



LUCIANA SILVA VILLELA

**POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS À BASE DE
GESSO REFORÇADOS COM NANOESTRUTURAS**

**LAVRAS - MG
2022**

LUCIANA SILVA VILLELA

**POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS À BASE DE GESSO
REFORÇADOS COM NANOESTRUTURAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. José Benedito Guimarães Júnior
Orientador

Prof. Dr. Mário Guimarães Júnior
Prof. Coorientador

**LAVRAS - MG
2022**

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

Villela, Luciana Silva.

Potencial de produção de compósitos à base de gesso
reforçados com nanoestruturas / Luciana Silva Villela. - 2022.
89 p. : il.

Orientador(a): José Benedito Guimarães Júnior.

Coorientador(a): Mário Guimarães Júnior.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. Nanotecnologia. 2. Nanomateriais. 3. Matriz de gesso. I.
Guimarães Júnior, José Benedito. II. Guimarães Júnior, Mário. III.
Título.

LUCIANA SILVA VILLELA

**POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS À BASE DE GESSO
REFORÇADOS COM NANOESTRUTURAS**

**POTENTIAL FOR PRODUCTION OF PLASTER-BASED COMPOSITES
REINFORCED WITH NANOSTRUCTURES**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 31 de agosto de 2022.

Dr. José Benedito Guimarães Júnior	UFLA
Dr. Mário Guimarães Júnior	CEFET-MG
Dr. Lourival Marin Mendes	UFLA
Dr. Thiago Protásio	UFRA
Dra Flávia Maria Silva Brito	ESALQ-USP
Dra Josy Anteveli Osajima	UFPI

Dr. José Benedito Guimarães Júnior
Orientador

Dr. Mário Guimarães Júnior
Coorientador

**LAVRAS - MG
2022**

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, eu não sei o que eu seria se não existisse a UFLA. Foi um lindo ciclo de 13 anos, é incrível como uma educação pública e de qualidade transforma a vida das pessoas! Agradeço em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, pela oportunidade que me foi dada.

À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG). O presente trabalho foi realizado com o seu apoio.

Aos membros da banca pela disponibilidade em fazer parte dela e por todas as contribuições. Em especial, um agradecimento ao meu orientador José Benedito, que me deu todo o suporte e apoio necessário. Pela paciência, disposição e companheirismo, você José, é um exemplo de orientador e ser humano, sempre vou ser grata por ter tido o privilégio de ser orientada por você, muito obrigada por tudo.

Ao professor Mário Guimarães, pela coorientação, que mesmo à distância esteve sempre à disposição, pronto para me ajudar, sem você esse trabalho não teria sido concretizado.

A todos os meus colegas de trabalho que de alguma forma me ajudaram nos experimentos, análises e desenvolvimento de ideias, especialmente à Ana Carolina Furtini, Maria Cecillia Veloso, Lorrán, Arley, Lays e Adriano.

Um agradecimento mais que especial aos meus pais, que sempre acreditaram em mim, deixando muitas vezes seus próprios sonhos de lado para que eu realizasse os meus. Vocês são tudo de mais valioso que tenho.

Agradeço aos meus avós Julieta e José, que agora estão me protegendo lá do céu, que me ensinaram muito sobre a vida, sendo minhas referências de caráter, simplicidade e fé, sinto gratidão e muitas saudades.

Também agradeço a todos os meus amigos e familiares, enfim, a todos que estiveram ao meu lado durante esses anos e que acreditaram em mim.

Muito obrigada!

RESUMO

A nanotecnologia tem potencial para ser a chave para um novo mundo no campo da construção e dos materiais de construção. O gesso apresenta ótimas propriedades, porém, seu uso ainda é limitado devido a sua matriz porosa que absorve água, e sua baixa resistência mecânica. Diante da crescente utilização do gesso na construção civil, e em busca de contornar suas principais limitações para aumentar o seu escopo de utilização, foi estudado: a inserção de diferentes nanomateriais na matriz de gesso, sendo estes nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT), nanofibrilas de celulose (CNFs) e nanotalco (NT). Já a influência destes nanomateriais na matriz de gesso, foi estudada separadamente. Os teores de MWCNT incorporados foram 0 %, 0,001 %, 0,002 %, 0,003 % e 0,004 % em relação à massa de gesso, já para as CNFs e o NT, as porcentagens foram 0 %, 0,5 %, 1 %, 1,5 % e 2 %, também em relação à massa de gesso. No processo experimental as diferentes porcentagens dos nanomateriais foram sonicadas com a água de cada traço, depois o gesso foi polvilhado na mistura, sendo misturado manualmente, e moldado em formas de 4 x 4 x 16 cm. Após 28 dias foram realizados os testes de densidade aparente, absorção de água por imersão, ensaio de resistência à flexão e compressão e morfologia. Houve diminuição da absorção de água e aumento da densidade aparente à medida que se incorporava MWCNT na matriz de gesso. As resistências mecânicas aumentaram até determinado ponto da curva, sendo que para a resistência à flexão esse ganho foi de até 12,74% e para a resistência à compressão 26,4%, quando comparado com a testemunha. A incorporação de CNFs se mostrou viável nesse estudo para teores baixos (de até 0,69%), garantindo menor absorção de água, porém, não alterou significativamente a resistência à compressão, bem como houve diminuição quanto a resistência à flexão. No entanto, tendo em vista que as CNFs são sustentáveis, baratas e altamente disponíveis, podendo ser obtidas até mesmo de resíduos, é possível criar um material inovador, sustentável e com alto valor agregado. Com relação a incorporação de NT, baixos teores de NT preencheram os poros da matriz de gesso, aumentando em até 1,8% a densidade aparente, aumentando em até 24,12% na resistência à compressão, e diminuindo a absorção de água em até 5,86%, não alterando significativamente a resistência à flexão.

Palavras chave: Nanotecnologia. Nanomateriais. Matriz de gesso.

ABSTRACT

Nanotechnology has the potential to be the key to a new world in the field of construction and building materials. Plaster has excellent properties, but its use is still limited due to its porous matrix, which absorbs water, and its low mechanical strength. Due to the increasing use of plaster in civil construction, and in order to circumvent its main limitations to increase its scope of use, this study examined the insertion of different nanomaterials in plaster matrices, which are multi-walled carbon nanotubes (MWCNT), Cellulose nanofibrils (CNFs) and nanotalc (NT). The influence of these nanomaterials on plaster matrices was studied separately. The levels of incorporated MWCNT were 0%, 0.001%, 0.002%, 0.003% and 0.004% in relation to the plaster mass. And the percentages of CNFs and NT were 0%, 0.5%, 1%, 1.5% and 2%, also in relation to the plaster mass. In the experimental process, the different percentages of the nanomaterials were sonicated with water extracted from each trace, then the plaster was sprinkled into the mixture, mixed manually and molded into 4 x 4 x 16 cm shapes. After 28 days, tests were performed to evaluate apparent density, water absorption by immersion, flexural and compression strength, and morphology. There was a decrease in water absorption and an increase in apparent density, as MWCNT was incorporated into the plaster matrix. The mechanical strengths increased up to a certain point of the curve. The flexural strength, in turn, increased up to 12.74%, and the compressive strength had an increase of 26.4%, when compared to the control. In this study, the incorporation of lower levels of CNFs (up to 0.69%) proved to be viable and ensured lower water absorption. However, it did not significantly alter the compressive strength, and there was a decrease in flexural strength. On the other hand, given that CNFs are sustainable, cheap and highly available, and can even be obtained from waste, it is possible to create an innovative, sustainable material with high added-value. Regarding the incorporation of NT, a small amount of NT filled the pores of the plaster matrix, increasing the apparent density by up to 1.8%, increasing the compressive strength by up to 24.12%, and decreasing the water absorption by up to 5, 86%. It did not significantly change the flexural strength.

Keywords: Nanotechnology. Nanomaterials. Plaster matrix.

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	10
1	INTRODUÇÃO	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	Da gipsita ao gesso: calcinação	12
2.1.1	Hidratação do gesso	14
2.1.2	Usos da gipsita e do gesso	15
2.1.3	O gesso na construção civil	16
2.2	Nanotecnologia e nanomateriais	18
2.2.1	Nanotubo de carbono	21
2.2.2	Nanofibrilas de celulose	23
2.2.3	Talco micronizado	26
2.3	Nanocompósitos	28
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
	REFERÊNCIAS	32
	SEGUNDA PARTE – ARTIGOS*	41
	ARTIGO 1 - INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO GESSO DE CONSTRUÇÃO USANDO NANOTUBOS DE CARBONO ...	42
1	INTRODUÇÃO	43
2	MATERIAIS E MÉTODOS	44
2.1	Obtenção e preparação do material	44
2.2	Produção dos compósitos	46
2.3	Avaliação das propriedades físicas e mecânicas	47
2.4	Avaliação microestrutural	48
2.5	Análise dos resultados	49
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
3.1	Ensaio físicos	49
3.2	Ensaio mecânicos	51
3.3	Avaliação microestrutural	53
4	CONCLUSÕES	55
	REFERÊNCIAS	56

	ARTIGO 2 - ESTUDO DA MODIFICAÇÃO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO GESSO DE CONSTRUÇÃO UTILIZANDO NANOFIBRILAS DE CELULOSE.....	58
1	INTRODUÇÃO	59
2	MATERIAIS E MÉTODOS	61
2.1	Obtenção e preparação dos materiais	61
2.2	Preparação dos compósitos.....	61
2.3	Avaliação das propriedades físicas e mecânicas.....	63
2.4	Avaliação microestrutural	63
2.5	Análise dos resultados	64
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
3.1	Propriedades físicas dos compósitos	64
3.2	Propriedades mecânica dos compósitos	67
3.3	Avaliação microestrutural	69
4	CONCLUSÕES	71
	REFERÊNCIAS	72
	ARTIGO 3 – AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO NANOTALCO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MATRIZ DE GESSO	74
1	INTRODUÇÃO	75
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	76
2.1	Obtenção e caracterização da matéria prima.....	76
2.2	Produção dos compósitos.....	77
2.3	Avaliação das propriedades físicas e mecânicas.....	78
2.4	Avaliação microestrutural.....	79
2.5	Análise dos resultados.....	79
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
3.1	Avaliação microestrutural e EDS	80
3.2	Propriedades físicas dos compósitos	81
3.2	Propriedades mecânicas dos compósitos.....	84
4	CONCLUSÕES	86
	REFERÊNCIAS	87

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

A nanotecnologia inicia um marco histórico denominado *The New Industrial Revolution* ou ‘novo renascimento da ciência e da tecnologia’, sendo vista por muitos como um novo capítulo na história mundial, impulsionando as ciências da vida sob a forma da biotecnologia, bem como uma gama multidisciplinar de ciências exatas e cognitivas, denominadas nanociências (ROCO; BAINBRIDGE, 2002; MAYNARD, 2006; NOLASCO, 2016).

Neste aspecto, a nanotecnologia é um campo relativamente novo da ciência e tecnologia que estuda objetos minúsculos (0,1–100 nm). Dentre os setores que se mostram promissores, o campo tecnológico da construção civil vem se consolidando na esfera global como área importante do desenvolvimento da nanotecnologia (BARBOSA *et al.*, 2017).

Neste contexto, o desenvolvimento de estudos relacionados com nanomateriais podem melhorar as propriedades mecânicas de muitos materiais na área da construção civil (ATEWI *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2009; TAWFIK *et al.*, 2020; YANG *et al.*, 2021).

O gesso está entre os materiais de construção mais antigos que se tem conhecimento. De acordo com Pinto *et al.* (2016), o consumo desse material tem apresentado crescimento principalmente devido a facilidade e a rapidez da instalação das chapas, capacidade de moldagem e endurecimento rápido, excelente acabamento e decoração, dentre outras vantagens. No entanto, o gesso apresenta alguns inconvenientes de aplicação na construção civil, tais como fragilidade, falta de tenacidade e fraco desempenho contra a água, se degradando rapidamente. Sendo assim, nos últimos anos, muitos pesquisadores têm estudado esse material para melhorar algumas de suas propriedades (DEL RIO-MERINO *et al.*, 2022).

Diante disso, o desenvolvimento de pesquisas e tecnologias acerca da inclusão de nanoaditivos, reforços e cargas no gesso vêm se mostrando satisfatórias no sentido de contornar as limitações do material e intensificar seus benefícios. Nindiyasari *et al.* (2016) avaliaram os impactos mecânicos sofridos com a adição de 1 e 2% de celulose nanofibrilada. Tokarev *et al.* (2017), Gordina *et al.* (2013) e Derevianko Kondratieva e Hryshko (2018), avaliaram as modificações no gesso usando nanotubos de carbono. Matveeva *et al.* (2020) estudaram o efeito do nanomodificador de carbono (HFNCM) na estrutura e propriedades da pedra de gesso. Li *et al.* (2021) estudaram a influência da nano-sílica no gesso de dessulfurização de gases de combustão (FGD).

Os NTCs são um dos nanomateriais mais estudados, devido suas excelentes propriedades físico-químicas, como alta condutividade elétrica, estabilidade térmica, resistência mecânica, razão de aspecto e área de superfície. Essas propriedades únicas dos NTCs possibilitam o desenvolvimento de tecnologias e materiais inovadores que podem ser utilizados em diversas aplicações (MAKGABUTLANE *et al.*, 2021). Nanofibrilas de celulose merece atenção também na área de materiais compósitos devido à alta disponibilidade, biocompatibilidade e ótimas propriedades mecânicas (KUMAR; MISHRA *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2015, 2018; BOURMAUD *et al.*, 2018). Outro nanomaterial que merece destaque é o nanoalco, visto ter baixo custo, ser altamente disponível, sendo já utilizado em matrizes poliméricas, melhorando suas propriedades.

Diante do exposto, a nanotecnologia na construção civil promete revolucionar os materiais de construção, no entanto, está em estágio inicial de pesquisas, principalmente quando se refere à matriz de gesso. Apesar da realização de alguns estudos, percebe-se ainda que não existem resultados suficientes que possam demonstrar os efeitos da incorporação de nanotubos de carbono, nanofibrilas de celulose e nanotalco nas propriedades físicas e mecânicas de matrizes de gesso, sendo necessário um maior aprofundamento acerca da junção desses materiais.

O objetivo deste estudo foi desenvolver compósitos com matriz de gesso reforçados com nanomateriais, sendo eles: nanotubos de carbono, nanofibrilas de celulose e nanotalco, avaliando suas propriedades físicas de densidade aparente e absorção de água, propriedades mecânica de flexão e compressão, e também sua morfologia através de análise microestrutural.

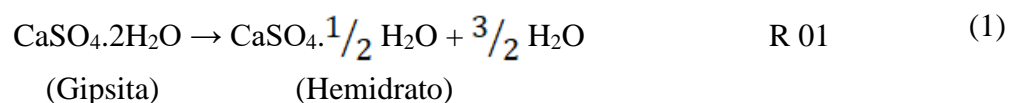
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Da gipsita ao gesso: calcinação

A mineração da gipsita no Brasil, é feita a céu aberto (*open pit*), semimecanizadas, com frentes de lavra na forma de anfiteatros, com bancadas variando em torno de 15 metros de espessura (ABREU, 2005). Após sua extração, a gipsita passa por uma série de operações unitárias para beneficiamento e produção do gesso: (1) britagem; (2) rebritagem; (3) peneiramento (usado apenas em algumas empresas); (4) encilhamento; (5) calcinação; (6) estabilização térmica em silos; (7) moagem (de acordo com as especificações de mercado para o produto); (8) encilhamento e; (9) ensacamento (PERES; BENACHOUR; SANTOS, 2001).

Dessas etapas, a calcinação pode ser considerada a mais importante, pois ela é diretamente responsável pelo tipo de gesso produzido, alfa (α) ou beta (β), dependendo das condições do processo aplicado e, conseqüentemente, responsável pelas suas características físicas e mecânicas. Diante do exposto, as reações do processo de calcinação dessa matéria-prima serão descritas a seguir.

Em temperatura ambiente tem-se a gipsita, quimicamente denominada de Sulfato de Cálcio di-Hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). A elevação da temperatura dá início ao processo de calcinação sendo que na faixa de 140 °C a 150 °C é obtido o hemidrato de sulfato de cálcio, chamado de ‘Gesso de Paris’ ou simplesmente ‘Gesso’, como pode ser visto na reação R 01 (ANGELERI; CARDOSO; SANTOS, 1982; CINCOTTO; AGOPYAN; FLORINDO, 1988).

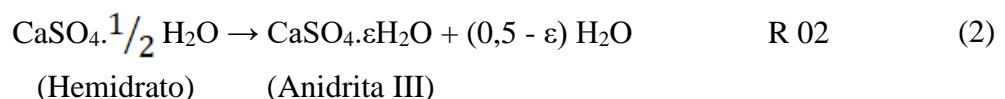


O hemidrato formado é do tipo beta, caso o processo ocorra em pressão atmosférica normal, em fornos tipo panela, marmitta ou rotativos, ou do tipo alfa, caso o sistema esteja em pressão maior que a atmosférica, como em autoclaves, ou em presença de reativos químicos (ABREU, 2005). Ambos apresentam a mesma fórmula química ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), porém, se diferem quanto a estrutura cristalina e morfológica (tamanho e superfície do cristal) e essas diferenças exercem influência sobre as propriedades da pasta e do gesso endurecido (BALTAR; BASTOS; BORGES, 2004).

Dessa forma, o gesso beta tem estrutura porosa e com cristais pouco definidos. Isso porque a calcinação em pressões atmosféricas faz com que a água de cristalização seja liberada violentamente e os cristais de gesso se fraturam formando agregados de partículas que contêm material de dimensões coloidais (ABREU, 2005). Em contrapartida, se o processamento é feito sob altas pressões para a produção do gesso alfa, a água de cristalização é liberada lentamente e a desidratação é mais uniforme formando partículas mais tabulares e menos porosas.

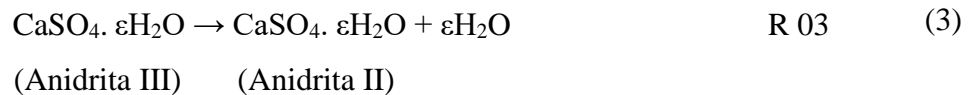
Devido as suas características, o gesso alfa apresenta uma menor demanda de água para formação da pasta em relação ao gesso beta, resultando em produtos de melhor qualidade e aplicações mais nobres, como para uso hospitalar (ALMEIDA; SOARES; MATOS, 2020; BALTAR; BASTOS; BORGES, 2004). É capaz de produzir materiais de maior densidade (devido sua menor porosidade), maior resistência à abrasão, baixa expansão volumétrica, maior tempo de pega e maiores resistências mecânicas à compressão e flexão (ANGERELI; COSTA, 1956). Já o gesso beta tem sua utilização na construção civil, na indústria cerâmica e na indústria de moldagem, sendo que os principais tipos utilizados são o de fundição e o de revestimento, e tem custo menor do que o gesso alfa (BALTAR; BASTOS; BORGES, 2004).

Dando continuidade ao processo de calcinação, a partir da temperatura de 200 °C o hemidrato perde quase toda sua água formando uma anidrita solúvel (instável) chamada de anidrita III, como pode ser visto na reação R 02 (JOHN; CINCOTTO, 2007). A anidrita tem ϵ variando entre 0,11 e 0,06 indicando que este produto pode conter água de cristalização, mesmo que em baixos teores (CINCOTTO; AGOPYAN; FLORINDO, 1988). Devido a sua instabilidade, a anidrita III se transforma em hemidrato com a umidade do ar e essa rehidratação ocorre após o gesso sair do forno em uma etapa conhecida como estabilização do gesso (MELO, 2012). A alta capacidade de absorção de água da anidrita III ainda lhe confere características apropriadas para o uso como acelerador de tempo de pega (BALTAR; BASTOS; BORGES, 2004).



Quando a temperatura ultrapassa 220 °C para o hemidrato alfa e 350 °C para o hemidrato beta, a anidrita III se transforma, segundo a reação R 03, em anidrita II ou anidrita insolúvel, formando um produto estável de hidratação lenta (ABREU, 2005; MELO, 2012).

Ainda segundo os autores, essa anidrita é utilizada como um dos constituintes do gesso de construção civil, principalmente para revestimento de parede, por conferir resistências especiais à erosão e à compressão para a mistura final.



Ao elevar ainda mais a temperatura, acima de 800 °C, é formada a anidrita I e esta é bastante similar à anidrita natural encontrada no minério gipsita, de hidratação extremamente difícil, inerte e sem aplicação industrial (ABREU, 2005; BALTAR; BASTOS; BORGES, 2004). Por fim, em temperaturas acima de 1250 °C, a anidrita I é decomposta se transformando em óxido de cálcio e anidrido sulfúrico ($\text{CaO} + \text{SO}_2 + 1/2\text{O}_2$) (ABREU, 2005; MELO, 2012). Esta corresponde à última etapa de calcinação da gipsita.

2.1.1 Hidratação do gesso

O gesso é um aglomerante que, em contato com a água, forma uma pasta homogênea, consistente e trabalhável, e que em poucos minutos ganha viscosidade, endurecimento e resistência (GARTNER, 2009). Esse processo de hidratação deve resultar em um produto com composição exatamente igual ao que o originou, a gipsita (SANTOS; VASCONCELOS; PINTO, 1997). Isso porque o hemidrato irá retomar a quantidade de água perdida durante a calcinação, levando à precipitação do sulfato de cálcio di-hidratado, como visto na reação R 04 (MORGADO *et al.*, 2019).



