104197>

Goncalves, J., *et al.* (2020), *Cellulose nanofibres mitigate chloride ion ingress in cement-based systems*. *Cement and Concrete Composites*. 114.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103780>

Guo, A., *et al.* (2020), *A Review on the Application of Nanocellulose in Cementitious Materials*.

*Nanomaterials*. 10(12):2476. <https://doi.org/10.3390/nano10122476>

Hassan, S. H., *et al.* (2021), *TEMPO-oxidized nanocellulose films derived from coconut residues: Physicochemical, mechanical and electrical properties*. *International Journal of Biological Macromolecules*. 180:392–402.

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.03.066>

Hisseine, O. A., *et al.* (2018a) *Feasibility of using cellulose filaments as a viscosity modifying agent in self-consolidating concrete*. *Cement and Concrete Composites*, 94:327–340.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.09.009>

Hisseine, O. A., *et al.* (2018b), *Influence of cellulose filaments on cement paste and concrete*. *Journal of materials in civil engineering*. 30(6):04018109.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002287](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002287)

Hisseine, O. A., *et al.* (2019), *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*. 206:84–96.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.042>

Hoyos, C. G., *et al.* (2019), *Cellulose nanofibrils extracted from fique fibers as bio-based cement additive*. *Journal of Cleaner Production*. 235:1540–1548.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.292>

Jiao, L., *et al.* (2016), *Natural Cellulose Nanofibers As Sustainable Enhancers in Construction Cement*. *PLoS ONE*. 11(12):e0168422. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168422>

Kamasamudram, K. S., *et al.* (2021), *Cellulose Nanocomposites for Performance Enhancement of Ordinary Portland Cement-Based Materials*. *Transportation Research Record*.

<https://doi.org/10.1177/0361198120958421>



- Kamasamudram, K. S., *et al.* (2021a), *Effects of ligno- and delignified- cellulose nanofibrils on the performance of cement-based materials*. Journal of Materials Research and Technology. 13: 321–335. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.04.090>
- Kamasamudram, K. S., *et al.* (2021b), *Cellulose nanofibrils with and without nanosilica for the performance enhancement of Portland cement systems*. Construction and Building Materials. 285:121547. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121547>
- Klemm, D., *et al.* (2011), *Nanocelluloses: a new family of nature-based materials*. Angewandte Chemie International Edition. 50(24):5438-5466. <https://doi.org/10.1002/anie.201001273>
- Kolour, H., *et al.* (2020), *Hydration and early age properties of cement pastes modified with cellulose nanofibrils*. Transportation Research Record. 0361198120945993. <https://doi.org/10.1177/0361198120945993>
- Lootens, D., Bentz, D. P. (2016), *On the relation of setting and early-age strength development to porosity and hydration in cement-based materials*. Cement and Concrete Composites. 68:9-14. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.02.010>
- Mejdoub, R., *et al.* (2016), *Nanofibrillated cellulose as nanoreinforcement in Portland cement: Thermal, mechanical and microstructural properties*. Journal of Composite Materials. 51(17):2491-2503. <https://doi.org/10.1177/0021998316672090>
- Nassiri, S., *et al.* (2021), *Comparison of unique effects of two contrasting types of cellulose nanomaterials on setting time, rheology, and compressive strength of cement paste*. Cement and Concrete Composites. 123:104201. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104201>
- Nishimura, T., *et al.* (2019), *Effects of powdery cellulose nanofiber addition on the properties of glass ionomer cement*. Materials. 12(19):3077. <https://doi.org/10.3390/ma12193077>
- Ogura, I., *et al.* (2020), *Measurements of cellulose nanofiber emissions and potential exposures at a production facility*. NanoImpact. 20:100273. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2020.100273>
- Panesar, D., *et al.* (2017), *The effect of sodium hydroxide surface treatment on the tensile strength and elastic modulus of cellulose nanofiber*. Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites. 17–26. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102001-2.00002-4>
- Santos, R. F., *et al.* (2021), *Nanofibrillated cellulose and its applications in cement-based composites: A review*. Construction and Building Materials. 288:123122. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123122>
- Sedan, D., *et al.* (2008), *Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction*. Journal of the European Ceramic Society. 28(1):183-192. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.05.019>
- Sun, X., *et al.* (2017), *Rheology, curing temperature and mechanical performance of oil well cement: Combined effect of cellulose nanofibers and graphene nano-platelets*. Materials & Design. 114:92-101. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.10.050>
- Sun, X., *et al.* (2016), *Cellulose nanofibers as a modifier for rheology, curing and mechanical performance of oil well cement*. Scientific reports. 6(1):1-9. <https://doi.org/10.1038/srep31654>
- Tang, Z., *et al.* (2019), *Influence of cellulose nanoparticles on rheological behavior of oil well cement-water slurries*. Materials. 12(2):291. <https://doi.org/10.3390/ma12020291>
- Zhang, S., *et al.* (2021), *High-flexural-strength of geopolymer composites with self-assembled nanofiber networks*. Ceramics International. 47(22):31389–31398. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.08.014>
- Zhang, Z., Scherer, G. W. (2020), *Measuring chemical shrinkage of ordinary Portland cement pastes with high water-to-cement ratios by adding cellulose nanofibrils*. Cement and Concrete Composites. 111:103625. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103625>