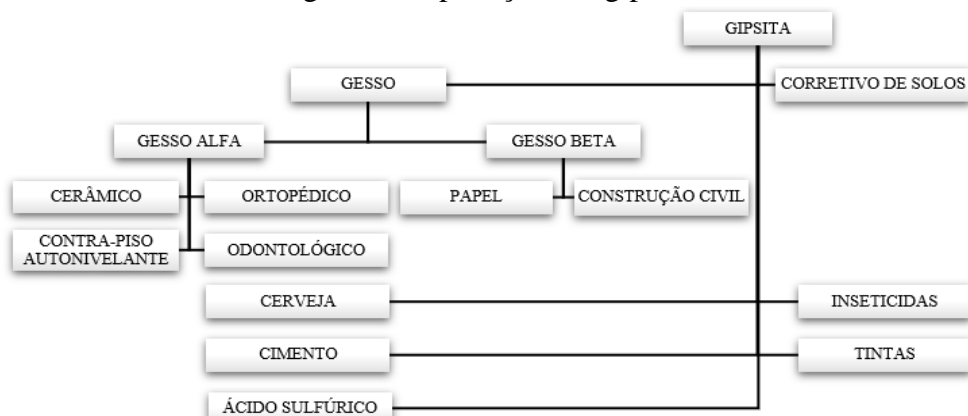
Nesse processo, há formação de uma solução supersaturada de íons Ca^{2+} e SO_4^{4-} que se precipitam em forma de cristais como agulhas finas, bem definidas e que entrelaçam entre si, responsáveis pelo bom comportamento mecânico do material (MENEZES; POVOAS, 2016; WEBER; CECHIN; TOKARSKI, 2017). A precipitação dos cristais promove um aumento na consistência da pasta, conhecido como ‘início da pega’ e, conforme a taxa da reação de hidratação aumenta, a pasta vai adquirindo cada vez mais resistência mecânica até o seu completo endurecimento, indicando o final da pega (ABREU, 2005).

A relação água/gesso empregada influencia diretamente nas propriedades da pasta. Em teoria, para o mecanismo de pega descrito na reação R 04, apenas 18,6 partes de água são necessárias para saturar 100 partes de gesso sendo que, em caso de excesso de água, será formada uma pasta plástica ou fluida para a trabalhabilidade da mesma (REED, 1998). Além disso, o excesso de água na hidratação tem consequências diretas sobre a porosidade do gesso endurecido. Isso porque a água remanescente, que não reage com o pó, ocupa volume entre os cristais e, após a cura do dihidrato, ela evapora, deixando espaços vazios no material (BARBOSA; FERRAZ; SANTOS, 2014). Outros fatores como a temperatura da água, a possível presença de impurezas e o tamanho das partículas de gesso também têm influência sobre a reação da hidratação (ABREU, 2005).

2.1.2 Usos da gipsita e do gesso

Ao final do processo de calcinação, pode-se identificar pelo menos quatro tipos de sulfato de cálcio, sendo estes: a gipsita não calcinada ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), o hemidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), a anidrita III ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,11-0,06\text{H}_2\text{O}$) e a anidrita II ($\text{CaSO}_4 \cdot \varepsilon\text{H}_2\text{O}$) (ABREU, 2005). Estes dois últimos, como visto, podem ser utilizados como cargas e aditivos para o gesso. Já a gipsita não calcinada e o hemidrato têm aplicações em uma série de atividades industriais (FIGURA 1).

Figura 1 – Aplicações da gipsita.



Fonte: Melo (2012).

Em suma, na forma natural, a gipsita pode ser utilizada na agricultura, como corretivo para solos, fertilizantes e condicionador de solos, e também para a fabricação de cimento, tintas, pólvora, como acabamento de tecidos de algodão, como carga de inseticidas e na água

utilizada na fabricação de cerveja (BALTAR; BASTOS; BORGES, 2004; MELO, 2012). Já o campo de utilização do gesso pode ser dividido em dois segmentos: para construção civil e para uso industrial. Dessa forma, as características do gesso irão variar de acordo com as condições requeridas para determinada aplicação.

Para a construção civil é utilizado o hemidrato beta, que pode ser do tipo A ou B, já para uso industrial há exigência de uma maior pureza e maior valor agregado do gesso, então normalmente utiliza-se o hemidrato alfa. Importante ressaltar também, que a obtenção de cada uma dessas variedades de produto requer condições específicas com relação ao tipo de gipsita, tipo de forno, condições de calcinação e tratamento posterior (BALTAR; BASTOS; BORGES, 2004).

2.1.3 O gesso na construção civil

O gesso é um dos materiais de construção mais antigos que se tem conhecimento. Atualmente, a maior parte da exploração da gipsita é voltada para a produção do hemidrato beta a ser utilizado no mercado da construção civil (BALTAR; BASTOS; BORGES, 2004; BARBOSA; FERRAZ; SANTOS, 2014). Sua ampla utilização se deve à versatilidade do material, que pode ser empregado como blocos de gesso simples ou até como matéria-prima para chapas de gesso acartonado, por exemplo.

A norma NBR 13207 (ABNT, 2017) é a responsável por regulamentar a utilização do gesso na construção civil no Brasil. A mesma o define como ‘material moído em forma de pó, obtido da calcinação da gipsita, constituído predominantemente de sulfato de cálcio, podendo conter aditivos controladores de tempo de pega’ e o classifica quanto a sua granulometria (fino ou grosso), sua utilização (fundição (tipo A) ou revestimento (tipo B)) e seu tempo de pega (lento ou rápido). Os valores referentes às exigências normativas para utilização do gesso na construção civil podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Requisitos do gesso para utilização na construção civil.

Requisitos físicos e mecânicos		
Ensaio	Unidade	Limite
Massa Unitária	g/cm ³	≥ 600,0
Dureza	MPa	≥ 20,0
Aderência	MPa	≥ 0,2
Requisitos físicos (tempo de pega)		
Ensaio	Tempo de pega (min)	
	Início	Fim
Gesso para fundição	≤ 10	≤ 20
Gesso para revestimento (sem aditivos)	≥ 10	≥ 35
Gesso para revestimento (com aditivos)	≥ 4	≥ 50
Requisitos físicos (granulometria via seca)		
Classificação do gesso	Granulometria mínima	
Gesso para fundição	(peneira abertura 0,29mm) ≥ 90% passante	
Gesso para revestimento	(peneira abertura 0,21mm) ≥ 90% passante	
Requisitos químicos do gesso sem aditivos		
Determinações químicas	Limites (%)	
Água livre	Máx. 1,3	
Água de cristalização	4,2 a 6,2	
Óxido de cálcio (CaO)	Mín. 38,0	
Anidrito sulfúrico (SO ₃)	Mín. 53,0	

Fonte: ABNT (2017).

O gesso para revestimento, ou do tipo B, é empregado para revestir paredes e tetos de ambientes internos e secos, geralmente em substituição de rebocos e/ou massas para acabamento, enquanto o gesso para fundição, ou do tipo A, é o material empregado na fabricação de placas convencionais, blocos de gesso e chapas de gesso acartonado (BALTAR; BASTOS; BORGES, 2004; JOHN; AGOPYAN; PRADO, 1997). Dessa forma, a partir desses dois tipos de gesso, é possível a obtenção de diversos produtos como placas para rebaixamento de tetos, paredes divisórias, gesso cola (para rejunte de pré-moldados de gesso), gesso para portas corta fogo, dentre outros (BALTAR; BASTOS; BORGES, 2004).

Como visto anteriormente, o gesso é capaz de cristalizar e endurecer em água, porém, não subsiste na água devido sua alta solubilidade (ABREU, 2005). E ainda, a exposição prolongada à atmosfera causa amolecimento do hemidrato e a água que flui em sua superfície pode dissolver e lavar o material (KARNI; KARNI, 1995).

Por outro lado, as características do gesso também lhe conferem propriedades interessantes para a construção civil. Como se trata de um material que se decompõe a baixas temperaturas, há liberação de água que ocasiona o retardamento da propagação de fogo, sendo recomendado como proteção contra o fogo em construções (CINCOTTO; AGOPYAN; FLORINDO, 1988). Ainda segundo os autores, devido à sua facilidade de absorção e perda de água, elementos de gesso contribuem com o equilíbrio da umidade relativa do ar de ambientes fechados, principalmente os climatizados. Suas propriedades de isolamento acústico também são apontadas como garantia de conforto nesses ambientes (EIRES; CAMÕES; JALALI, 2008).

Em todo o caso, o desenvolvimento de pesquisas e tecnologias acerca da inclusão de aditivos, reforços e cargas no gesso vem se mostrando satisfatório no sentido de contornar as limitações do material e intensificar seus benefícios. Materiais como estes são denominados de compósitos, já que são constituídos por duas ou mais fases; sendo uma a matriz, que é contínua e envolve a outra fase, chamada frequentemente de fase dispersa (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2016). Nesse sentido, compósitos com matriz de gesso já vêm sendo produzidos com a inclusão de fibras ou partículas naturais (BRAIEK *et al.*, 2017; IUCOLANO *et al.*, 2015; SILVA, 2014; VILLELA *et al.*, 2020) e sintéticas (GENCEL *et al.*, 2014; OLIVEIRA *et al.*, 2012; SERNA *et al.*, 2012) melhorando as propriedades físicas e mecânicas, em relação ao gesso puro.

Há um crescente interesse na inclusão de nanomateriais naturais e sintéticos em outros materiais de construção, como cimentos e argamassas, devido a comprovada melhoria das características proporcionada pela ação do nanoreforço (FARZADNIA *et al.*, 2013; SENFF *et al.*, 2013; ZHU; BARTOS; PORRO, 2004). Dessa forma, o uso de nanomateriais como reforço em matrizes de gesso para a construção civil também pode ser considerado.

2.2 Nanotecnologia e nanomateriais

A nanotecnologia é um campo da ciência em desenvolvimento relacionado ao estudo da matéria operacional em escala molecular e atômica, que permite a concepção de técnicas e

dispositivos inovadores com tamanhos na faixa de 1 nm a 100 nm (SALEEM *et al.*, 2021). Esta tecnologia gera grande potencial comercial para as indústrias e é normalmente considerada como muito promissora. Os materiais funcionam de maneira diferente no nível de nanoescala (GUISBIERS *et al.*, 2012).

O desenvolvimento e pesquisas em nanotecnologia são extremamente ativos em todo o mundo, e esta tecnologia já está sendo empregada em diferentes aplicações e vista em centenas de produtos atualmente, como têxteis, cosméticos, equipamentos, pintura e eletrônicos (KHARE *et al.*, 2021; ALMEIDA *et al.*, 2020; KAMARULZAMAN *et al.*, 2020; ANANDHARAMAKRISHMAN *et al.*, 2020.)

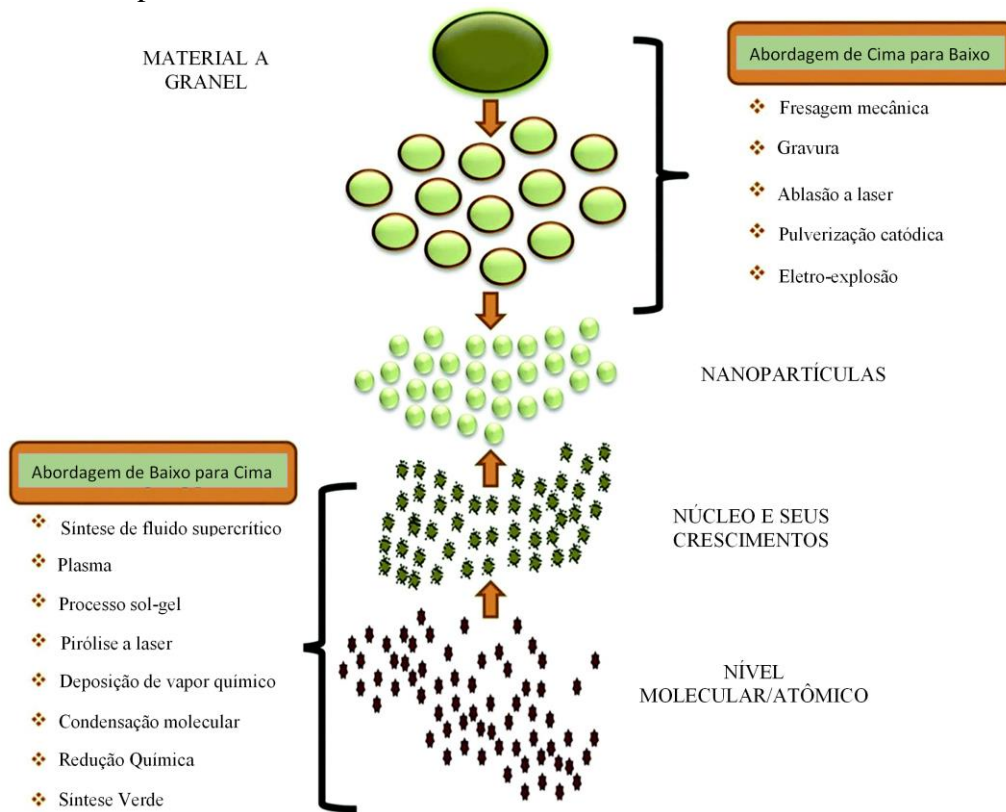
A análise das realizações científicas mostra que o mundo está no limiar da terceira revolução científica e tecnológica, que vai determinar o lugar dos países na esfera tecnológica do século XXI, sendo que mais de 70 países estão implementando programas estaduais para o desenvolvimento da nanotecnologia (DEREVIANKO; KONDRATIEVA; HRYSHKO, 2021)

Segundo Pisarenko, Ivanov e Wang (2020), a um nível global, o número de literaturas sobre pesquisas em nanotecnologia na área da construção teve uma tendência ascendente no período de 2000-2019, indicando que a nanotecnologia neste setor despertou o interesse de muitos estudiosos, sendo sua principal aplicação para melhorar os materiais de construção tradicionais. Por exemplo, a nanotecnologia pode melhorar muito o desempenho antibacteriano e anti-incrustante, envelhecimento, resistência, hidrofobicidade e resistência ao fogo de revestimentos arquitetônicos (ZHENG *et al.*, 2019; DAHLAN *et al.*, 2019).

De acordo com Malhotra e Ali (2018) os nanomateriais podem ser categorizados de acordo com suas dimensões e tamanho. Segundo Baig *et al.* (2021) duas abordagens principais são usadas para a síntese de nanomateriais (FIGURA 2): abordagens de cima para baixo e abordagens de baixo para cima. Nas abordagens de cima para baixo, os materiais a granel são divididos para produzir materiais nanoestruturados. Os métodos mais comuns para obter os nanomateriais de cima para baixo incluem fresagem mecânica, ablação a laser, gravação, pulverização catódica e eletroexplosão. Considerando que a abordagem de baixo para cima é totalmente inversa, portanto, referida como nanotecnologia molecular envolvendo a montagem de uma estrutura definida juntando átomo por átomo, molécula por molécula (THAKKAR *et al.*, 2010). Desse modo, as propriedades de automontagem de moléculas únicas são exploradas para construir conformações complexas em nanoescala (NATH; BANERJEE, 2013). Os métodos de obtenção de baixo para cima mais comuns incluem

síntese de fluido super crítico, plasma, condensação molecular, processo sol-gel, pirólise a laser, deposição de vapor químico, condensação molecular, redução química e síntese verde.

Figura 2 - Síntese de nanomateriais (NPs) por meio de abordagens de cima para baixo e de baixo para cima.



Fonte: Adaptado de Payghan Sunil *et al.* (2019).

Tipicamente, os nanomateriais produzidos são classificados em diferentes categorias com base em forma e dimensão, composição de fase e natureza do material, sendo em 0-D (nanopartículas), 1-D (nanotubos, nanofilamentos e nanofibras), 2-D (nanofilmes e nanorevestimentos) e 3-D (maciços) (FLORES-COLEN; SOARES; BRITO, 2013). Esta classificação baseia-se no número de dimensões não confinadas à escala nano (GONÇALVES, 2012).

Um dos mais estudados são os nanotubos de carbono devido suas excelentes propriedades mecânicas, térmicas e elétricas, que têm motivado o desenvolvimento de nanocompósitos avançados com propriedades notáveis e multifuncionais (PARVEEN; RANA; FANGUEIRO, 2013). Segundo os mesmos autores, depois de obter um sucesso considerável na utilização desses materiais exclusivos em várias matrizes poliméricas, um

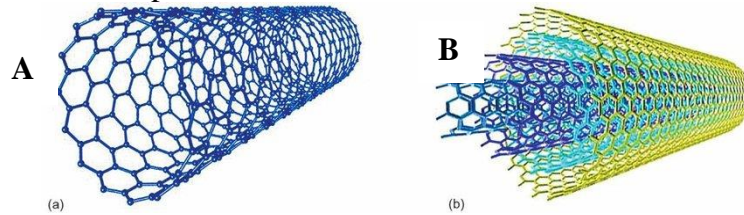
grande interesse está sendo observado no desenvolvimento de compósitos à base de cimento reforçados com CNT. Além destes, outros tipos de nanomateriais vêm sendo empregados em um grande número de produtos de consumo como tintas, filtro solares, medicamentos e materiais esportivos (BERGNA; ROBERTS, 2006). Porém, devido a intensificação de estudos acerca destes materiais, seu campo de utilização tende a ser cada vez maior. A respeito disso, a indústria da construção civil foi considerada como um dos campos mais promissores para a nanotecnologia, tendo um impacto substancial em seus produtos, mas ainda está nos estágios iniciais de expansão (DÍAZ-SOLER; MARTÍNEZ-AIRES; LÓPEZ-ALONSO, 2016).

2.2.1 Nanotubo de carbono

Os nanotubos de carbono (NTC) foram descobertos e sintetizados pelo físico Iijima (1991) graças ao descobrimento do fulereno (grandes cadeias fechadas de carbono) e sua comprovada estabilidade na fase gasosa, por Kroto (1995) (PEREIRA, 2013). Desde então, esses materiais têm atraído a atenção da comunidade científica devido ao seu potencial de aplicação em diferentes áreas, tais como reforço de polímeros, estocagem de energia, eletrônica e catálise, como consequência das suas características específicas (FERREIRA; RANGEL, 2009; SERP; CORRIAS; KALCK, 2003). Como exemplo de suas atrativas propriedades, Pereira (2013) cita que, em comparação com os aços, o NTC tem tensão de ruptura cerca de 10 a 250 vezes maior, rigidez de no mínimo cinco vezes maior e densidade seis vezes menor.

Esses nanomateriais são considerados como a forma quase que unidimensional dos fulerenos, caracterizando uma estrutura única (PEREIRA, 2013). São constituídos de camadas de átomos de carbono, em um arranjo hexagonal, originando pequenos cilindros com diâmetro de aproximadamente 1 nm, que se enrolam para formar tubos longos, com comprimento de vários centímetros, unidos por átomos de carbono em arranjo pentagonal (FERREIRA; RANGEL, 2009). Os NTCs podem ser divididos em duas categorias: nanotubos de uma parede, SWNT (*single-walls nanotubes*) (FIGURA 3A) e nanotubos de paredes múltiplas, MWNT (*multi-walls nanotubes*) (FIGURA 3B) (FERREIRA; RANGEL, 2009; PEREIRA, 2013).

Figura 3 – A) Nanotubos de carbono de paredes simples e B) Nanotubos de carbono de paredes múltiplas.



Fonte: Payghan Sunil *et al.* (2019).

Idealmente, um nanotubo de uma parede é formado por uma folha perfeita de grafeno com diâmetro podendo variar entre 0,4 e 2,5 nm e comprimento variando de alguns micros a vários milímetros (FERREIRA; RANGEL, 2009). Já os nanotubos de paredes múltiplas, ainda segundo os mesmos autores, podem ser considerados como nanotubos de uma parede concêntricos com diâmetros decrescentes dispostos de modo coaxial, com número de paredes podendo variar de duas (nanotubos de paredes duplas) a várias centenas, de modo que o diâmetro externo pode alcançar até 100 nm. Importante ressaltar que, devido a variação na estrutura destes dois tipos, suas propriedades também se diferem (PEREIRA, 2013). Além disso, fatores como diâmetro e comprimento irão variar de acordo com o método de fabricação (KANG *et al.*, 2006).

Vários são os métodos de fabricação e purificação dos NTCs, com a finalidade de produzi-los com o mínimo de impurezas e ‘defeitos’ possível. Dessa forma, a qualidade e quantidade de amostras dependem fundamentalmente da escolha da técnica de síntese (PEREIRA, 2013). Em resumo, para a produção de SWNT são usadas, principalmente, as técnicas de descarga de arco-elétrico (GUAN *et al.*, 2007) e ablação a laser (LIU *et al.*, 2009). Essas técnicas se baseiam em realizar a vaporização do grafite. Já para a produção de MWNT em larga escala são usadas técnicas como deposição química da fase vapor (CVD) (MIYATA; MIZUNO; KATAURA, 2011) e deposição química por fase vapor induzida por plasma (PECVD) (BELL *et al.*, 2006). Diferente das primeiras técnicas, essas consistem em realizar a formação de carbono sólido a partir da decomposição térmica de gases como o metano, etileno e acetileno.

A estrutura singular dos NTCs lhes confere propriedades únicas. São consideradas as fibras de mais alta rigidez axial, uma vez que a ligação covalente C=C do grafite é a mais forte da natureza (PEREIRA, 2013). Os SWNT possuem muitas das propriedades mecânicas das fibras de carbono, porém, devido sua alta flexibilidade, capacidade de absorver distorções e suportar esforços de compressão sem fraturar, se sobressaem em comparação às fibras. Já os

MWNT têm propriedades que não podem ser explicadas através dos mesmos mecanismos do SWNT. Isso porque entre as camadas de nanotubos existem forças por ligação de *van der Walls* que formam uma estrutura empilhada de átomos, refletindo principalmente nas propriedades mecânicas (PEREIRA, 2013).

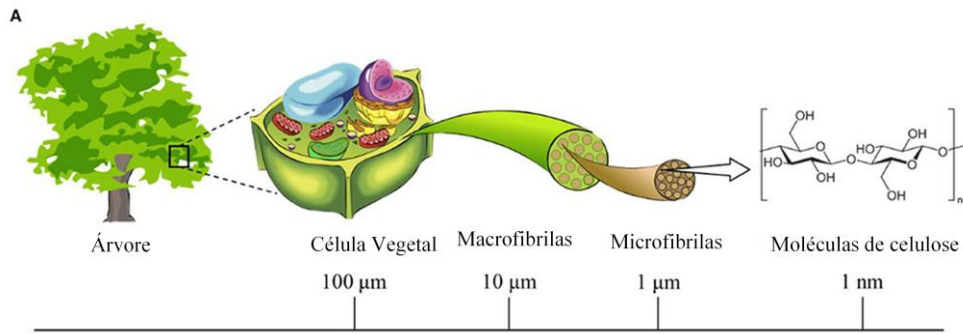
Outra característica interessante dos NTCs é a capacidade de assumir a condição de metálicos ou semicondutores, com ampla utilização na microeletrônica e propriedades elétricas em geral (PEREIRA, 2013). Pode-se inferir que, o que faz esse material único e excepcional, é que, ao contrário de outros materiais similares, os NTCs têm a vantagem de serem utilizados combinando suas propriedades (eletrônicas, adsorptivas, mecânicas e elétricas) umas com as outras, tornando infinitas as possibilidades de utilização (FERREIRA; RANGEL, 2009; KANG *et al.*, 2006).

2.2.2 Nanofibrilas de celulose

A celulose é a matéria-prima polimérica mais abundante do planeta, sendo sua produção anual estimada entre 10^{10} e 10^{11} t, (TRACHE *et al.*, 2020). A celulose é basicamente constituída pela repetição de unidades de β -D-anidroglicopiranosose que se ligam entre si através dos carbonos 1-4 (GOPI *et al.*, 2019). Feixes de moléculas de celulose se agregam para produzir uma estrutura cristalina de celulose conhecida como fibrilas elementares. Estas últimas são agrupadas para produzir microfibrilas, que, por sua vez, formam macrofibrilas ou fibras celulósicas. Uma apresentação gráfica da celulose desde sua matéria-prima natural até a molécula fundamental, é mostrada na Figura 4.

Em geral, a nanocelulose é um material celulósico biodegradável com pelo menos uma de suas dimensões (comprimento, largura ou diâmetro) dentro da escala nanométrica (PHANTHONG *et al.*, 2018). A nanocelulose é ainda classificada em três tipos principais: nanofibrilas de celulose (CNFs), nanocelulose bacteriana (BNC) e nanocristais de celulose (CNCs). Embora todos sejam similares em composição química, o que os diferem é a morfologia, tamanho da partícula, cristalinidade e métodos de extração (PHANTHONG *et al.*, 2018; PANCHAL; OGUNSONA; MEKONNEN, 2018).

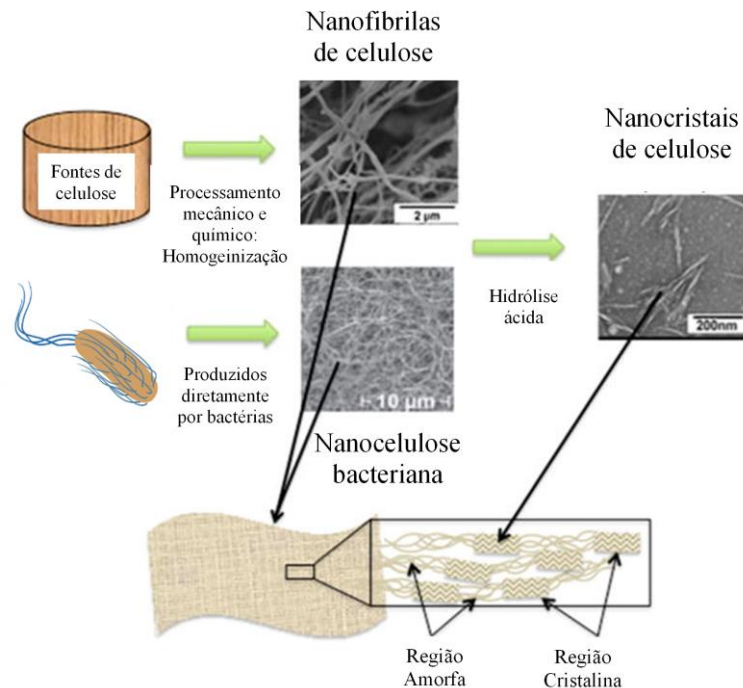
Figura 4 - Representação gráfica da celulose desde sua matéria prima natural até a molécula fundamental



Fonte: Adaptado de Trache *et al.* (2020).

Conforme a Figura 5, as CNFs são geralmente obtidas através do processamento mecânico e químico de matérias-primas de celulose, as BNCs são produzidas diretamente por bactérias, já os CNCs são produzidos geralmente da hidrólise ácida de CNFs para remover regiões amorfas. Contudo, o material de interesse para esse trabalho são as CNFs, elas apresentam uma estrutura de rede emaranhada com nanofibras flexíveis, mais longas e largas (20–100 nm de largura e >10.000 nm de comprimento), e menor cristalinidade em relação às CNCs.

Figura 5 - Obtenção dos nanomateriais de celulose



Fonte: Adaptado de Carpinteiro *et al.* (2015).

A obtenção das CNFs ainda é um processo desafiador devido à dificuldade de separação das fibras vegetais em componentes nanoestruturados, ocorrência de graves

degradações das fibras e altos custos no processo (SATYAMURTHY *et al.*, 2011; SIRÓ; PLACKETT, 2010). Dessa forma, o isolamento das CNFs envolve uma série de processos que vêm sendo estudados ao longo dos anos para um melhor aprimoramento. Esses métodos têm sido relatados e agrupados em: tratamentos químicos, mecânicos e dissolução, podendo ser utilizados separadamente, em sequência ou combinação (HUBBE *et al.*, 2008).

Apesar da diversidade de fontes para obter nanopartículas de celulose, os procedimentos para o seu isolamento geralmente seguem um esquema de três etapas: (1) pré tratamento da matéria-prima, (2) hidrólise parcial (ácida ou enzimática) e (3) desintegração mecânica (TIBOLLA, 2014).

O pré-tratamento é considerado uma das etapas mais importantes, pois ocasionará a redução da energia necessária para a posterior separação das fibras, tendo em vista que suas características químicas e morfológicas funcionam como barreiras aos agentes hidrolíticos (SIRÓ; PLACKETT, 2010; TIBOLLA, 2014). Os pré tratamentos podem ser por processos químicos (ácidos ou alcalinos), físicos (como explosão a vapor) ou mecânicos (através da moagem) e tem como objetivo promover a deslignificação e reduzir o tamanho das partículas.

Posteriormente ao pré-tratamento, a separação das fibras ocorre por hidrólise ácida ou enzimática. Esta segunda é considerada a mais promissora já que oferece condições mais suaves comparado com o tratamento mais agressivo da hidrólise ácida (TIBOLLA, 2014). Em resumo, no processo as enzimas atacam as regiões amorfas das fibras lignocelulósicas, que apresentam menor densidade e maior área de contato, causando uma clivagem hidrolítica das ligações glicosídicas β -1,4 localizadas entre as unidades de glicose que formam a celulose (HUBBE *et al.*, 2008). Ainda, um novo conceito para preparar as nanofibras de celulose está sendo pesquisado, em que a hidrólise enzimática é usada em combinação com a agitação mecânica ou homogeneização à alta pressão, para que ocorra a desfibrilação da parede celular vegetal, facilitando o isolamento das CNFs (DURÁN *et al.*, 2011).

Visto isso, é importante ressaltar que as CNFs têm atraído um interesse significativo nas últimas décadas devido sua sustentabilidade, disponibilidade abundante e características únicas que as fazem úteis na produção de materiais, aplicação de sensores e ciência biomédica (HUBBE *et al.*, 2008; KAUSHIK; SINGH, 2011). Dentre estas intrínsecas características, podem ser citadas a elevada área de superfície em relação ao volume, alta relação de aspecto (razão entre comprimento e largura) e as boas propriedades mecânicas, dinâmicas, térmicas e elétricas, tais como: elevado módulo de Young, resistência à tração, rigidez, flexibilidade, coeficiente muito baixo de expansão térmica e formação da malha altamente porosa em

comparação com suas contrapartes macroscópicas e outras fibras comerciais (CHERIAN *et al.*, 2008; HUBBE *et al.*, 2008).

2.2.3 Talco micronizado

O talco é uma matéria-prima mineral denominada de filossilicato de magnésio hidratado e que apresenta fórmula química $Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$ (SALVADOR; ALMEIDA, 2008). Trata-se de um material inodoro, insolúvel em água, ácidos fracos e álcalis e não é explosivo ou inflamável (CRUZ, 2008). Após seu beneficiamento, o talco apresenta interessantes propriedades para utilização em compósitos, dentre elas podem ser destacadas: baixa dureza na escala Mohs (talco = 1 e diamante = 10), alta hidrofobicidade, alta área superficial específica, alta capacidade de isolamento elétrico, baixa condutividade, alta estabilidade e alta resistência ao choque térmico (CRUZ, 2008). Além de ser altamente disponível e ter baixo custo.

Dessa forma, suas específicas características advindas da composição química, estrutura cristalina e textura lhe conferem um amplo espectro de propriedades tecnológicas que encontram aplicações tanto nobres, como reforço mineral para elaboração de cosméticos, tintas e cobertura de papel, quanto em aplicações mais simples, como fundente na indústria cerâmica, componente de argamassas para construção civil ou mesmo carga inerte na fabricação de tintas, borrachas, inseticidas, fertilizantes, papel etc. (CRUZ, 2008; MINEROPAR, 1988; PUGSLEY JR *et al.*, 1990; SALVADOR; ALMEIDA, 2008).

Dentre as especificações técnicas para utilização do talco, a granulometria das partículas é uma das mais importantes a ser controlada (SALVADOR; ALMEIDA, 2008). Isso porque o tamanho das partículas tem influência direta sobre as propriedades do material. A indústria de plástico, por exemplo, utiliza talco com granulometria de 1 a 20 μ m, com tendência a usos em faixas granulométricas cada vez menores (CAMARA, 2003). O interesse na redução do tamanho das partículas se deve pelo fato dessa característica ser inversamente proporcional à sua superfície de contato. Ou seja, a diminuição da granulometria ocasiona um aumento da interação das partículas com a matriz em que estão inseridas, potencializando ainda mais as propriedades do material.

Sabe-se que a moagem excessiva de partículas de talco natural pode ocasionar uma baixa homogeneidade de tamanhos e a destruição da sua estrutura (SANTOS, 2017). Dessa forma, a produção de partículas pequenas com distribuição de tamanho controlada é de

extremo interesse para a comunidade científica e industrial (ANTUNES, 2007). Por esse motivo, vários esforços foram feitos para a obtenção de um melhor entendimento sobre fundamentos da fragmentação, assim como a estrutura dos materiais, a fim de otimizar as técnicas de fragmentação (LONDE; FINZER, 2020). Da mesma forma, progressos significativos na prática de moagem foram obtidos como a otimização de moinhos, que operam por mecanismos de cisalhamento, compressão, impacto, dentre outros, juntamente com o desenvolvimento de novos modelos de moinhos e sistemas de moagem, possibilitando a extensão dos limites de moagem a menores tamanhos de partículas até faixas de materiais ultrafinos (WELLENKAMP, 1999).

A micronização é um termo generalizado para descrever a redução de tamanhos das partículas obtidas por sistemas de moagem tradicionais, podendo ser classificadas como moagem fina, quando a granulometria é menor que 100 μm , e ultrafina, menor que 10 μm (LONDE; FINZER, 2020). Ainda segundo os autores, partículas provenientes da moagem ultrafina podem ter diâmetros na escala dos nanômetros, mas mantêm-se incluídas no termo micronização. Além disso, algumas partículas possuem camadas de clivagem, umas sobre as outras, como é o caso do talco, e a distância entre estas camadas se dá em escala nanométrica. Estas propriedades lhes caracterizam como partículas nanométricas, porém, ainda assim, são chamadas de partículas micronizadas.

Para a obtenção de partículas ultrafinas de materiais que apresentam características de moagem cristalina e quebradiça como o talco, normalmente é utilizado o moinho de jato em espiral que é constituído de uma câmara de moagem cilíndrica plana com vários bicos dispostos tangencialmente na parede periférica, um injetor de alimentação pneumático e um funil de alimentação (JOSHI, 2011). Dentre as variáveis do processo, a vazão de alimentação e a pressão do ar comprimido são as mais importantes de serem controladas, pois influenciam diretamente na uniformidade da granulometria das partículas e características do produto final (LONDE; FINZER, 2020).

Após a alimentação do moinho com as partículas, fluxos de ar comprimido são injetados a alta velocidade através de bocais localizados na periferia da câmara circular do moinho; então o material dentro da câmara de moagem é submetido a duas forças, o vórtice livre criado por força centrífuga ao acelerar as partículas tangencialmente, pelo bico injetor de alimentação, e as forças de arraste criadas pelo escoamento de ar dos bicos injetores nas laterais da câmara que levam as partículas a entrarem em contato várias vezes umas com as outras, gerando a redução progressiva do diâmetro e da massa (LONDE; FINZER, 2020).

2.3 Nanocompósitos

Materiais compósitos podem ser definidos como aqueles constituídos por dois ou mais materiais com propriedades físicas ou químicas significativamente diferentes, os quais, quando combinados, produzem um material que possui características únicas diferentes daquelas pertencentes aos constituintes isolados (RAJAK *et al.*, 2019). A classificação de compósitos pode variar de acordo com a escala ou o tipo do reforço, bem como quanto ao material da matriz e quanto a origem da matriz e do reforço.

No caso dos nanocompósitos, uma dessas fases, geralmente a dispersa, é constituída de partículas com dimensões da ordem de nanômetros (TWARDOWSKI, 2007). A redução da granulometria das partículas faz com que estas tenham um aumento de interação com a matriz e, como essa interação é a responsável por agregar características ao material, seu aumento melhora consideravelmente algumas propriedades do nanocompósito não só em relação aos componentes em separado, mas também em relação ao compósito comum (MILLER *et al.*, 2010; PEREIRA, 2013).

As cargas em escala nanométrica utilizadas como reforços apresentam diversas formas e tamanhos, sendo, de modo geral, classificadas pela sua geometria: particulados, lamelares e fibrosos (PEIXOTO, 2012). Ainda segundo o autor, o negro de fumo, as nanopartículas de sílica e de BaSO₄ podem ser classificados como agentes de reforço nanoparticulados (assim como o talco), enquanto que as nanofibras e os nanotubos de carbono são exemplos de materiais fibrosos. Em relação as matrizes, podem ser utilizados materiais de origem polimérica, cerâmica ou metálica.

Inúmeras são as possibilidades de produção de nanocompósitos tendo em vista a variedade de matrizes e nanoreforços hoje existentes. Da mesma forma, as áreas de aplicação destes nanocompósitos também é abrangente. Para exemplificar isso, serão relatados a seguir alguns estudos sobre a utilização do nanotalco, do nanotubo de carbono e da nanofibrila de celulose, nanomateriais utilizados no presente estudo em nanocompósitos de diversas matrizes para diversas aplicações.

É relatado que incorporações na faixa de 0,005% de nanotubos de carbono (NTC) de parede múltipla foi possível aumentar a resistência à flexão das argamassas entre 10 e 25% e a resistência à compressão em 19% além de prevenir fissuras e melhorar a durabilidade através de uma melhor resistência a ataque químico (CWIRZEN; HABERMEHL-CWIRZEN;

PENTTALA, 2008; KONSTA-GDOUTOS; METAXA; SHAH, 2010; LI; WANG; ZHAO, 2005; 2007).

Tokarev *et al.* (2017), Gordina *et al.* (2013) e *et al.* (2018) avaliaram as modificações no gesso usando nanotubos de carbono. Matveeva *et al.* (2020) estudaram o efeito do nanomodificador de carbono (HFNCM) na estrutura e propriedades da pedra de gesso.

Em relação à nanofibra de celulose (NFC), Nasir *et al.* (2022) fizeram uma revisão sobre recentes estudos envolvendo a utilização de celulose nanoestruturada (NSC) em matriz cimentícia, e concluíram que os ligantes cimentícios contendo NSC exibiram excelentes propriedades de resistência mecânica tais que uma dosagem de 0,1–0,5% produziu um incremento de 20–106% na resistência à flexão. Da mesma forma, uma dosagem de 0,15%-1% ganha um incremento de 14% a 38% na resistência à compressão.

Nindiyasari *et al.* (2016) avaliaram os impactos mecânicos sofridos com a adição de 1 e 2% de celulose nanofibrilada na matriz de gesso. Bhatnagar e Sain (2005) produziram nanocompósitos de matriz polimérica (acetato de polivinila – PVA) em forma de filmes com NFC como reforço (10% de inserção). Os autores constataram que a resistência à tração dos filmes aumentou de 69 MPa para 118 MPa ao incluírem o nanoreforço e, da mesma forma, houve aumento do módulo de Young na ordem de quatro a cinco vezes, comparado ao PVA puro.

Fonseca (2016) produziu fibrocimentos com a incorporação de fibras e nanofibras de celulose e concluiu que, embora tenha havido aumento na absorção de água, a inclusão de nanofibras proporcionou algumas melhorias nas propriedades mecânicas, em relação ao uso de fibras e ao material sem reforço. Os melhores resultados, no entanto, foram encontrados ao combinar os dois tipos de reforços (fibras e nanofibras) em compósitos híbridos.

Correia e De Souza (2009) fazem um comparativo entre fibras e nanofibras de celulose em matriz de gesso e relatam que, quando desenvolvida uma tecnologia de baixo custo, as nanofibras de celulose serão utilizadas como novas fibras de reforço de altíssima resistência mecânica para esses compósitos, proporcionando-os alta resistência contra a propagação de trincas. Hisseine *et al.* (2019) inseriram nanoestruturas de celulose em uma matriz de cimento e observaram que houve melhoria em todas as propriedades mecânicas testadas em macroescala. A melhoria mais significativa observada foi em baixas concentrações de nanoreforço (0,05 – 0,10%) indicando uma dispersão mais eficiente das fibras na matriz.

Por fim, Savini e Oréfica (2020) estudaram a utilização de baixas concentrações de nanotalco para melhorar principalmente a ductilidade do polietileno de alta densidade (PEAD), e concluíram que o nanotalco empregado em baixa concentração, devido a características nanométricas mais proeminentes e maior área superficial, pode ser utilizado como um enchimento diferenciado e de alto desempenho para melhorar a ductilidade e o equilíbrio rigidez/tenacidade do PEAD.

Leong, Ishak e Ariffin (2004) mostraram em seu estudo, que o talco incrementa a resistência mecânica e resistência ao risco de polipropilenos, sendo que os melhores resultados foram obtidos com talcos mais finamente moídos ou microcristalinos. Já Alves *et al.* (2009) incluíram talco micronizado em matriz de resina epóxi observando redução da viscosidade e retardamento da cura da mistura, além de melhoria no módulo de armazenamento para níveis de reforço de até 3%. Cruz (2008) produziu compósitos com matriz de polipropileno reforçados com talco micronizado de alta razão de forma e baixa razão de forma, a fim de verificar as propriedades reológicas e mecânicas do material. O autor observou boa dispersão das partículas sem presença de aglomerados, e ainda constatou que propriedades como módulo de elasticidade, tensão máxima e tensão na ruptura foram incrementadas com o uso do talco de alta razão de forma.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar da crescente utilização do gesso como material de construção, devido suas inúmeras vantagens quando comparado com o cimento, seu uso ainda é restrito, principalmente por causa da sua baixa resistência mecânica e alta solubilidade em água. A nanotecnologia promete revolucionar os materiais de construção, sendo assim, nanomateriais podem ser utilizados como potenciais reforços para a matriz de gesso.

A alta porosidade e fragilidade apresentada pelo gesso, bem como a forte interação do mesmo com a umidade, são limitadores desta aproximação dos materiais de gesso com os materiais à base de cimento. Nanotubos de carbono, nanotalco e nanofibrilas de celulose são nanomateriais promissores que estão sendo bastante estudados em matriz polimérica e até mesmo em matriz cimentícia, quando bem dispersos ocupam os espaços vazios da matriz, preenchendo-a e, conseqüentemente, melhorando as propriedades mecânicas e físicas.

Além disso, a utilização da nanotecnologia não cessa o leque de propriedades possíveis de serem obtidas pela combinação dos materiais usados. O estudo de novos materiais à base de gesso utilizando nanomateriais como reforço, vem agregar às pesquisas relacionadas à nanotecnologia na construção civil.

Portanto, ressalta-se a importância deste estudo em relação ao uso de nanomateriais na matriz de gesso, que foi pouca estudada, sendo que ainda não existem resultados suficientes que possam demonstrar os efeitos da incorporação de nanotubos de carbono, nanofibrilas de celulose e nanotalco nas propriedades físicas e mecânicas de matrizes de gesso, sendo necessário um maior aprofundamento acerca da junção desses materiais.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13207**. Gesso para construção civil - Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.
- ABREU, E. M. X. **Estudo da influência de diferentes gessos produzidos na região nordeste do Brasil para fabricação de moldes utilizados na indústria de louças sanitárias**. 2005. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, 2005.
- ALMEIDA, K. S. de; SOARES, R. A. L.; MATOS, J. M. E. de. Efeito de resíduos de gesso e de granito em produtos da indústria de cerâmica vermelha: revisão bibliográfica. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, 2020.
- ALVES, C. F. *et al.* Micronized talc-epoxy resin composites. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED MATERIALS*, 11., 2009, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ICAM, 2009.
- ANANDHARAMAKRISHNAN, C. Trends and Impact of Nanotechnology in Agro-Food Sector. Ref. Modul. Food Sci. 2020.
- ANGELERI, F. B.; CARDOSO, S. R.; SANTOS, P. S. As gipsitas brasileiras e sua aplicação com gesso na indústria cerâmica. Descrição dos métodos utilizados para seu estudo e caracterização. Parte I: Ensaios Químicos. **Cerâmica**, [S.l.], v. 28, n. 156, p. 471–479, 1982.
- ANGERELI, F. B.; COSTA, J. E. P. Alguns característicos de gessos nacionais. Considerações sobre o gesso hemi-hidrato alfa. **Cerâmica**, v. 5, p. 10–11, 1956.
- ANTUNES, S. I. M. **Micronização Supercrítica do β - Caroteno**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biológica) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007. 90 p.
- ATEWI, Y.R.; HASAN, M.F.; GÜNEYISI, E. Fracture and permeability properties of glass fiber reinforced self-compacting concrete with and without nanosilica. **Constr Build Mater**, [S.l.], v. 226, p. 993–1005, 2019.
- BAIG, N. *et al.* **Nanomaterials**: A review of synthesis, properties, recent progress, and challenges. *Materials Advances*. March. 2021.
- BALTAR, C. A. M.; BASTOS, F. F.; BORGES, L. E. P. Variedades mineralógicas e processos utilizados na produção dos diferentes tipos de gesso. *In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA*, [S.n.], 2004, Florianópolis. **Anais [...]** Florianópolis, 2004. p. 769–776.
- BARBOSA, A. A.; FERRAZ, A. V.; SANTOS, G. A. Caracterização química, mecânica e morfológica do gesso obtido do pólo do Araripe. **Cerâmica**, [S.l.], v. 60, n. 356, p. 501–508, dez. 2014.

- BARBOSA, W. P.; VANDERLEI, R. D; CALLEFI; M. H. B. M.; SAKUNO, F. S.; BARBOSA, L. P., CAPELIN, L. J. A Nanotecnologia na construção civil e suas influências. *In: ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA*, 10., 2017, Campinas. **Anais** [...] Campinas, Galoá, 24 a 26 de outubro de 2017.
- BELL, M. S. *et al.* Carbon nanotubes by plasma-enhanced chemical vapor deposition. **Pure and Applied Chemistry**, [S.l.], v. 78, n. 6, p. 1117–1125, 1 jan. 2006.
- BERGNA, H. E.; ROBERTS, W. O. **Colloidal silica: fundamentals and applications**. [S.l.]: Boca Raton, FL: CRC Taylor & Francis, 2006.
- BHATNAGAR, A.; SAIN, M. Processing of Cellulose Nanofiber-reinforced Composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, [S.l.], v. 24, n. 12, p. 1259–1268, 18 ago. 2005.
- BOURMAUD A.; BEAUGRAND, J.; SHAH D.U.; PLACET, V.; BALEY, C. Towards the design of highperformance plant fibre composites. **Prog. Mater. Sci.**, [S.l.], v. 97, p. 347–408, 2018.
- BRAIEK, A. *et al.* Estimation of the thermophysical properties of date palm fibers/gypsum composite for use as insulating materials in building. **Energy and Buildings**, [S.l.], v. 140, p. 268–279, 2017.
- CALLISTER JUNIOR, W. D. RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. New York: J. Wiley, 192 p., 2016.
- CAMARA, A. L. da. **Uso de talco nacional como aditivo adsorvente de piches e materiais pegajosos no processo de fabricação do papel**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, 2003.
- CARPENTER, A.W.; LANNON, D.; WIESNER, M.R. Cellulose nanomaterials in water treatment technologies. **Environ Sci Technol.**, [S.l.], v. 49, p. 5277–5287, 2015.
- CHERIAN, B. M. *et al.* A Novel Method for the Synthesis of Cellulose Nanofibril Whiskers from Banana Fibers and Characterization. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [S.l.], v. 56, n. 14, p. 5617–5627, jul. 2008.
- CINCOTTO, M.; AGOPYAN, V.; FLORINDO, M. **O gesso como material de construção - composição química (1a parte)**. São Paulo: Pine, 1988.
- CORREIA, C. de M. P.; DE SOUZA, M. F. Mechanical strength and thermal conductivity of low-porosity gypsum plates. **Materials Research**, [S.l.]. v. 12, n. 1, p. 95–99, 2009.
- CRUZ, M. C. DA. **Avaliação do comportamento reológico e propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno contendo partículas de talco obtidas por diferentes rotas de processamento**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

CWIRZEN, A.; HABERMEHL-CWIRZEN, K.; PENTTALA, V. Surface decoration of carbon nanotubes and mechanical properties of cement/carbon nanotube composites.

Advances in Cement Research, [S.l.], v. 20, n. 2, p. 65–73, abr. 2008.

DAHLAN, A.S. Smart and Functional Materials Based Nanomaterials in Construction Styles in NanoArchitecture. **Silicon**, [S.l.], v. 11, n. 4, p. 1949-1953, 2019.

DELRÍO-MERINO, M.; VIDALES-BARRIGUETE, A.; RAMÍREZ, C. P.; VITIELLO, V.; CRUZ-ASTORQUIJAIME, S.; CASTELLUCCIO, R. A review of the research about gypsum mortars with waste aggregates. **Journal of Building Engineering**, [S.l.], v. 45, January. 2022.

DEREVIANKO, V.; KONDRATIEVA, N.; HRYSHKO, H. Study of impact factors and the mechanism of gypsum binder hydration process in the presence of nanomodifiers. **French-Ukrainian Journal of Chemistry**, [S.l.], v. 6, n. 1, p. 92–100, 2018.

DÍAZ-SOLER, B. M.; MARTÍNEZ-AIRES, M. D.; LÓPEZ-ALONSO, M. Emerging risk in the construction industry: Recommendations for managing exposure to nanomaterials. **DYNA**, [S.l.], v. 83, n. 196, p. 48–54, 20 abr. 2016.

DURÁN, N. *et al.* A Minireview of Cellulose Nanocrystals and its Potential Integration as Co-Product In Bioethanol Production. **Journal of the Chilean Chemical Society**, [S.l.], v. 56, n. 2, p. 672–677, 2011.

EIRES, R.; CAMÕES, A.; JALALI, S. New Eco-Friendly Gypsum Materials for Civil Construction. **Materials Science Forum**, [S.l.], v. 587–588, p. 908–912, jun. 2008.

FARZADNIA, N. *et al.* Characterization of high strength mortars with nano Titania at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 43, p. 469–479, jun. 2013.

FERREIRA, H. S.; RANGEL, M. do C. Nanotecnologia: aspectos gerais e potencial de aplicação em catálise. **Química Nova**, [S.l.], v. 32, n. 7, p. 1860–1870, 2009.

FLORES-COLEN, I.; SOARES, A.; BRITO, J. de. A nanotecnologia aplicada às argamassas de revestimento. **Revista internacional**, [S.l.], v. 11, n. 34, p. 42–51, 2013.

FONSECA, C. S. **Desempenho de fibrocimentos extrudados produzidos com fibras e nanofibras de juta**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Biomateriais) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

GARTNER, E. M. Cohesion and expansion in polycrystalline solids formed by hydration reactions — The case of gypsum plasters. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], v. 39, n. 4, p. 289–295, 1 abr. 2009.

GENCEL, O. *et al.* Properties of gypsum composites containing vermiculite and polypropylene fibers: Numerical and experimental results. **Energy and Buildings**, [S.l.], v. 70, p. 135–144, fev. 2014.

GONÇALVES, M. C. Nanomateriais. *In*: GONÇALVES, M. C.; MARGARIDO, F. (Eds.). **Ciência e Engenharia de Materiais de Construção**. 1. ed. [S.l.]: IST Press, 2012. p. 727–771.

GOPI, S.; BALAKRISHNAN, P.; CHANDRADHARA, D.; POOVATHANKANDY, D.; THOMAS, S. General scenarios of cellulose and its use in the biomedical field. *Mater. Today Chem.*, [S.l.], v. 13, p. 59–78, 2019.

GORDINA, A.F.; TOKAREV, J.U.V.; JAKOVLEV, G.I.; KERENE, J.A.; SYCHUGOV, S.V.; ALI, E.L.; SAYED, M.. Evaluation of the Influence of Ultradisperse Dust and Carbon Nanostructures on the Structure and Properties of Gypsum Binders. **Procedia Engineering**, [S.l.], v. 57, p. 334-342. 2013.

GUAN, L. *et al.* Single-walled carbon nanotube fibers, films and balls. **Solid State Communicatons**, [S.l.], v. 141, p. 459, 2007.

GUISBIERS, G.; MEJÍA-ROSALES, S.; DEEPAK, F.L. Nanomaterial properties: Size and shape dependencies. *J. Nanomater*, [S.l.], [S.v.], p. 180-976, 2012.

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**, [S.l.], v. 206, p. 84–96, 10 maio 2019.

HUBBE, M. A. *et al.* Consequences of the nanoporosity of cellulosic fibers on their streaming potential and their interactions with cationic polyelectrolytes. **Cellulose**, [S.l.], v. 14, n. 6, p. 655–671, 30 out. 2007.

HUBBE, M. A. *et al.* Cellulosic nanocomposites: A review. **BioResources**, [S.l.], v. 3, n. 3, p. 929–980, 2008.

IJIMA, S. Helical microtubes of graphitic carbon. **Nature**, [S.l.], n. 254, p. 56–58, 1991.

IUCOLANO, F. *et al.* Mechanical behavior of plaster reinforced with abaca fibers. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 99, p. 184–191, 2015.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V.; PRADO, T. de A. Durabilidade de compósitos de cimentos e fibras vegetais. *In*: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE DURABILIDADE DE MATERIAIS, COMPONENTES E ESTRUTURAS 1997, [S.n.], São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Abge, 1997.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. **Gesso na construção civil**. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. *In*: ISAIA G. C. (Ed.). São Paulo: IBRACON, 2007. V. 2. Cap. 22. p. 627.

JOSHI, J. T. A Review on Micronization Techniques. **Journal of Pharmaceutical Science and Technology**, [S.l.], v. 3, n. 7, p. 651–681, 2011.

KAMARULZAMAN, N.A.; LEE, K.E.; SIOW, K.S.; MOKHTAR, M. Public benefit and risk 35 perceptions of nanotechnology development: Psychological and sociological aspects. **Technol. Soc.**, [S.l.], v. 62, p. 101-329, 2020.

KANG, I. *et al.* Introduction to carbon nanotube and nanofiber smart materials. **Composites Part B: Engineering**, [S.l.], v. 37, n. 6, p. 382–394, jan. 2006.

KARNI, J.; KARNI, E. Gypsum in construction: origin and properties. **Materials and Structures**, [S.l.], v. 28, n. 2, p. 92–100, mar. 1995.

KAUSHIK, A.; SINGH, M. Isolation and characterization of cellulose nanofibrils from wheat straw using steam explosion coupled with high shear homogenization. **Carbohydrate Research**, [S.l.], v. 346, n. 1, p. 76–85, jan. 2011.

KHARE, S.; WILLIAMS, K.; GOKULAN, K. Nanotechnology. *In: Encyclopedia of Food Microbiology*. Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2014. p. 893–900

KLOPROGGE, J. T.; FROST, R. L. Raman microscopy at 77K of natural gypsum $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. **Journal of Materials Science Letters**, [S.l.], v. 19, p. 229–231, 2000.

KONSTA-GDOUTOS, M. S.; METAXA, Z. S.; SHAH, S. P. Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], v. 40, n. 7, p. 1052–1059, jul. 2010.

KROTO, W. H. *et al.* C_{60} : Buckminsterfullerene. **Nature**, [S.l.], n. 318, p. 162, 1985.

KUMAR, R.; SHARMA, R.K.; SINGH, A.P. Grafted cellulose: a bio-based polymer for durable applications. **Polym. Bull.**, [S.l.], v. 75, p. 2213–2242, 2018.

LEONG, Y. W.; ISHAK, Z. A. M.; ARIFFIN, A. Mechanical and thermal properties of talc and calcium carbonate filled polypropylene hybrid composites. **Journal of Applied Polymer Science**, [S.l.], v. 91, n. 5, p. 3327–3336, 5 mar. 2004.

LI, J. I. *et al.* Effect of nano-silica and silicone oil paraffin emulsion composite waterproofing agent on the water resistance of flue gas desulfurization gypsum, **Construction and Building Materials**, v. 287, n. 123, p. 55, 2021.

LI, Y.; CAO, L.; LI, L.; YANG, C. In situ growing directional spindle TiO_2 nanocrystals on cellulose fibers for enhanced Pb^{2+} adsorption from water. **J. Hazard. Mater.**, [S.l.], v. 289, p. 140–148. 2015.

LI, G. Y.; WANG, P. M.; ZHAO, X. Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites. **Cement and Concrete Composites**, [S.l.], v. 29, n. 5, p. 377–382, maio 2007.

LI, G. Y.; WANG, P. M.; ZHAO, X. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. **Carbon**, [S.l.], v. 43, n. 6, p. 1239–1245, maio 2005.

LIU, B. *et al.* Metal-Catalyst-Free Growth of Single-Walled Carbon Nanotubes. **Journal of the American Chemical Society**, [S.l.], v. 131, n. 6, p. 2082–2083, 18 fev. 2009.

LONDE, T. M.; FINZER, J. R. D. Micronização em moinho com jato de ar em espiral. *In*: POISSON, E. (Ed.). **Engenharia no Século XXI**. [S.l.]: Poisson, 2020. V. 13.

MAKGABUT, L. *et al.* Green synthesis of carbon nanotubes to address the waterenergy-food nexus: A critical review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [S.l.], v. 9, n. 1, p. 104-736, February 2021.

MALHOTRA, B.D.; ALI, M.A. **Nanomaterials in Biosensors**. Nanomater: Biosens, 2018. p. 1–74.

MATVEEVA, L.; YU; LETENKO, D.G.; MOKROVA, M.V. Influence of Carbon Nanomodifier on the Structure and Properties of the Modified Gypsum Binder. **Materials Science Forum**, [S.l.], v. 992, p. 233-237, May. 2020.

MAYNARD, A. D. **Nanotechnology: A Research Strategy for Addressing Risk**. Washington, DC: Project on Emerging Nanotechnologies. Woodrow Wilson International Center for Scholars, 2003.

MELO, D. de C. P. de. **Processo de calcinação da gipsita/resíduo em um forno rotativo contínuo para a produção de gesso beta reciclável**. 2012. 155 p.Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Pernambuco, CTG, 2012.

MENEZES, R.; POVOAS, Y. Influência de aditivo retardador de pega na reciclagem da pasta de gesso utilizada como revestimento interno de parede. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, [S.l.], v. 2, n. 1, 8 nov. 2016.

MILLER, S. G. *et al.* Characterization of epoxy functionalized graphite nanoparticles and the physical properties of epoxy matrix nanocomposites. **Composites Science and Technology**, [S.l.], v. 70, n. 7, p. 1120–1125, jul. 2010.

MINEROPAR. Minerais do Paraná S. A. Consumo mineral na indústria de transformação. Curitiba-PR, 1988. p.307-322.

MIYATA, Y.; MIZUNO, K.; KATAURA, H. Purity and Defect Characterization of Single-Wall Carbon Nanotubes Using Raman Spectroscopy. **Journal of Nanomaterials**, [S.l.], v. 2011, p. 1–7, 2011.

MORGADO, G. *et al.* Kinetics of plaster hydration and structure of gypsum: Experiments and kinetic Monte Carlo simulations with added gypsum seeds. **Journal of Crystal Growth**, [S.l.], v. 507, n. November 2018, p. 124–133, fev. 2019.

NASIR, M.; MUHAMMAD, A. A.; MUKARRAM, Z.; NOMAN, A.; TAG, N.; HUSSEIN, M. K.A.; MOHAMMAD, S.M.; WALID AL-KUTTI, MAMDOUH, A. Engineered cellulose nanocrystals-based cement mortar from office paper waste: Flow, strength, microstructure, and thermal properties, **Journal of Building Engineering**, [S.l.], v. 51, 2022.

NATH, D.; BANERJEE, P. Green nanotechnology—a new hope for medical biology. **Environ Toxicol Pharmacol.**, [S.l.], v. 36, p. 997–1013, 2013.

NINDIYASARI, F. *et al.* "Characterization and mechanical properties investigation of the cellulose/gypsum composite". **Journal of Composite Materials**, Lancaster, v. 50, n. 5, p. 657-672, 2016.

NOLASCO, L.G. **Regulamentação jurídica da nanotecnologia**. 2016. 192 p. Tese (Doutorado em Biotecnologia e Biodiversidade) – Universidade Federal de Goiás Goiânia, 2016.

OLIVEIRA, M. P. de *et al.* Compósitos à base de gesso com resíduos de EVA e vermiculita. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.l.], v. 16, n. 6, p. 684–689, jun. 2012.

PAYGHAN SUNIL, J.; SURAJ, K. W.; SURAJ, V. G.; SHUBHAM, R. K.; DILIP, M. G A Review on Enhancing the Water Resistance Property of Gypsum. **International Journal of Research in Engineering, Science and Management**, [S.l.], v. 2, n. 5, May-2019.

PEIXOTO, L. de S. **Preparação de compósitos e nanocompósitos poliméricos in situ**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

PEREIRA, G. C. **Nanocompósitos híbridos modificados com nanotubo de carbono: síntese e caracterização**. 2013. 78 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Mecânica. Belo Horizonte, 2013.

PERES, L.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V. A. **O Gesso: Produção e Utilização na Construção Civil**. Recife: Bagaço, 2001. 156 p.

PHANTHONG, P.; REUBROYCHAROEN, P.; HAO, X.; XU, G.; ABUDULA, A.; GUAN, G. Nanocellulose: extraction and application. **Carbon Resour. Convers.**, 1, 32–43. (2018).

PISARENKO, Z.H.V.; IVANOV, L.A; WANG, Q. Nanotechnology in Construction: State of the Art and Future Trends. **Nanotechnologies in Construction**, [S.l.], v. 12, n. 4, p. 223–231, 2020.

PINTO, N. A. *et al.* Avaliação de matriz de gesso com incorporação de borracha de pneus para utilização na construção civil. **Revista Tecnológica**, [S.l.], v. 25, n. 1, p. 103-117, 2016.

PRACHIBEN, P.; EMMANUEL, O.; MEKONNEN, TI. Trends in Advanced Functional Material Applications of Nanocellulose. **Processes**, [S.l.], v. 7, n. 10, 2019.

PUGSLEY JR, R. O. *et al.* **Talco: noções básicas e aplicações industriais**. Ponta Grossa: Itaiacoca S.A. Mineração Indústria e Comércio, 1990.

RAJAK, D.K. *et al.* **Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications**. [S.l.]: Polymers, 2019.

REED, J. S. **Introduction to the principle of ceramics processing**. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 1998.

SALVADOR, I. F. P. E; ALMEIDA, L. M. de. Talco. *In*: LUZ, A. B. da; LINS, F. A. F. (Eds.). **Rochas e minerais industriais: Usos e especificações**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 2008. p. 793–816.

ROCO, M. C.; BAINBRIDGE, W. S. **Overview Converging Technologies for Improving Human Performance. Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science (NBIC), NSF/DOC-sponsored Report**. Arlington, Virginia: National Science Foundation, 2002.

SALEEM, H.; SYED, J. A.; NASSER, A.A. Recent Advancements in the Nanomaterial Application in Concrete and Its Ecological Impact. **Materials**, [S.l.], v. 14, p. 63-87, 2021.

SANTOS, L. M. dos. **Obtenção de nanocompósitos magnéticos de Fe₃O₄- talco sintético com matrizes poliuretânicas base solvente e base água**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2017.

SANTOS, V. A.; VASCONCELOS, E. C.; PINTO, F. G. Determinação do Teor de Semihidrato em Gessos a partir de Variação na Temperatura de Re-hidratação. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE GIPSITA, 4., 1997, Recife. **Anais [...]**. Recife: Universitária - UFPE, v. 1, p. 55–60, 1997.

SATYAMURTHY, P. *et al.* Preparation and characterization of cellulose nanowhiskers from cotton fibres by controlled microbial hydrolysis. **Carbohydrate Polymers**, [S.l.], v. 83, n. 1, p. 122–129, jan. 2011.

SAVINI, G.; ORÉFICE, R.L. Comparative study of HDPE composites reinforced with microtalco and nanotalcos: high performance filler for improving ductility at low concentration levels. *Journal of Materials Research and Technology* Volume 9, Issue 6, November–December 2020, Pages 16387-16398

SENFF, L. *et al.* Formulation of mortars with nano-SiO₂ and nano-TiO₂ for degradation of pollutants in buildings. **Composites Part B: Engineering**, [S.l.], v. 44, n. 1, p. 40–47, jan. 2013.

SERNA, A. *et al.* Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 35, p. 633–641, out. 2012.

SERP, P.; CORRIAS, M.; KALCK, P. Carbon nanotubes and nanofibers in catalysis. *Applied Catalysis A. General*, [S.l.], v. 253, n. 2, p. 337–358, 28 out. 2003.

SILVA, L. Material compósito à base de gesso reforçado com fibras: caracterização mecânica. **Engenharia Civil**, Universidade do Minho, n. 49, 2014.

SIRÓ, I.; PLACKETT, D. Microfibrillated cellulose and new nanocomposite materials: a review. **Cellulose**, [S.l.], v. 17, n. 3, p. 459–494, 21 jun. 2010.

TAWFIK, T.A.; METWALLY, K.A.; EL-BESHLAWY, S.A.; AL SAFFAR, D. M.; TAYEH, B. A.; HASSAN, H. S. Exploitation of the nanowaste ceramic incorporated with nano silica to improve concrete properties, **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, [S.l.], [S.v.], [S.n.], 2020.

THAKKAR, M.S.; KAUSHIK, N.; SNEHIT, S.; MHATREMSRASESH, Y. Biological synthesis of metallic nanoparticles. **Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine**, [S.l.], v. 6, n. 2, p. 257-262, April. 2010.

TIBOLLA, H. **Produção de nanofibras de celulose por hidrólise enzimática**. 2014. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia de Alimentos, 2014.

TOKAREV, Y. *et al.* Modification of Gypsum Binders by Using Carbon Nanotubes and Mineral Additives. **Procedia Engineering**, [S.l.], v. 172, p. 1161–1168, 2017.

TRACHE, D.; TARCHOUN, A.F.; DERRADJI, M. *et al.* Nanocellulose: From Fundamentals to Advanced Applications Front. **Chem.**, [S.l.], [S.v.], [S.n.], 06 May. 2020.

TWARDOWSKI, T. E. **Introduction to Nanocomposite Materials: Properties, Processing, Characterization**. 1. ed. Philadelphia: DEStech Publications, Inc, 2007.

VILLELA, L. S. *et al.* Desempenho físico-mecânico de compósitos à base de gesso reforçados com embalagens multicamadas trituradas. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 3, 2020.

WEBER, A. M.; CECHIN, L.; TOKARSKI, R. B. Análise da influência do traço nas propriedades do compósito cimento-madeira. **Revista Principia**, [S.l.], v. 1, n. 36, p. 50–59, 2017.

WELLENKAMP, F. J. **Moagens Fina e Ultrafina de Minerais Industriais: uma revisão**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 1999.

YANG, J.; DENG, S.; XU, H.; ZHAO, Y.; NIE, C.; HE, Y. Investigation and practical application of silica nanoparticles composite underwater repairing materials. **Energies**, [S.l.], v. 14. n. 202, 2021.

ZHENG, L.; XIONG, T.; SHAH, K.W.; Transparent nanomaterial-based Solar Cool Coatings: Synthesis, Morphologies And Applications. **Solar Energy**, [S.l.], v. 193, p. 837–858, 2019.

ZHU, W.; BARTOS, P. J. M.; PORRO, A. Application of nanotechnology in construction. Summary of a state-of-the-art report. **Materials and Structures**, [S.l.], v. 37, n. 273, p. 649–658, 17 set. 2004.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS*

ARTIGO 1 - INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO GESSO DE CONSTRUÇÃO USANDO NANOTUBOS DE CARBONO

RESUMO

O gesso, um material de construção civil, largamente utilizado, possui ótimas propriedades térmicas e acústicas, resistência ao fogo, endurecimento rápido e excelente acabamento superficial quando comparado ao cimento. Entretanto, este material ainda apresenta uma série de limitações, como alta permeabilidade à água, natureza porosa, baixa resistência à compressão, baixa resistência à flexão e tração. Nesse contexto, há poucas pesquisas sobre a influência de nanossistemas nas propriedades do ligante de gesso, sendo os nanotubos de carbono (NTC) um dos mais estudados, visto que estes podem melhorar a compactidade produzindo compósitos mais densos, preenchendo os vazios da matriz. A fim de avaliar a influência de NTC na matriz de gesso foram produzidos corpos de prova de tamanho 4 x 4 x 16 cm, as proporções utilizadas para a incorporação dos nanotubos foram de 0%, 0,001%, 0,002%, 0,003% e 0,004% em substituição a massa gesso. A relação água/gesso utilizada foi 0,6 %. Os nanocompósitos produzidos com nanotubos de carbono diminuíram a absorção de água e aumentaram a densidade aparente à medida que se incorporava MWCNT na matriz de gesso. Para os ensaios mecânicos, as resistências à flexão e compressão aumentaram em até 12,74 % e 26,4 % respectivamente, quando comparado com a testemunha.

Palavras-chave: Nanotecnologia. Nanomateriais. Nanotubos de carbono de paredes múltiplas.

INFLUENCE ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BUILDING PLASTER USING CARBON NANOTUBES

ABSTRACT

Plaster, a widely used civil construction material, has excellent thermal and acoustic properties, fire resistance, fast hardening and excellent surface finish when compared to cement, however, this material still has a number of limitations, such as high permeability to water, porous nature, low compressive strength, low flexural and tensile strength. In this context, there is little research on the influence of nanosystems on the properties of the gypsum binder, with carbon nanotubes (CNT) being one of the most studied, since they can improve compactness by producing denser composites, filling the voids in the matrix. In order to evaluate the influence of NTC in the plaster matrix, specimens of size 4 x 4 x 16 cm were produced, the proportions used for the incorporation of the nanotubes were 0%, 0.001%, 0.002%, 0.003% and 0.004% in place of plaster mass. The water/gypsum ratio used was 0.6%. Nanocomposites produced with carbon nanotubes decreased water absorption and increased apparent density as MWCNT was incorporated into the gypsum matrix. For the mechanical tests, the flexural and compressive strengths increased by up to 12.74% and 26.4%, respectively, when compared to the control.

Keywords: Nanotechnology. Nanomaterials. Multi-walled carbon nanotubes.

1 INTRODUÇÃO

O gesso, segundo Del Río-Merino *et al.* (2022) é um material utilizado na construção civil desde sempre, devido suas excelentes propriedades térmicas e acústicas, pela sua capacidade de ser moldado e endurecer rapidamente, dentre outras vantagens, principalmente quando comparado ao cimento. No entanto, este material apresenta limitações devido sua baixa resistência mecânica, falta de tenacidade ou sua fragilidade e também tem um desempenho ruim contra a água e se degrada muito rapidamente.

A baixa resistência mecânica e à água, são explicadas principalmente pela alta solubilidade do sulfato de cálcio e pela grande quantidade de microporos que são formados quando ocorre a cristalização e endurecimento da pasta de gesso, sendo que a quantidade destes microporos são em torno de 50 a 60% do seu volume, e a maioria destes poros apresentam tamanho entre 0,3-1,0 μm , onde as forças de sucção capilar estão ativas (PAYGHAN *et al.*, 2019).

As propriedades dos materiais de gesso são amplamente determinadas pela estrutura da matriz sendo que aditivos introduzidos na matriz de gesso afetam a hidratação, tamanho e morfologia dos cristais de gesso, o estado da interface e a porosidade geral, como resultado, é possível fabricar ligantes de gesso com maior resistência mecânica e à água (KONDRATIEVA *et al.*, 2020).

A nanotecnologia é um campo em imenso desenvolvimento devido a sua extensa gama de aplicações em diferentes áreas da ciência e tecnologia. Dentre os setores que se mostram promissores, o campo tecnológico da construção civil vem se consolidando na esfera global como área importante do desenvolvimento da nanotecnologia, visto que produtos contendo nanomateriais incorporados apresentam melhores propriedades físicas, mecânicas, elétricas, térmicas, dentre outras propriedades, do que quando comparados com os mesmos produtos sem nanoaditivos (BARBOSA *et al.*, 2017; ZHOU *et al.*, 2020).

Li *et al.* (2021) estudaram a influência da nano-sílica e emulsão de parafina de óleo de silicone misturado com gesso de dessulfurização de gases de combustão (FGD) e sua resistência à água, sendo que a nano-sílica preencheu os poros da matriz de gesso reduzindo a porosidade entre os cristais de gesso.

Segundo Tokarev *et al.* (2017), há poucas pesquisas sobre a influência de nanossistemas nas propriedades do ligante de gesso, sendo os nanotubos de carbono (NTCs) um dos mais estudados, visto que estes podem melhorar a compacidade produzindo compósitos mais densos, preenchendo os vazios que existem entre os produtos de hidratação. Estes autores estudaram a incorporação de nanotubos de carbono (NTC) em matriz de gesso com aditivos variados. Os autores constataram que a inserção do nano reforço em teores de 0,001-0,003% provocou melhorias nas propriedades mecânicas do gesso.

Derevianko, Kondratieva e Hryshko (2018) também trabalharam com a inclusão de NTC como reforço em gesso, sendo observada melhoria no processo de hidratação do sulfato de cálcio dihidratado que, como consequência, provocou melhorias nas propriedades físicas e mecânicas da matriz (0,18% de NTC resultaram em aumento da resistência à compressão em até 30%). Apesar da realização de tais estudos, percebe-se ainda que não existem resultados suficientes que possam demonstrar os efeitos da incorporação de nanotubos de carbono (NTCs) nas propriedades físicas e mecânicas de matrizes de gesso, sendo que estudos nessa área ainda são raros.

Diante do crescente uso do gesso na construção civil e com o intuito de melhorar sua resistência a ação da água e resistência mecânica para poder torná-lo um material ainda mais utilizado, o presente artigo tem como objetivo estudar a incorporação de NTC na matriz de gesso, avaliando sua influência na resistência à flexão, compressão, densidade aparente e absorção de água.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

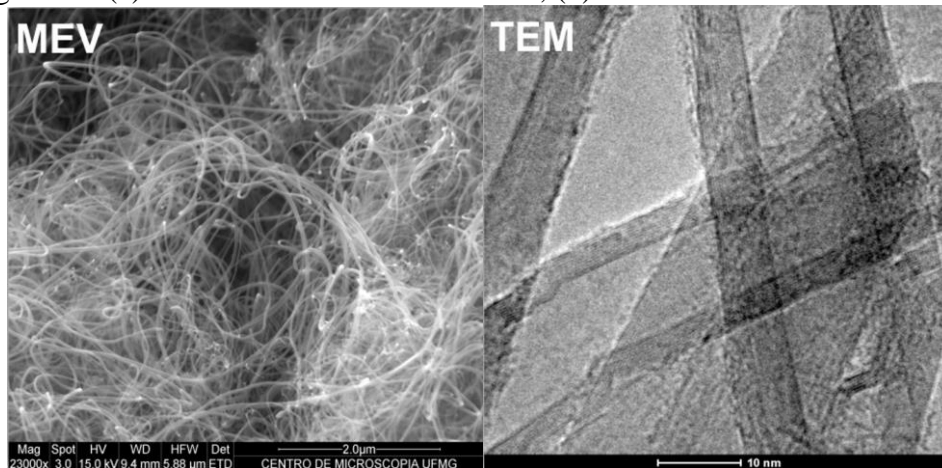
2.1 Obtenção e preparação do material

Foi utilizado como matriz para produção dos compósitos, gesso fino para fundição proveniente do polo gesseiro do Araripe, no estado de Pernambuco-Br. Esse material apresentou como características massa específica aparente de 781 kg/m³, módulo de finura de 0,85.

Como reforço utilizou-se nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT) de fabricação nacional (Brasil), adquiridos do CTNano (Centro de Tecnologia em nanotubos de carbono e grafeno).

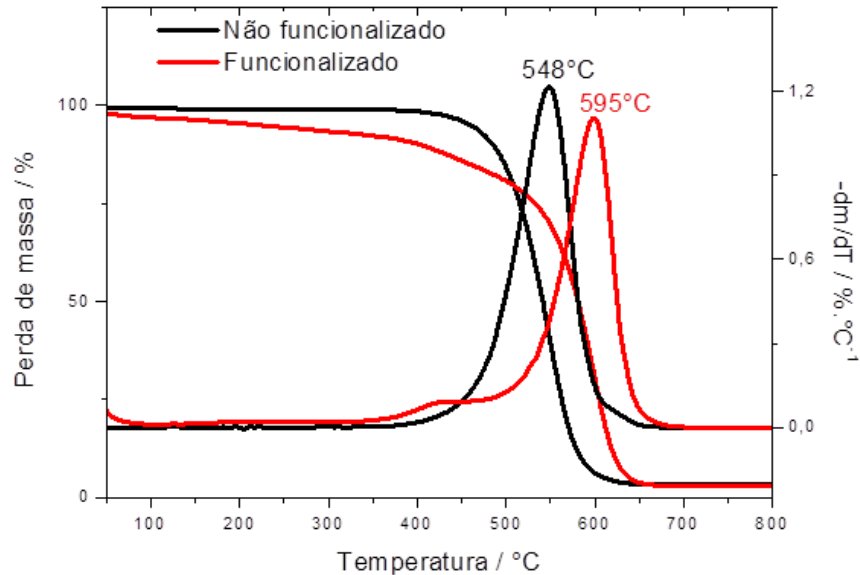
Os MWCNT foram produzidos via processo de deposição química da fase vapor (CVD), na análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV), (FIGURA 1a) foi possível determinar o comprimento dos nanotubos, estando na faixa de 0,5 a 15 μm , tendo uma média de 4,5 μm . A partir da análise por microscopia eletrônica de transmissão (TEM) (FIGURA 1b) foi possível determinar o diâmetro externo dos nanotubos que está entre 8 e 45 nm, tendo uma média de 20 nm. O grau de funcionalização foi determinado por análise termogravimétrica (FIGURA 2) sendo $\sim 9\%$ em massa visto que a perda de massa em temperaturas moderadas (entre 120 e 400 $^{\circ}\text{C}$) é atribuída aos grupos funcionais presentes.

Figura 1 – (a) MEV da amostra de MWCNT; (b) TEM da amostra de MWCNT.



Fonte: Da autora (2022).

Figura 2 - Análise termogravimétrica dos NTC antes e após funcionalização. Medidas realizadas em atmosfera de ar sintético, com razão de aquecimento de 5 °C/min.



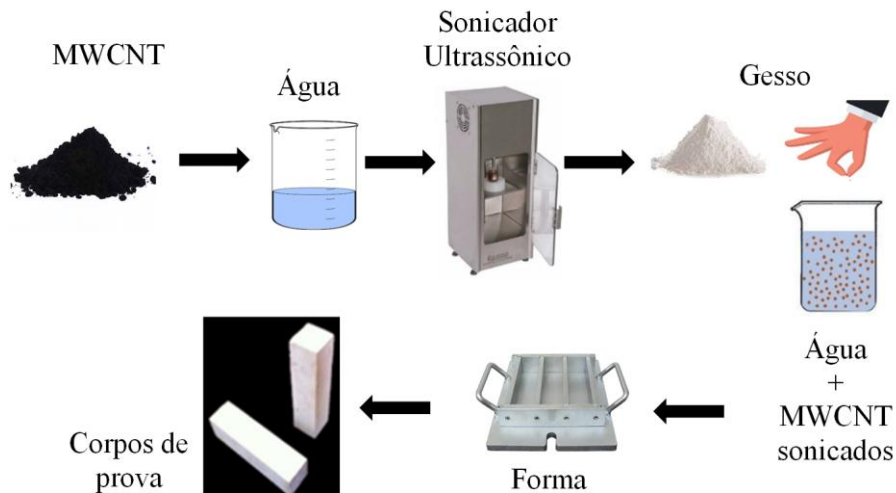
Fonte: Da autora (2022).

2.2 Produção dos compósitos

A relação água/gesso (a/g) utilizada foi de 0,6, sendo esse valor escolhido por ser uma relação a/g que garante boa trabalhabilidade da pasta de gesso e ter sido utilizado em trabalhos semelhantes como o de Gordina *et al.* (2017) e Pervyshin *et al.* (2017), que também utilizaram este fator ao estudar a incorporação de MWCNT na matriz de gesso. Este trabalho apresenta como variável de estudo, os diferentes teores de MWCNT, sendo eles 0 %, 0,001 %, 0,002 %, 0,003 % e 0,004 % em relação à massa de gesso sendo que estes foram escolhidos de modo a abranger a faixa mais estudadas sobre NTCs adicionados em matrizes de gesso (PERVYSHIN *et al.*, 2017; GORDINA *et al.*, 2013; TOKAREV *et al.*, 2017). A composição das amostras estudadas é dada na Tabela 2. A produção dos corpos de prova seguiu o esquema apresentado na Figura 3, sendo que para cada tratamento, cada porcentagem estudada de MWCNT foi sonicada com a água de cada traço por 30 minutos utilizando um sonicador de Ponteira Ultrassônico Eco- Sonics / Utronique (750 W) com 75% da pressão máxima do aparelho. Posteriormente, o gesso foi polvilhado nesta mistura sonicada, sendo misturado manualmente dentro de 2-2,5 minutos, logo após foi moldado em formas de

tamanho 40 x 40 x 160 mm, conforme especificações da EN 13279-2 (EUROPEAN STANDARDS, 2006).

Figura 3 - Esquema representativo da produção dos corpos de prova de gesso com MWCNT.



Fonte: Da autora (2022).

Tabela 1 - Composição das amostras.

Composição das amostras	Amostra Referência	Amostras com MWCNT			
Componentes					
Gesso (%)	100	99,999	99,998	99,997	99,996
MWCNT (%)	0	0,001	0,002	0,003	0,004
Relação Água/Gesso (%)	60	60			

Fonte: Da autora (2022).

Foram produzidos 6 corpos de prova para cada tratamento. Após o período de 24 horas, foram retirados dos moldes e colocados em local livre da ação de intempéries à temperatura de 20 °C durante 28 dias em condições normais de umidade para posterior realização dos ensaios.

2.3 Avaliação das propriedades físicas e mecânicas

Para a determinação da massa específica seguiu-se a NM 23 (AMN, 2000), para determinar a absorção de água por imersão seguiu-se a EN 520 (2009) – absorção de água após 2 horas.

Para a obtenção das resistências mecânicas dos corpos de prova foram realizados ensaios de flexão e compressão em máquina universal de ensaios de acordo com a norma UE

13279-2 (EN, 2008). Para o ensaio de flexão, os corpos de prova apresentavam dimensões de 40 x 40 x 160 mm, a distância entre os apoios da máquina foi de 100 mm e a carga foi aplicada no centro dos mesmos até a ruptura. Já para o ensaio de compressão, as dimensões dos corpos de prova foram de 40 x 40 x 40 mm sendo, também, a carga aplicada até sua ruptura. A partir desses ensaios foi determinada a resistência de ruptura à flexão e a resistência à compressão dos corpos de prova.

2.4 Avaliação microestrutural

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada para caracterizar a superfície de ruptura dos corpos de prova após o ensaio mecânico de flexão na região de fratura, com o objetivo de verificar a interação entre a matriz de gesso e o nanomaterial, observando se houve preenchimento dos espaços vazios da matriz e se os MWCNT funcionaram como pontes ou costuras entre poros e fissuras. Para cada amostra, os corpos de prova tiveram seu tamanho ajustado para aproximadamente 1×1×1 cm. Estes foram secos em estufa a 70 °C por um período de 10 horas e, após isso, sempre mantidos em recipientes contendo sílica-gel para manutenção da secagem. Em seguida, estes corpos de prova foram posicionados sobre porta amostras de alumínio (stubs) e cobertos com carbono utilizando-se o equipamento evaporador de carbono Bal-tec. Após este tratamento, o microscópio eletrônico de varredura (MEV) FEG-UHR Clara Tescan com detector de raios-x X-Flash6-60 Bruker (MEV/EDS) no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural da Universidade Federal de Lavras foi devidamente calibrado para a condição de análise de elementos. A observação em MEV com análise de EDS foi realizada com magnificação de 200.000 x para quantificação relativa dos elementos, obtenção dos espectros de energia dos elementos, estudo de distribuição dos elementos (função mapping) para cada amostra, mantendo-se a distância de trabalho (WD) próximo de 9 mm, valor de Kcps maior que 30 unidades, voltagem em 20 KeV, Bean Current em torno de 1 nA. Imagens feitas utilizando detector de elétrons secundários foram obtidas com magnificações de 2.000, 20.000 e 200.000 x.

2.5 Análise dos resultados

Os resultados das análises físicas e mecânicas foram avaliados utilizando delineamento inteiramente casualizado e submetidos à análise de variância e regressão, a 5% de significância.

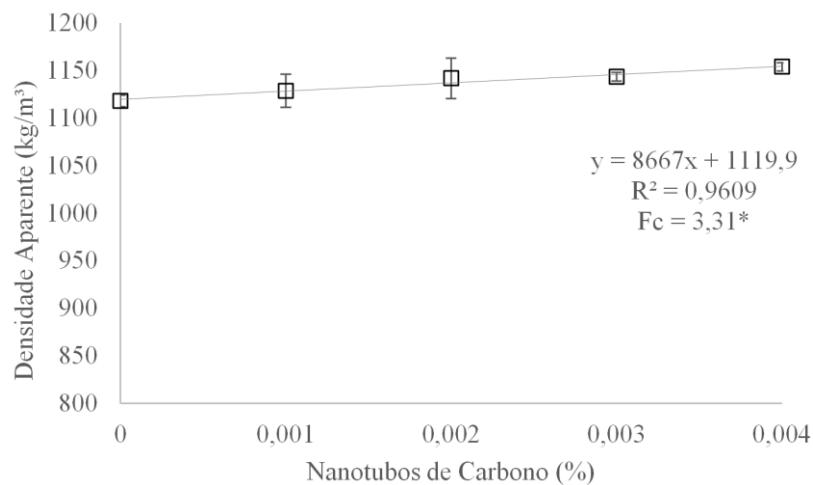
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaio físicos

Em relação à densidade aparente (FIGURA 4), o ajuste da regressão foi significativo ($F_c = 3,31$), indicando diferença estatística entre tratamentos com relação quadrática crescente à medida em que se acresce MWCNT, sendo que de acordo com a equação da reta o ponto máximo da densidade foi com uma porcentagem de 0,004 de MWCNT, tendo um aumento de 3,21% quando comparado com o tratamento testemunha.

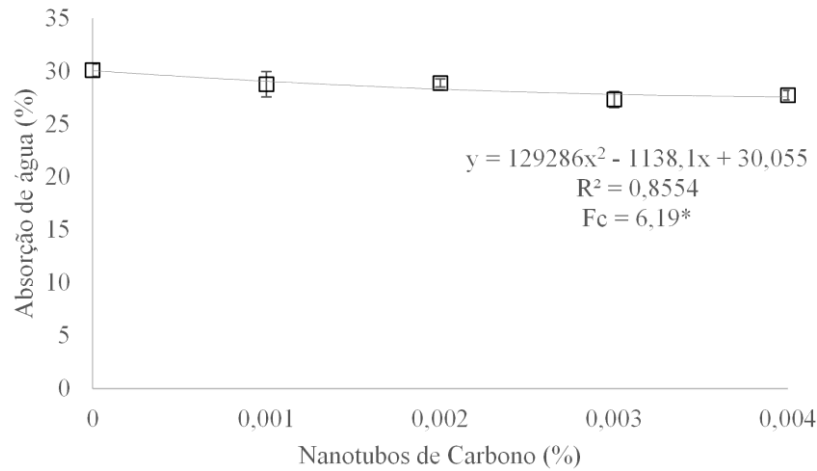
Um aumento na densidade aparente é vantajoso visto que a matriz de gesso é muito porosa, tornando o gesso um material frágil e altamente susceptível a absorver água, provavelmente os MWCNT preencheram os poros da matriz e por isso houve esse aumento na densidade aparente.

Figura 4 - Densidade Aparente dos nanocompósitos com MWCNT.



Fonte: Da autora (2022).

Figura 5 - Absorção de água dos nanocompósitos com MWCNT.



Fonte: Da autora (2022).

Para a absorção de água, o ajuste da regressão foi significativo ($F_c = 6,19$), indicando diferença estatística entre tratamentos com relação quadrática decrescente à medida em que se acresce MWCNT, através do ajuste o ponto mínimo da curva característica foi com 0,004% de incorporação de MWCNT, com valor de 27,55% de absorção de água. Comparando-se com o tratamento testemunha, nota-se uma redução de 8,33%.

Segundo Chen e Akono (2020), os MWCNT atuam no preenchimento de vazios e, conseqüentemente, na redução da porosidade capilar das pastas cimentícias através de um refinamento dos poros. Neste contexto, os vazios capilares têm uma grande influência na resistência e nas características de permeabilidade das pastas de cimento (HU *et al.*, 2014; ISFAHANI *et al.*, 2016), logo, observa-se o mesmo comportamento em pastas de gesso.

Marconde *et al* (2015) estudaram a incorporação de 0,3% de nanotubos de carbono na matriz de cimento Portland e concluíram que a adição de nanotubos reduziu a absorção de água por imersão em 4,4%.

Tokarev *et al.* (2017) estudaram diversos aditivos minerais juntamente com nanotubos de carbono em ligantes de gesso, sendo que o melhor resultado para a redução da absorção de água foi ao incorporarem 0,002% de nanotubos de carbono, juntamente com 3% de Cimento Portland, obtendo uma diminuição de 5,81% da absorção de água.

Matveeva *et al.* (2020) estudaram o efeito do nanomodificador de carbono (HFNCM) (1% em massa) na estrutura e propriedades da pedra de gesso com adição de plastificante carboxilato, (1% em massa), sendo que a resistência à absorção de água aumentou 27,5%.

Estudos de Vidales-Barriguetete *et al.* (2020) confirmam que o gesso com resíduos de cabos plásticos apresenta menor índice de porosidade, o que se traduz em menor capacidade de preenchimento com água.

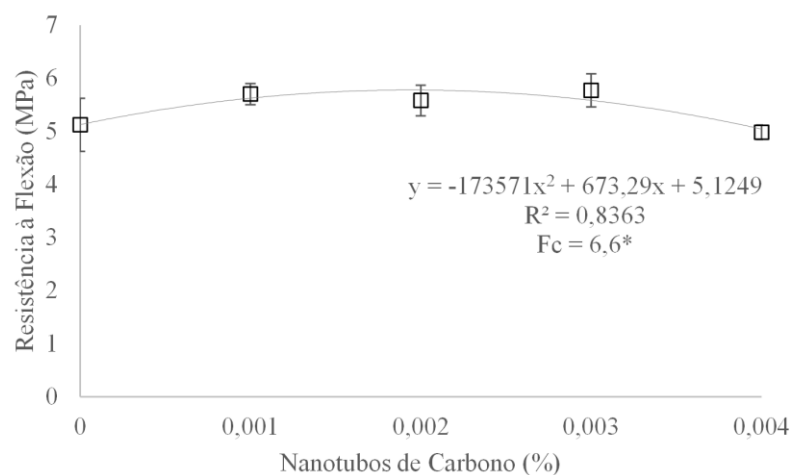
Li *et al.* (2021) estudaram a influência da nano-sílica e emulsão de óleo de parafina de silicone misturada com gesso de dessulfurização de gases de combustão (FGD). Os resultados mostram que a nano-sílica pode melhorar a resistência à água do gesso FGD, sendo que a taxa de absorção de água diminuiu de 30% para 13,62%.

Visto que uma das maiores deficiências do gesso como material de construção é sua suscetibilidade à água, o que restringe seu uso em ambientes secos (PAYGHAN *et al.*, 2019). O aumento da hidrofobicidade com a inserção de MWCNT se mostra benéfico no sentido de reduzir tal restrição e ampliar a utilização do gesso quando compósito.

3.2 Ensaios mecânicos

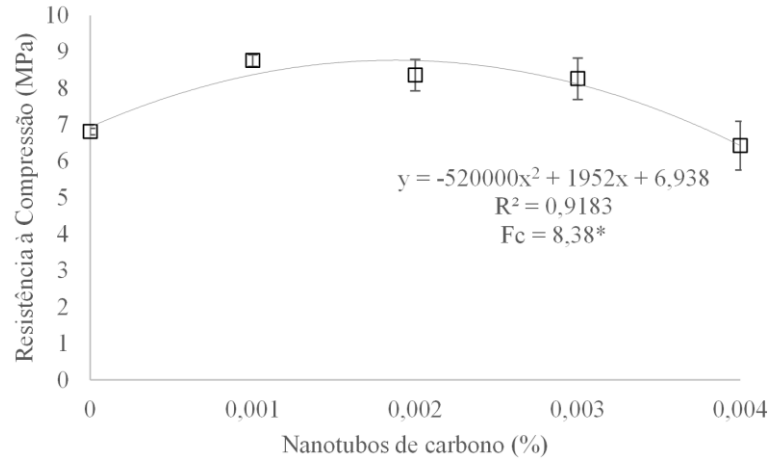
No ensaio de resistência à flexão (FIGURA 6) e compressão (FIGURA 7), os resultados mostram que os ajustes foram significativos para ambos os ensaios, apresentando comportamento semelhante, sendo que houve melhoria nas resistências até determinado teor, decaindo após esse valor.

Figura 6 - Ensaio de resistência à Flexão dos nanocompósitos com MWCNT.



Fonte: Da autora (2022).

Figura 7 - Ensaio de resistência à compressão dos nanocompósitos com MWCNT.



Fonte: Da autora (2022).

A partir da equação da reta, o ponto máximo da curva característica do ensaio de flexão foi com 0,00194% de inserção de MWCNT, tendo aumentado a resistência à flexão 12,74 % comparado com a testemunha. Já o ponto máximo de resistência à compressão foi com 0,00188 % de inserção de MWCNT, tendo aumentado a resistência à compressão 26,4 % em comparação com o compósito referência.

O aumento nas propriedades mecânicas devido a incorporação de MWCNT pode ter acontecido devido à redução da porosidade dos compósitos e refinamento dos poros, o que aumenta a compacidade dos compósitos ou devido ao efeito de ligação dos MWCNT que agem como verdadeiras ‘pontes’ que atravessam fissuras e vazios, garantindo a transferência de carregamento no caso de tensões (LI *et al.*, 2005).

Parveen *et al.* (2013) relataram que os nanomateriais podem ser eficazes na prevenção do início do crescimento de trincas em escala nanométrica. No entanto, o decréscimo da resistência a partir de determinado ponto pode ser explicado uma vez que maiores quantidades de MWCNT podem ter tido uma má dispersão na matriz de gesso, aglomerando-se e prejudicando as propriedades mecânicas. Ludvig (2012) verificou em testes de tração na flexão, que para teores de NTC maiores que 0,005% em massa, existe perda de resistência de argamassas, supondo que grandes quantidades de NTC dificultam sua dispersão na matriz.

Gordina *et al.* (2013) estudaram a influência de CNT em aglutinante de gesso. Os autores relatam que a introdução de CNT na quantidade de até 0,001% contribuiu para aumentar as propriedades mecânicas em até 80%, visto que os nanotubos que possuem alta energia superficial atuaram como centros de cristalização formando uma estrutura ordenada e densa, porém, com maior elevação da concentração, os autores observaram uma diminuição

gradual das propriedades mecânicas do aglutinante de gesso, assim como também observou-se no presente estudo.

Derevianko *et al.* (2018), adicionaram 0,18% de nanotubos de carbono na matriz de gesso e observaram um aumento de 30% na resistência à compressão, valor próximo ao encontrado neste estudo. Melo *et al.* (2011) trabalhando com nanotubos em argamassas obtiveram incrementos da ordem de 34% na resistência à compressão.

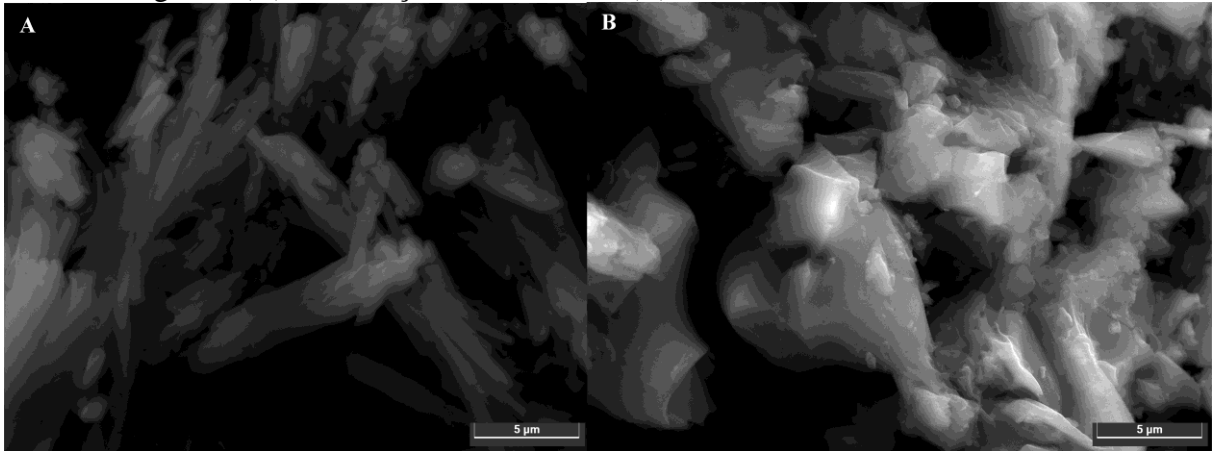
Ganhos ainda mais expressivos foram conseguidos pela junção de NTC com aditivos minerais, estudados por Tokarev *et al.* (2017) que investigaram as propriedades físicas e mecânicas de amostras de gesso modificadas por nanotubos de carbono de parede simples juntamente com aditivos minerais, os autores relataram aumento de até 85 % na resistência à compressão.

3.3 Avaliação microestrutural

As imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) feitas no compósito testemunha (FIGURA 8a) e no compósito com 0,002% de MWCNT (FIGURA 8b), ajudam a explicar alguns dos resultados obtidos. A microestrutura da amostra de referência (FIGURA 8a) difere da matriz modificada (FIGURA 8b). Na Figura 8a pode-se observar cristais de gipsita alongados, prismáticos, em formato de agulhas, e uma quantidade maior de espaços vazios quando comparado com a Figura 8b, sendo que a adição de MWCNT modificou a morfologia dos cristais de gesso, resultando na alteração da microestrutura e diminuição da porosidade dos compósitos de gesso. Sendo assim, a presença de MWCNT preencheu parte dos poros da matriz, deixando-a mais densa e, como consequência, diminuiu a absorção de água e aumentou a resistência à compressão.

Efeito semelhante foi observado no trabalho de Pervyshin *et al.* (2017), no qual os autores justificam que o aumento significativo nas características mecânicas e menor absorção de água estão associadas ao efeito dos nanotubos de carbono atuarem como centros de cristalização na superfície da qual se formou uma estrutura densa e ordenada com o empacotamento de cristais em bloco.

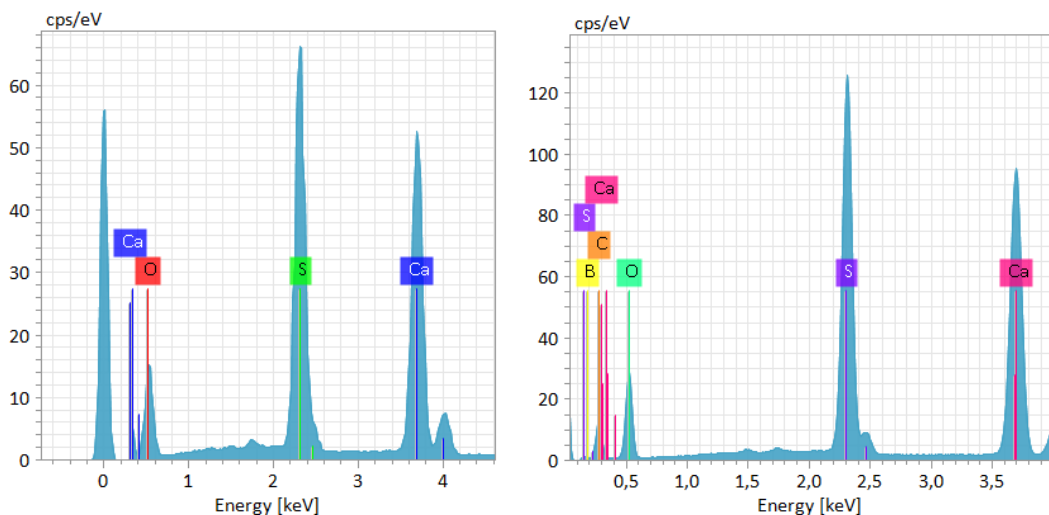
Figura 8 - Eletromicrografia de varredura das amostras contendo MWCNT em matriz de gesso. (A) Sem adição de MWCNT; (B) 0,002% de MWCNT.



Fonte: Da autora (2022).

A análise do EDS (FIGURA 9a) comprova a presença dos elementos constituintes das fases cristalinas correspondentes ao gesso β , apresentando cálcio, oxigênio e enxofre. Já a Figura 9b mostra a presença de carbono, principal constituinte dos nanotubos e também a presença de boro, que pode ser atribuída à existência de impurezas decorrentes dos catalisadores utilizados durante o processo de síntese dos NTC (YUDASAKA *et al.*, 1997; ALI *et al.*, 2020).

Figura 9 - (a) EDS da amostra referência (b) EDS da amostra com 0,002% de MWCNT.



Fonte: Da autora (2022).

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve a finalidade de contribuir com estudos referentes ao efeito da adição de MWCNT em matrizes de gesso para a construção civil. Já que este é um campo de estudo em desenvolvimento e promissor, e com poucos resultados iniciais disponibilizados na literatura.

Os nanocompósitos produzidos com MWCNT diminuíram a absorção de água e aumentaram a densidade aparente à medida que se incorporava MWCNT na matriz de gesso. As resistências mecânicas aumentaram até determinado teor de MWCNT incorporado. Sendo que, para a resistência à flexão esse ganho foi de até 12,74 % e para a resistência à compressão 26,4 %, quando comparado com a testemunha.

Os resultados obtidos indicam que a adição de MWCNT na matriz de gesso leva à formação de uma matriz densa, de resistência aumentada, absorvendo menos água. Em suma, a inclusão de MWCNT como reforço em matriz de gesso se mostra uma alternativa viável para melhorar as propriedades mecânicas e físicas do gesso, podendo ampliar cada vez mais sua utilização na construção civil.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras e a FAPEMIG, que colaboraram para a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

- ALI, Z.; MEHMOOD, M.; AHMED, J.; NIZAM, M.N. Synthesis of graphitic nanofibers and carbon nanotubes by catalytic chemical vapor deposition method on nickel chloride alcogel for high oxygen evolution reaction activity in alkaline media. **Nano-Structures & Nano-Objects**, [S.l.], v.24, p. 1-9, 2020.
- BARBOSA, W. P.; VANDERLEI, R. D; CALLEFI; M. H. B. M.; SAKUNO, F. S.; BARBOSA, L. P., CAPELIN, L. J. A Nanotecnologia na construção civil e suas influências. *In: ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA*, 10., 2017, Campinas. **Anais [...]** Campinas, Galoá, 24 a 26 de outubro de 2017.
- CEN. European Committee for Standardization. **EN 13279-1**. Gesso e produtos à base de gesso para a construção; Parte 1: Definições e requisitos. Bruxelas: 2008.
- DELRÍO-MERINO, M.; VIDALES-BARRIGUETE, A.; RAMÍREZ, C. P.; VITIELLO, V.; CRUZ-ASTORQUIJAIME, S.; CASTELLUCCIO, R. A review of the research about gypsum mortars with waste aggregates. **Journal of Building Engineering**, [S.l.], v. 45, January. 2022.
- DEREVIANKO, V.; KONDRATIEVA, N.; HRYSHKO, H. Study of impact factors and the mechanism of gypsum binder hydration process in the presence of nanomodifiers. **French-Ukrainian Journal of Chemistry**, [S.l.], v. 6, n. 1, p. 92–100, 2018.
- EUROPEAN STANDARDS. **EN 13279-2**: gypsum binders and gypsum plasters, part 2: test methods. Pilsen, 2006b.
- GORDINA A.F.; TOKAREV JU.V.; JAKOVLEV G.I.; KERENE JÁ.; SYCHUGOV S.V.; ALI EL SAYED MOHAMED. Evaluation of the Influence of Ultradisperse Dust and Carbon Nanostructures on the Structure and Properties of Gypsum Binders, **Procedia Engineering Modern Building Materials, Structures and Techniques**, [S.], v. 57, p. 334-342, 2013.
- KONDRATIEVA, N.; BARRE, M.; GOUTENOIRE, F.; SANYTSKY, M.; ROUSSEAU, A. Effect of additives SiC on the hydration and the crystallization processes of gypsum. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 235, p. 1170479, 2020.
- LI, J. I. *et al.* Effect of nano-silica and silicone oil paraffin emulsion composite waterproofing agent on the water resistance of flue gas desulfurization gypsum, **Construction and Building Materials**, v. 287, n. 123, p. 55, 2021.
- LI, G. Y.; WANG, P. M.; ZHAO, X. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. **Carbon**, [S.l.], v. 43, n. 6, p. 1239–1245, maio. 2005.
- LI, J. *et al.* Effect of nano-silica and silicone oil paraffin emulsion composite waterproofing agent on the water resistance of flue gas desulfurization gypsum, **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 287, 123125, 2021.

LUDVIG, P. **Synthesis and Characterization of Portland Cement Manufactured with Carbon Nanotubes**. 2012. 235 p. Tese (Doutorado em Engenharia em Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

MELO, D. de C. P. de. **Processo de calcinação da gipsita/resíduo em um forno rotativo contínuo para a produção de gesso beta reciclável**. 2012. 155 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Pernambuco, CTG, 2012.

PAYGHAN SUNIL, J.; SURAJ, K. W.; SURAJ, V. G.; SHUBHAM, R. K.; DILIP, M. G A Review on Enhancing the Water Resistance Property of Gypsum. **International Journal of Research in Engineering, Science and Management**, [S.l.], v. 2, n. 5, May. 2019.

MATVEEVA, L.; YU; LETENKO, D.G.; MOKROVA, M.V. Influence of Carbon Nanomodifier on the Structure and Properties of the Modified Gypsum Binder. **Materials Science Forum**, [S.l.], v. 992, p. 233-237, May. 2020.

PAYGHAN SUNIL, J.; SURAJ, K. W.; SURAJ, V. G.; SHUBHAM, R.; K.A; GAVALI, D. M. A Review on Enhancing the Water Resistance Property of Gypsum. **International Journal of Research in Engineering, Science and Management**, [S.l.], v. 2, n. 5, May. 2019.

PERVYSHIN G.N.; YAKOVLEV, G.I.; GORDINA, A.F.; KERIENE, J.; POLYANSKIKH, I.S.; H.-B. F.; RACHIMOVA, N.R.; BURYANOV, A.F. **“WaterResistant gypsum composition with man-made modifiers”** 2017.

VIDALES-BARRIGUETE, A. *et al.* Analysis of the improved water-resistant properties of plaster compounds with the addition of plastic waste. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 230, p. 116, p. 956.2020.

YUDASAKA, M; KIKUCHI, R.; OHKI, Y.; YOSHIMURA, S. Nitrogen-containing carbon nanotube growth from Ni phthalocyanine by chemical vapor deposition. **Carbon**, [S.l.], v. 35, n. 2, p. 195-201, 1997.

TOKAREV, Y. *et al.* Modification of Gypsum Binders by Using Carbon Nanotubes and Mineral Additives. **Procedia Engineering**, Rússia, p. 1161-1168. ago. 2017.

ARTIGO 2 - ESTUDO DA MODIFICAÇÃO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO GESSO DE CONSTRUÇÃO UTILIZANDO NANOFIBRILAS DE CELULOSE

RESUMO

O gesso, um material de construção civil largamente utilizado, possui ótimas propriedades térmicas e acústicas, resistência ao fogo, endurecimento rápido, excelente acabamento superficial, dentre outras vantagens quando comparado ao cimento. Entretanto, este material ainda apresenta uma série de limitações, como alta permeabilidade à água, natureza porosa, baixa resistência à compressão, baixa resistência à flexão e tração. Logo, pesquisas têm sido desenvolvidas para melhorar o desempenho do gesso, tendo como base a adição de nanomateriais, fomentando o mercado da nanotecnologia na construção civil. Nesse contexto, um nanomaterial que vem se destacando são as nanofibrilas de celulose, por possuir excelentes propriedades físicas, químicas e biológicas, elevada resistência mecânica, baixa densidade, alta área superficial e biocompatibilidade. Nesse trabalho, as nanofibrilas de celulose foram obtidas através da polpa de eucalipto e utilizadas na matriz de gesso, empregadas numa relação de 0%, 0,5 %, 1 %, 1,5 % e 2 % de nanofibrila de celulose (m/m) com relação a massa de gesso. A fim de avaliar as propriedades físicas e mecânicas desse material modificado foram realizados os ensaios de densidade aparente, absorção de água, resistência à compressão e resistência à flexão. A aplicação das nanofibrilas de celulose até a concentração de 0,69 % diminuiu em até 5,91% a absorção de água comparando com o tratamento testemunha e aumentou em até 1,98% a densidade aparente. No entanto, não alterou significativamente a resistência à compressão e diminuiu significativamente a resistência à flexão, na medida que se aumentava o teor de nanofibrila de celulose. Os resultados se mostraram satisfatórios, tendo em vista que as nanofibrilas de celulose são sustentáveis, baratas e altamente disponíveis, podendo ser obtidas até mesmo de resíduos, logo, é possível criar um material inovador com alto valor agregado.

Palavras-chave: Nanotecnologia. Nanomateriais. Nanocelulose.

STUDY OF THE MODIFICATION IN THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BUILDING PLASTER USING CELLULOSE NANOFIBRILS

ABSTRACT

Gypsum, a widely used civil construction material, has excellent thermal and acoustic properties, fire resistance, fast hardening, excellent surface finish, among other advantages when compared to cement. However, this material still has a number of limitations, such as high water permeability, porous nature, low compressive strength, low flexural and tensile strength. Therefore, research has been developed to improve the performance of gypsum, based on the addition of nanomaterials, promoting the nanotechnology market in civil construction. In this context, a nanomaterial that has been standing out are the cellulose nanofibrils, for having excellent physical, chemical and biological properties, high mechanical strength, low density, high surface area and biocompatibility. In this work, the cellulose

nanofibrils were obtained from eucalyptus pulp and used in the gypsum matrix, employed in a ratio of 0%, 0.5%, 1%, 1.5% and 2% of cellulose nanofibrils (m/ m) with respect to gypsum mass. In order to evaluate the physical and mechanical properties of this modified material, tests of apparent density, water absorption, compressive strength and flexural strength were performed. The application of cellulose nanofibrils up to a concentration of 0.69% decreased the water absorption by up to 5.91% compared to the control treatment, increased the apparent density by up to 1.98%, however, it did not significantly alter the resistance. To compression and significantly decreased the flexural strength as the cellulose nanofibril content was increased. The results were satisfactory considering that cellulose nanofibrils are sustainable, cheap and highly available, and can even be obtained from waste, so it is possible to create an innovative material with high added value.

Keywords: Nanotechnology. Nanomaterials. Nanocellulose.

1 INTRODUÇÃO

A nanotecnologia é uma tecnologia emergente que nasceu no final da década de 80 e atualmente está crescendo, visto que pode desenvolver materiais e produtos com características funcionais de acordo com as expectativas dos pesquisadores (LAZARO *et al.*, 2016). Os nanomateriais têm uma perspectiva de aplicação de mercado, muito ampla, e enormes benefícios econômicos e sociais em materiais de construção (PISARENKO *et al.*, 2020).

A utilização de nano e micromateriais ecologicamente corretos, sustentáveis e de base biológica ganhou enorme interesse ao longo dos últimos anos e tem sido amplamente explorada para várias aplicações (BEDIAN *et al.*, 2017). A celulose é um material sustentável, sendo a matéria-prima polimérica mais abundante do planeta, sendo sua produção anual estimada entre 10^{10} e 10^{11} t, porém, apenas uma pequena parcela de 6×10^9 t é explorada por setores industriais, como papel, têxtil, química e indústrias de materiais (TRACHE *et al.*, 2020).

Ao longo da última década, atenção significativa tem sido direcionada para a produção, modificação e aplicação de três tipos de celulose nanoestruturada (NSC), ou seja, nanocristais de celulose (CNCs), nanofibrilas de celulose (CNFs) e nanocelulose bacteriana (BNC), sendo que NSC possui propriedades físico-químicas únicas, como baixa densidade ($1,5\text{--}1,6$ g/cm³), área de superfície alta ($100\text{--}500$ m²/g), alta relação de aspecto, alta cristalinidade e excelentes propriedades mecânicas (um módulo de tração de 56-220 GPa e uma resistência à tração de 10 GPa (NASIR *et al.*, 2022). Elas também têm um baixo

coeficiente térmico e permeabilidade, grupos hidroxila reativos, não toxicidade e biodegradabilidade (TRACHE *et al.*, 2020; SALAS *et al.*, 2014).

Atualmente, o desempenho de materiais de nano e microcelulose como reforço de compósitos cimentícios está recebendo atenção de pesquisas em todo o mundo (MAZLAN *et al.*, 2020). Resultado positivo foi descoberto por Cao *et al.* (2015), através do uso de CNCs foi encontrado um aumento de até 30% para a resistência à flexão da argamassa de cimento com a adição de 0,2% de CNCs. Outra conquista foi encontrada com a adição de CNCs no cimento de poços de petróleo, estudada por Reza *et al.* (2019), onde os CNCs reduziram a porosidade em até 33% e aumentaram a resistência à compressão e tração em 60% nas primeiras 24 horas de idade do compósito. Segundo Nasir *et al.* (2022) a presença de NSC em matrizes cimentícias tem mostrado melhora significativa na resistência mecânica, durabilidade e propriedades microestruturais, porém, seu uso em matrizes de gesso ainda foi pouco estudado.

O gesso é um material muito abundante no mundo e é utilizado principalmente no setor da construção (para rebocos, placas de gesso cartonado, blocos pré-fabricados, dentre outros) (PEDREÑO-ROJAS *et al.* 2019). É um material versátil, isolante térmico, regulador de umidade, incombustível e absorvedor acústico (DE BRITO; FLORES-COLEN, 2015). O gesso também apresenta resistência ao fogo, boa trabalhabilidade e propriedades estéticas, além de ser ecológico, visto que a demanda de energia para a sua produção é baixa em comparação com a produção de cal ou cimento (KREJSOVA *et al.*, 2019).

No entanto, apresenta algumas desvantagens quando comparado aos produtos de cimento, como fragilidade e alta afinidade, com a água, sendo que seu uso não foi estendido para aplicações externas devido às suas más propriedades mecânicas atribuídas pela baixa força de coesão entre os grãos de gesso e falta de intertravamento entre grãos levando a alta porosidade (SAKTHIESWARAN; SOPHIA, 2018; EVE *et al.*, 2002; EVE *et al.*, 2006).

Pesquisas sobre compósitos à base de gesso com CNFs são muito raras na literatura existente, assim, o presente estudo pretende relatar o efeito da suspensão de CNFs nas propriedades mecânicas e físicas do gesso de construção. Uma série de experimentos foram conduzidos para avaliar as propriedades físicas, microestruturais e mecânicas dos compósitos após a adição de CNFs.

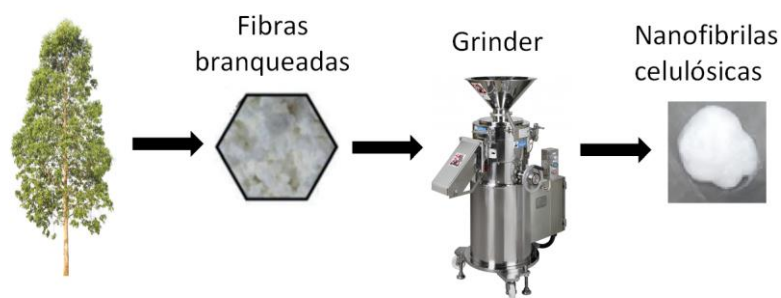
2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Obtenção e preparação dos materiais

Foi utilizado como matriz para a produção dos compósitos, gesso fino para a fundição, proveniente do polo gesseiro do Araripe, no estado de Pernambuco. Esse material apresenta como características massa específica aparente de 781 kg/m^3 e módulo de finura de 0,85, e como reforço utilizou-se a nanocelulose.

A obtenção da CNFs foi realizada conforme o esquema ilustrado na Figura 1. Suspensões com fibras branqueadas de eucaliptos em 2,0% (p/p) foram produzidas usando água deionizada. Para garantir o inchaço e a dispersão, as fibras foram agitadas a 500 rpm por 15 min. O processo de fibrilação foi realizado com 5 passagens de suspensões pelo *grinder* – *Supermasscolloider Masuko Sangyo MKGA-80* (Kawaguchi, Japão), em 1500 rpm. A distância inicial entre os discos trituradores foi de $10 \mu\text{m}$ e foi ajustado para $100 \mu\text{m}$ quando a viscosidade foi aumentada até obter a formação do gel. O material consiste em uma solução onde em um litro estão presentes 20 g de nanocelulose e o restante do volume constituído por água. A suspensão de CNFs possui aspecto gelatinoso e esbranquiçado, tendo massa específica de $1,05 \text{ g/cm}^3$. (FIGURA 1).

Figura 1- Obtenção das nanofibrilas de celulose.



Fonte: Da autora (2022).

2.2 Preparação dos compósitos

A relação água/gesso (a/g) utilizada foi de 0,6, sendo esse valor escolhido por ser uma relação a/g que garante boa trabalhabilidade da pasta de gesso e ter sido utilizado em trabalhos semelhantes como de Gordina *et al.* (2013) e Pervyshin *et al.* (2017), que também utilizaram este fator ao estudar a incorporação de nanomateriais na matriz de gesso. Este

trabalho apresenta como variável de estudo os diferentes teores de nanocelulose, sendo eles 0 %, 0,5 %, 1 %, 1,5 % e 2 % em relação à massa de gesso. Estas porcentagens foram escolhidas baseando-se no trabalho de Nindiyasari *et al.* (2016). A composição das amostras estudadas é dada na Tabela 1.

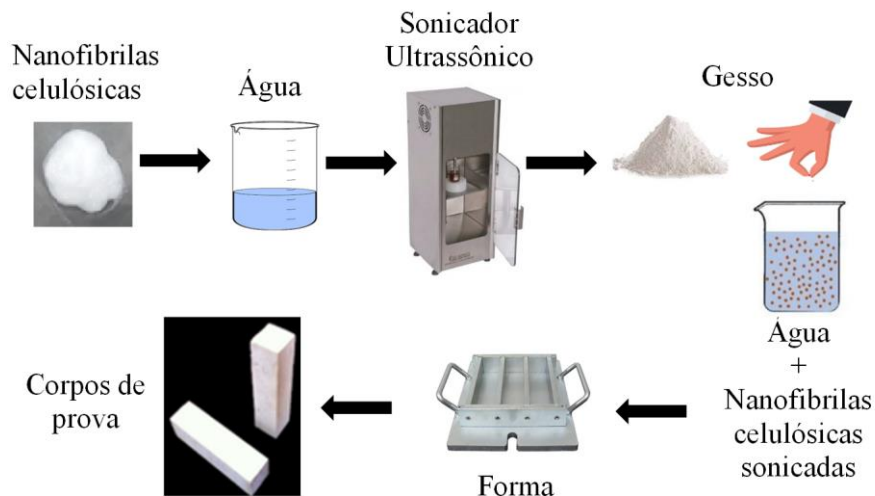
Tabela 1 - Composições dos compósitos produzidos (relação massa/massa).

TRATAMENTO	COMPOSIÇÕES	
	GESSO (%)	NANOFIBRILAS (%)
T1	100	0
T2	99,995	0,5
T3	99,99	1
T4	99,85	1,5
T5	99,8	2

Fonte: Da autora (2022).

A produção dos corpos de prova seguiu o esquema apresentado na Figura 2, sendo que para cada tratamento, cada porcentagem estudada de CNFs foi sonicada com a água de cada traço por 30 minutos, utilizando um sonicador de Ponteira Ultrassônico Eco-Sonics/Utronique (750 W) com 75% da pressão máxima do aparelho. Posteriormente, o gesso foi polvilhado nesta mistura sonicada, sendo misturados manualmente dentro de 2-2,5 minutos, logo após foram moldados em formas de tamanho 40 x 40 x 160 mm, conforme especificações da EN 13279-2 (2006).

Figura 2 - Esquema representativo da produção dos corpos de prova de gesso com CNFs.



Fonte: Da autora (2022).

Foram produzidos 6 corpos de prova para cada tratamento. Após o período de 24 horas, eles foram retirados dos moldes e colocados em local livre da ação de intempéries à temperatura de 20 °C durante 28 dias em condições normais de umidade para posterior realização dos ensaios.

2.3 Avaliação das propriedades físicas e mecânicas

Os testes de resistência mecânica das amostras foram realizados em uma Máquina Universal de Ensaios, de acordo com a norma UE 13279-2 (EN, 2008). No ensaio de flexão, a carga foi aplicada progressivamente no centro do vão até a ruptura, a distância entre os apoios foi 10 cm e a velocidade de 50 ± 10 N/s. No ensaio de compressão a carga foi aplicada progressivamente sobre o corpo de prova até a ruptura com velocidade de 400 ± 200 N/s. O resultado final dos testes foram os valores médios calculados a partir dos resultados de três medições.

Para determinação da massa específica foi seguida a NM 23 (AMN, 2000), já a absorção de água por imersão seguiu-se a EN 520 – absorção de água após 2 horas.

2.4 Avaliação microestrutural

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada para caracterizar a superfície de ruptura dos corpos de prova após o ensaio mecânico de flexão na região de fratura, com o objetivo de verificar a interação entre a matriz de gesso e o nanoreforço, observando se houve preenchimento dos espaços vazios da matriz pelas CNFs. Para cada amostra, os corpos de prova tiveram seu tamanho ajustado para aproximadamente $1 \times 1 \times 1$ cm. Estes foram secos em estufa a 70 °C por um período de 10 horas e, após isso, sempre mantidos em recipientes contendo sílica-gel para manutenção da secagem. Em seguida, estes corpos de prova foram posicionados sobre porta amostras de alumínio (stubs) e cobertos com carbono utilizando-se o equipamento evaporador de carbono Bal-tec. Após este tratamento, o microscópio eletrônico de varredura (MEV) FEG-UHR Clara Tescan com detector de raios-x X-Flash6-60 Bruker (MEV/EDS) no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural da Universidade Federal de Lavras, foi devidamente calibrado para a condição de análise de elementos. A observação em MEV com análise de EDS foi realizada com magnificação de 200.000 x para quantificação relativa dos elementos, obtenção dos espectros

de energia dos elementos, estudo de distribuição dos elementos (função *mapping*) para cada amostra, mantendo-se a distância de trabalho (WD) próximo de 9 mm, valor de Kcps maior que 30 unidades, voltagem em 20 KeV, Bean Current em torno de 1 η A. Imagens feitas utilizando detector de elétrons secundários foram obtidas com ampliações de 2.000, 20.000 e 200.000 x.

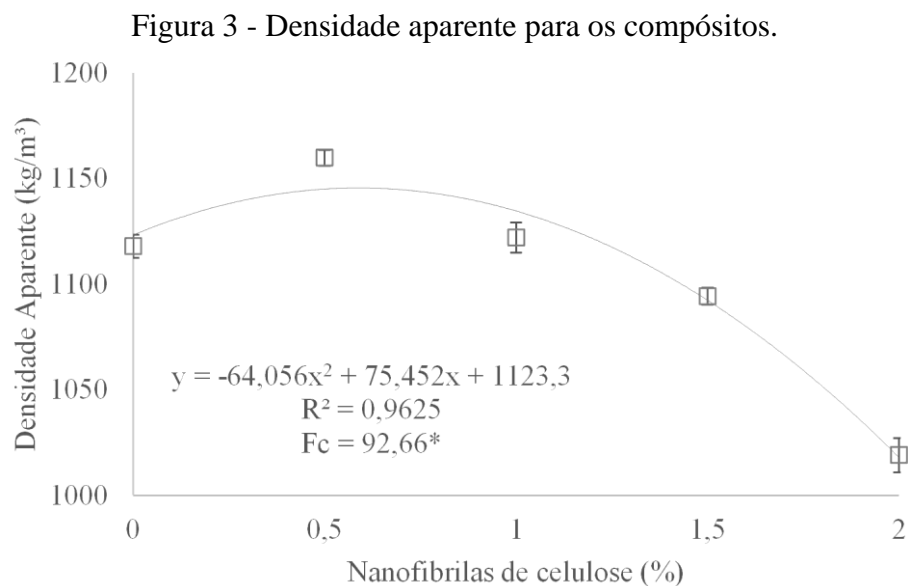
2.5 Análise dos resultados

Os resultados das análises físicas e mecânicas foram avaliados utilizando o delineamento inteiramente casualizado e submetidos à análise de variância e regressão, a 5% de significância.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Propriedades físicas dos compósitos

Na Figura 3 estão apresentados os valores de densidade aparente para os compósitos à base de gesso reforçados com CNFs.



Os resultados na Figura 4 mostram que a massa específica dos nanocompósitos aumentou até determinado teor de CNFs, diminuindo após esse valor. Esse aumento

provavelmente ocorreu porque a nanocelulose atuou como um plastificante melhorando a coesão da mistura da pasta de gesso, tornando a matriz menos porosa, no entanto, diminuiu depois, provavelmente devido à aglomeração das CNFs.

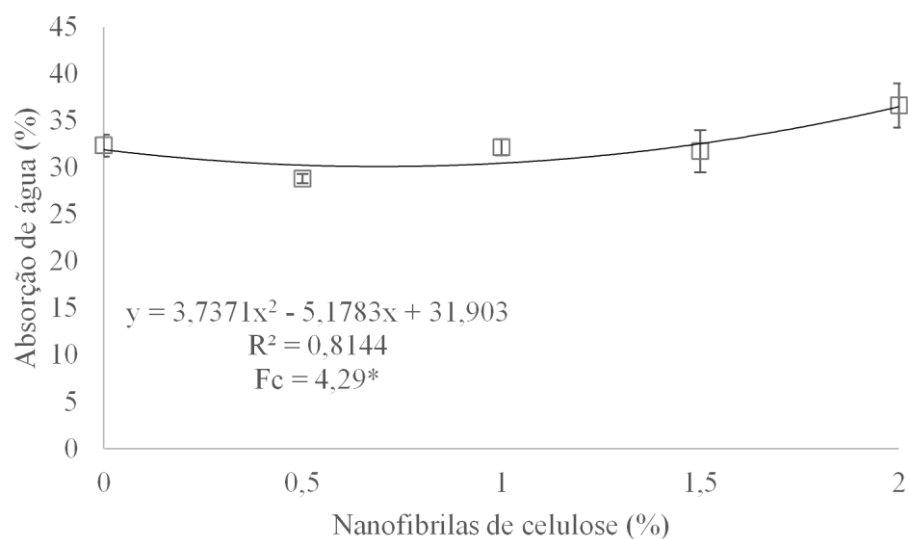
A partir do ajuste estatístico que foi significativo, e da equação da reta, o ponto máximo da densidade aparente foi quando adicionou 0,59% de CNFs, tendo um aumento de 1,98% comparado com a testemunha.

Comportamento semelhante foi descrito por Fonseca *et al.* (2016) que observaram um aumento de 3,8% na densidade aparente de fibrocimentos reforçados com 0,5 % de nanocelulose, diminuindo após esse valor.

Barnat-Hunek *et al.* (2019) estudaram o efeito de 0,5% e 1,0 % de CNFs nas propriedades do concreto, os autores relataram um aumento na densidade aparente de 5,66 % e 11,79 % quando adicionado 0,5% e 1,0 % de CNFs respectivamente.

No estudo de Vanin *et al.* (2020), com o aumento da dosagem de CNC de 0,1% para 1% em substituição ao volume de cimento, a densidade aparente foi aumentada inicialmente, atingindo um valor máximo, e depois diminuído gradativamente até abaixo da referência, o que foi atribuído à aglomeração de CNC, que manteve moléculas de água juntas e o ar aprisionado, o que levou a poros capilares maiores. Acredita-se que no presente estudo também ocorreu essa aglomeração com teores de CNFs acima de 0,59%.

Figura 4 - Absorção de água para os compósitos.



Fonte: Da autora (2020).

Para a absorção de água, os resultados mostrados na Figura 4 explicitam que a incorporação de CNFs ocasionou uma diminuição na absorção de água seguido de aumento. A partir do ajuste estatístico que foi significativo e da equação da reta, a menor absorção de água ocorreu quando se adicionou 0,69% de CNFs, tendo a absorção de água diminuído 5,91% comparando com o tratamento testemunha.

Fonseca *et al.* (2016) observaram comportamento semelhante ao encontrado no presente estudo, sendo que ao adicionarem 0,5 % de CNFs em fibrocimentos, os autores obtiveram uma redução de 10,44% na absorção de água, e quando aumentaram o teor de CNFs para 1,0% a absorção de água aumentou.

A diminuição no valor de absorção de água até certo nível de inserção pode estar relacionada com o aumento da densidade aparente, comprovando o menor número de vazios existentes, conferindo maior resistência a absorver água. Essa diminuição em absorver água que ocorreu até 0,69% de inserção de CNFs é muito vantajosa, visto que uma das principais limitações no uso do gesso na construção civil é sua alta permeabilidade à água, podendo se dissolver.

Após certo nível de inserção, houve aumento na absorção de água, assim como houve diminuição na densidade aparente, essa característica pode ser um aspecto negativo que é consequência da hidrofiliabilidade das CNFs ou da possível geração de defeitos na microestrutura dos compósitos com a inclusão das CNFs que podem ter aglomerado. A maior densidade aparente e menor absorção de água estão relacionadas com uma matriz mais compacta e com menos defeitos (TONOLI *et al.*, 2010).

Nindiyasari *et al.* (2016) realizaram um trabalho testando a inclusão de celulose e nanofibras de celulose em matriz de gesso e foi detectado que a porosidade já existente nos corpos de prova com gesso puro foi sendo aumentada à medida que era inserido as celuloses. Porém, ao inserir partículas menores que 10 μm (nanofibrilas de celulose) houve diminuição da porosidade, e isso foi atribuído ao fato de que essas nanofibrilas podem preencher os vazios que ocorrem a partir do emaranhado de cristais de gesso, o que não acontece quando se insere partículas de tamanhos maiores.

Alguns autores obtiveram ganhos mais expressivos em propriedades físicas do que foram encontrados no presente estudo, porém, em matriz cimentícia. Como Barnat-Hunek *et al.* (2019) examinaram algumas propriedades físicas do concreto com CNFs e concluíram que, quando adicionado 0,5 % de CNFs, a absorção de água diminuiu 14,55 % e com 1,0 % de CNFs, diminuiu 55,8% comparado com a testemunha. Em um outro estudo conduzido por

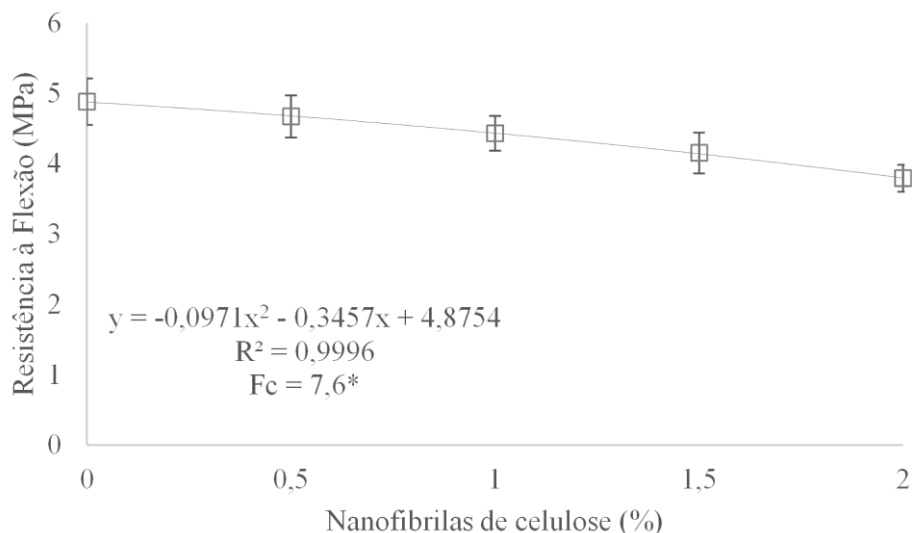
Barnat-Hunek *et al.* (2019) o coeficiente de absorção de água de argamassa foi reduzido à medida que a quantidade de CNCs aumentou, e 1,5% de CNCs conduziu a uma redução de 32% em relação à referência.

3.2 Propriedades mecânica dos compósitos

No ensaio de flexão estática (FIGURA 5), os resultados obtidos mostram que, de acordo com o ajuste estatístico, houve diminuição na resistência à flexão à medida que se aumentava a incorporação de CNFs, contudo, todos os tratamentos atendem ao valor mínimo exigido pela norma EN 13279-2 (2006), que é de 1MPa, e com baixo teor de NFCs (até 0,69 %) essa diminuição da resistência não foi tão expressiva.

Nindiyasari *et al.* (2015), ao estudarem os efeitos da incorporação de nanocelulose também na matriz de gesso, encontraram comportamento semelhante ao do presente estudo, sendo que para a resistência à flexão com 0,5% de inserção de NFCs, os autores relataram uma diminuição de 34,20 % comparado com o tratamento testemunha. No presente estudo, de acordo com o ajuste estatístico e pela equação da reta, quando adicionado 0,5% ne NFCs, a resistência à flexão diminuiu 4,10%.

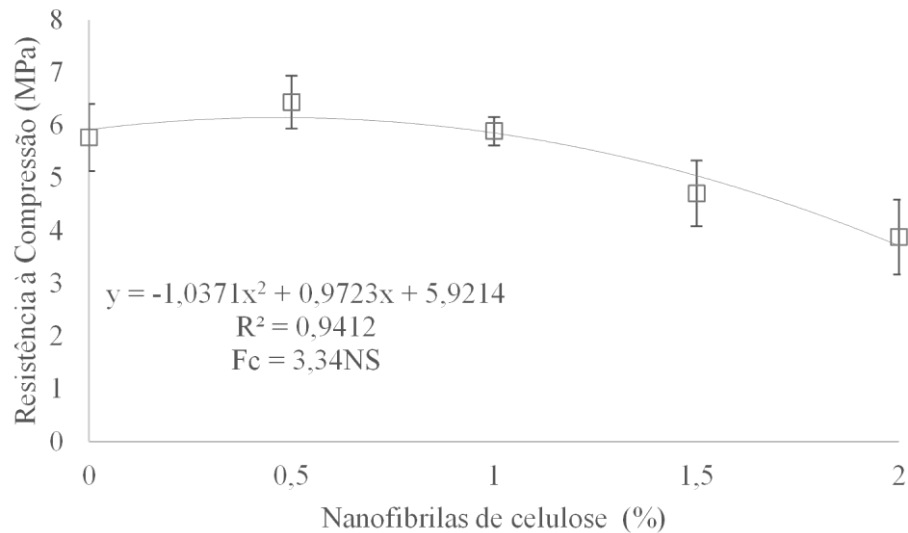
Figura 5 - Resistência à flexão dos compósitos.



Fonte: Da autora 2022)

No ensaio de compressão (FIGURA 6), os resultados mostram que de acordo com o ajuste estatístico, quando adicionado CNFs, a resistência à compressão não aumentou significativamente.

Figura 6 - Resistência à compressão dos compósitos.



Fonte: Da autora 2022)

Comportamento semelhante foi observado por Fonseca *et al.* (2016), que também não obtiveram aumento significativo de resistência à flexão e compressão em corpos de prova de fibrocimento quando adicionaram 0,5 e 1,0% de nanocelulose, e os autores justificam que pode ter ocorrido uma má distribuição das nanofibrilas na matriz.

Nindiyasari *et al.* (2015), para resistência à compressão de compósitos de gesso encontraram um aumento de 18,37% quando comparado com o tratamento sem incorporação de NFCs, no presente estudo, apesar do ajuste mostrar que o aumento não foi significativo, pela equação da reta, uma porcentagem de 0,5 % de NFCs aumentou a resistência à compressão em 3,89%.

No entanto, em muitos trabalhos já publicados utilizando nanocristais e nanofibrilas de celulose em matriz cimentícia houve aumento significativo na resistência mecânica.

Ghahari *et al.* (2020) incorporaram CNCs em pasta de cimento, sendo que a incorporação de 0,2% e 1% de CNC aumentou a resistência à compressão em 10% e 17%, respectivamente. Os autores relataram que esse aumento pode ser atribuído às características hidrofílicas dos CNCs, o que resultou em produtos de hidratação mais elevados. Além disso, a

alta área de superfície específica dos CNCs melhorou a interface pasta-CNCs. Isso levou ao aprimoramento da transferência de tensão entre a pasta de cimento e os CNCs e, conseqüentemente, aumentou a resistência à compressão.

Mazlan *et al.* (2020) estudaram a influência de CNCs extraídos de cachos de frutos vazios de dendê em argamassa, os resultados gerais revelaram que uma adição de 0,4% de CNCs mostrou aumentar a resistência à compressão e flexão para 46% e 20%, respectivamente. O trabalho demonstrou a importância da adição de CNCs para alcançar a resistência estrutural da argamassa de cimento promovendo tecnologias verdes na construção.

Barnat-Hunek *et al.* (2019) estudaram o efeito de 0,5% e 1,0 % de CNFs nas propriedades do concreto, os autores relataram um aumento na resistência à flexão de 12% e 34,5% quando adicionado 0,5% e 1,0 % de CNFs respectivamente. Na resistência à compressão houve um aumento de 2,06% e 12,62 % quando adicionado 0,5 % e 1,0 % de CNFs.

Mejdoub *et al.* (2016) estudaram o efeito da celulose nanofibrilada nas propriedades mecânicas da pasta de cimento. Os resultados mostraram que houve melhorias significativas na resistência à compressão, sendo aumentada em 43%, quando utilizou 0,3% de CNFs em substituição a massa de cimento.

Cao *et al.* (2015) examinaram como a adição de (CNCs) modificou o desempenho da pasta de cimento. Observou-se que as resistências à flexão das pastas de cimento com concentrações modestas de CNC (0,2%) foram cerca de 20% a 30% maiores do que a pasta de cimento sem CNC.

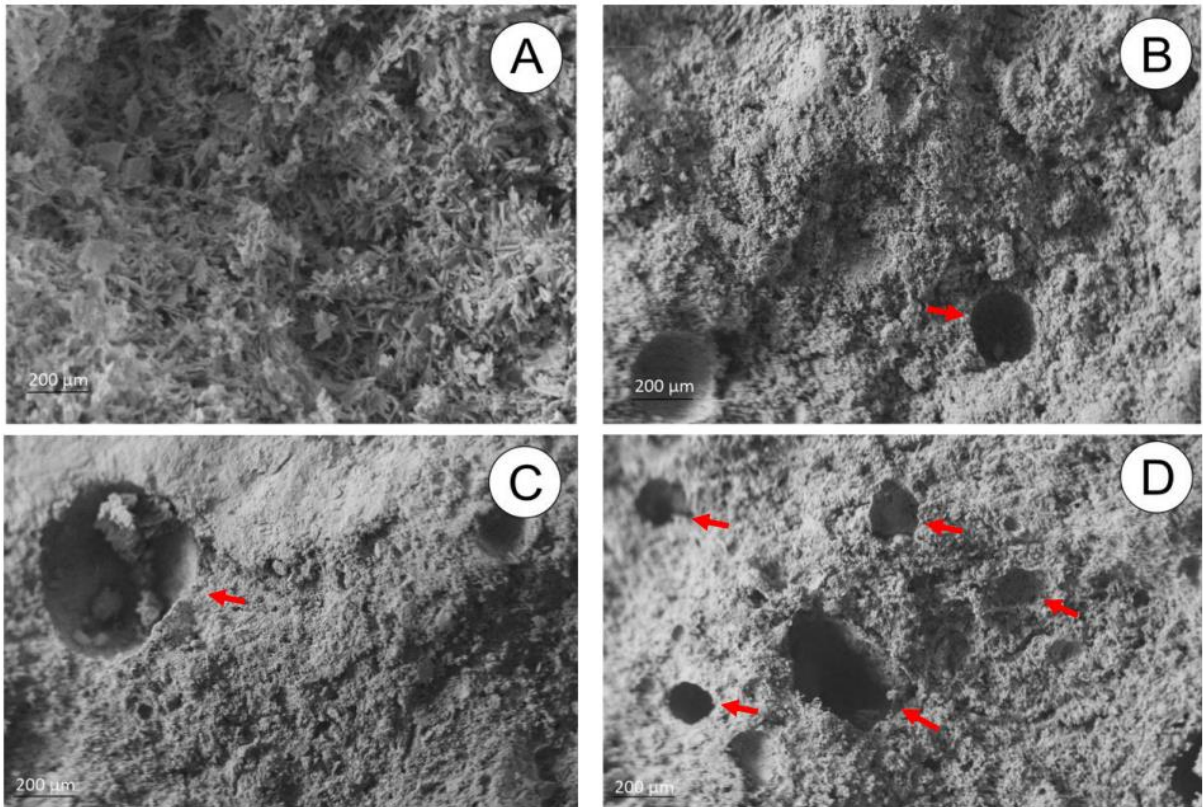
Sendo assim, estudos envolvendo nanocelulose em matriz de gesso ainda estão em estágios iniciais, e como foi visto, existe muita discrepância de resultados envolvendo nanocelulose em matrizes cimentícias, e isto ocorre por diversos fatores, como método de obtenção do nanomaterial, quantidade, dispersão, interação com a matriz, dentre outros fatores. Porém diversos pesquisadores conseguiram aumentos significativos de resistência mecânica em matriz cimentícia utilizando CNCs ou CNFs, logo, espera-se que em matriz de gesso também se consiga melhores resultados, principalmente mecânicos.

3.3 Avaliação microestrutural

As Figuras 7A, 7B, 7C e 7D apresentam as micrografias de microscopia eletrônica de varredura (MEV) feitas nos compósitos sem incorporações de reforços (0%) e incorporados

com 0,5%, 1,0% e 1,5% de CNFs respectivamente, sendo as amostras analisadas obtidas após o ensaio de flexão.

Figura 6 - Eletromicrografia de varredura das amostras contendo CNFs em matriz de gesso na ampliação de 100x. (A) Sem adição de CNFs; (B) 0,5% de CNFs; (C) 1,0% CNFs; (D) 1,5% CNFs.



As eletromicrografias das amostras dos compósitos ajudam a explicar alguns dos resultados obtidos. Ao analisar a Figura 7 (A), é possível observar cristais de gipsita alongados, prismáticos e em formato de agulhas, que não foi observado nas outras micrografias. Observou-se também, que a adição de CNFs no gesso acarretou na formação de espaços vazios na superfície (B, C, D). Esses espaços não são interessantes para propriedades mecânicas dos materiais, pois podem ser possíveis pontos de ruptura, quando o material é submetido a forças externas. Como foi observado nos ensaios de flexão e compressão, sendo assim, é preciso melhorar a interação CNFs-matriz, a fim de evitar a presença desses espaços vazios que prejudicaram a resistência mecânica.

4 CONCLUSÕES

Os resultados se mostraram satisfatórios tendo em vista que as CNFs são sustentáveis, baratas e altamente disponíveis, podendo ser obtidas até mesmo de resíduos, logo é possível criar um material inovador com alto valor agregado.

A incorporação de nanocelulose se mostrou viável nesse estudo para teores baixos (de até 0,69%) garantindo menor absorção de água e maior densidade aparente, porém, não alterou significativamente a resistência à compressão, e mesmo diminuindo significativamente a resistência à flexão, com teores mais baixos, a resistência não foi muito prejudicada, e todos os corpos de prova atenderam a normativa.

Com o aumento dos teores (acima de 0,69%), observou-se maior absorção de água em consequência do aumento de espaços vazios e diminuição da densidade aparente, entretanto, outros estudos ainda estão em andamento para evoluir na engenharia de novos produtos de gesso com CNFs, sendo que alguns fatores relacionados ao processo necessitam ser melhor explorados.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras e à FAPEMIG, que colaboraram para a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

- BARNAT-HUNEK, D.; SZYMAŃSKA-CHARGOT, M.; JAROSZ-HADAM, M.; ŁAGÓD, G. Effect of cellulose nanofibrils and nanocrystals on physical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 223, p. 1–11, 2019.
- BEDIAN, L.; A.M. VILLALBA-RODRÍGUEZ, G. *et al.*, Bio-based materials with novel characteristics for tissue engineering applications – a review, **Int. J. Biol. Macromol.**, [S.l.], v. 98, p. 837–846, 2017.
- CAO, Y.; PABLOZAVA, T.; YOUNGBLOOD, J.; MOON, R.; WEISS, J. The influence of cellulose nanocrystal additions on the performance of cement paste. **Cement and Concrete Composites**, [S.l.], v. 56, p. 73-83, February. 2015.
- EUROPEAN STANDARDS. **EN 13279-2**: gypsum binders and gypsum plasters, part 2: test methods. Pilsen, 2006b.
- EVE, S.; M. GOMINA, A. GMOUH, A. SAMDI, R. MOUSSA, G. Microstructural and mechanical behaviour of polyamide fibre-reinforced plaster composites, **J. Eur. Ceram. Soc.**, [S.l.], v. 22, p. 2269–2275, 2002.
- EVE, M. GOMINA, J. HAMEL, G. ORANGE, Investigation of the setting of polyamide fibre/latex-filled plaster composites, **J. Eur. Ceram. Soc.**, [S.l.], v. 26, p. 2541–2546, 2006.
- FONSECA, C. S.; SILVA, T. F. da; SILVA, M. T.; OLIVEIRA, I. R. C.; MENDES, R. F.; HEIN, P. H. G.; MENDES, L. M.; TONOLI, G. H. D. Micro/nanofibrilas celulósicas de Eucalyptus em fibrocimento extrudados. **Cerne**, [S.l.], v. 22, n. 1, p. 59-68, 2016.
- GHAHARI, S.; ASSI, L.N.; ALSALMAN, A.; ALYAMAÇ, K.E. Fracture Properties Evaluation of Cellulose Nanocrystals Cement Paste. **Materials**, [S.l.], v. 13, n. 25, p. 7. 2020.
- GORDINA, A.F.; TOKAREV, JU, V.; JAKOVLEV, G.I.; KERENE, J.A.; SYCHUGOV, S.V.; MOHAMED, A.E. S. 2013. Evaluation of the Influence of Ultradisperse Dust and Carbon Nanostructures on the Structure and Properties of Gypsum Binders, **Procedia Engineering Modern Building Materials, Structures and Techniques**, [S.l.], v. 57, p. 334-342, 2013.
- KREJSOVÁ, J.; DOLEŽELOVÁ, M.; PERNICOVÁ, R.; SVORA, P.; VIMMROV, A. The influence of different aggregates on the behavior and properties of gypsum mortars. **Cem. Concr. Compos**, [S.l.], v. 92, n. 188A, 2018.
- LAZARO, A.; YU, Q.L.; BROUWERS H.J.H. 4 – Nanotechnologies for sustainable construction. **Sustainability of Construction Materials** (Second Edition). [S.l.], Woodhead Publishing, 2016.
- MAZLAN, D.; KRISHNAN, S.; DIN, M.F.M.; TOKORO, C.; KHALID, N.H.A.; IBRAHIM, I.S.; TAKAHASHI, H.; KOMORI, D. Effect of Cellulose Nanocrystals Extracted from Oil Palm Empty Fruit Bunch as Green Admixture for Mortar. **Sci. Rep.**, [S.l.], v. 10, p. 6412. 2020.

NASIR, M.; MUHAMMAD, A.; AZIZ, M.Z.; NOMAN, A.; TAG, N. H.; MOATH, K.A.; MOHAMMAD, S.M.; WALID, A.K.; MAMDOUH, A. A.H. Engineered cellulose nanocrystals-based cement mortar from office paper waste: Flow, strength, microstructure, and thermal properties, **Journal of Building Engineering**, [S.l.], v. 51, 2022,

NINDIYASARI, F. *et al.* "Characterization and mechanical properties investigation of the cellulose/gypsum composite". **Journal of Composite Materials**, Lancaster, v. 50, n. 5, p. 657-672, 2016.

PERVYSHIN G.N.; YAKOVLEV, G.I.; GORDINA, A.F.; KERIENE, J.; POLYANSKIKH, I.S.; H.-B. F.; RACHIMOVA, N.R.; BURYANOV, A.F. "Water Resistant gypsum composition with man-made modifiers" 2017.

PEDRENO-ROJAS, M.A.; FLORES-COLEN, I.; BRITO, J.; RODRÍGUEZ-LINAN, C. Influence of the heating process on the use of gypsum wastes in plasters: Mechanical, thermal and environmental analysis. **J. Clean. Prod.**; [S.l.], v. 215, 444–457, 2019.

PISARENKO, Z.H.V.; IVANOV, L.A; WANG, Q. Nanotechnology in Construction: State of the Art and Future Trends. **Nanotechnologies in Construction**, [S.l.], v. 12, n. 4, p. 223–231, 2020.

REZA, M.; BOLUK, Y.; BINDIGANAVILE, V. The effect of cellulose nanocrystal (CNC) particles on the porosity and strength development in oil well cement paste. **Constr. Build. Mater**, [S.l.], v. 205, p. 456–462, 2019.

SALAS, C. T.; NYPELO, C. *et al.* Nanocellulose properties and applications in colloids and interfaces, **Curr. Opin. Colloid Interface Sci.**, [S.l.], v. 19, p. 383–396, 2014.

TONOLI, G.H.D.; SANTOS, S.F.; JOAQUIM, A.P.; SAVASTANO JR., H. Effect of accelerated carbonation on cementitious roofing tiles reinforced with Lignocellulosic fibre. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 24, p.193-201, 2010.

TRACHE, D.; TARCHOUN, A.F. *et al.* Nanocellulose: from fundamentals to advanced applications, **Front. Chem.**, [S.l.], v. 8, p. 392, 2020.

VANIN, D.V.F.; ANDRADE, V.D.; FIORENTIN, T.A.; RECOUVREUX, D.D.O.S.; CARMINATTI, C.A.; AL-QURESHI, H.A. Cement pastes modified by cellulose nanocrystals: A dynamic moduli evolution assessment by the Impulse Excitation Technique. **Mater. Chem. Phys.**, [S.l.], v. 239, p. 122-138, 2020.

ARTIGO 3 – AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO NANOTALCO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MATRIZ DE GESSO

RESUMO

O uso de cargas com dimensões reduzidas na faixa de nanômetros permitiu projetar e criar novos materiais chamados nanocompósitos, com melhorias nas propriedades físicas e mecânicas, sendo promissores para componentes de construção em termos de resistência à compressão, densidade, porosidade e novas aplicações. Neste contexto, pesquisas relacionadas à adição de nanomateriais para melhoria das propriedades mecânicas e físicas do gesso de construção têm sido desenvolvidas. Um nanomaterial altamente disponível, barato e com ótimas propriedades é o nanotalco. Nesse trabalho, adicionou-se nanotalco na matriz de gesso nos teores de 0%, 0,5 %, 1 %, 1,5 % e 2 % em substituição à massa de gesso. A fim de avaliar as propriedades físicas e mecânicas desse material modificado foram realizados os ensaios de densidade aparente, absorção de água, resistência à compressão e resistência à flexão. Os nanocompósitos produzidos com nanotalco obtiveram bons resultados físicos e mecânicos, uma vez que até 0,9 % de inserção do nanomaterial houve aumento de até 1,8% na densidade aparente, aumento de até 24,12 % na resistência à compressão, diminuindo a absorção de água em até 6,23 %, não alterando significativamente a resistência à flexão. Em suma a incorporação do nanotalco até a concentração de 0,9 % foi viável e se mostrou promissora, visto que preencheu os espaços vazios da matriz de gesso, garantindo uma força maior entre as partículas e, conseqüentemente, melhorando as suas propriedades.

Palavras-chave: Nanotecnologia. Nanomateriais. Talco.

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF NANOTALC ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE PLASTER MATRIX

ABSTRACT

The use of fillers with reduced dimensions in the nanometer range allowed the design and creation of new materials called nanocomposites with improvements in physical and mechanical properties, being promising for building components in terms of compressive strength, density, porosity and new applications. In this context, research related to the addition of nanomaterials to improve the mechanical and physical properties of building plaster has been developed. A highly available, inexpensive nanomaterial with excellent properties is nanotalc. In this work, nanotalc was added to the gypsum matrix at levels of 0 %, 0.5 %, 1.0 %, 1.5 % and 2.0 % to replace the gypsum mass. In order to evaluate the physical and mechanical properties of this modified material, tests of apparent density, water absorption, compressive strength and flexural strength were performed. The nanocomposites produced with nanotalc obtained good physical and mechanical results, since up to 0.9 % of insertion of the nanomaterial there was an increase of up to 1.8% in the apparent density, an increase of up to 24.12% in the compressive strength, reducing the absorption of water up to 6.23%, without significantly changing the flexural strength. In short, the incorporation of nanotalc up to a concentration of 0.9% was feasible and proved to be promising, since it filled

the empty spaces of the plaster matrix, guaranteeing a greater force between the particles and consequently improving its properties.

Keywords: Nanotechnology. Nanomaterials. Talc.

1 INTRODUÇÃO

O gesso como material de construção é ecologicamente correto, visto que não emite dióxido de carbono no seu processo de produção, apresenta excelentes propriedades térmicas e acústicas, ausência de retração por secagem, resistência ao fogo, endurecimento rápido e excelente acabamento superficial quando comparado ao cimento (BUTAKOVA *et al.*, 2016). No entanto, o gesso apresenta baixa resistência à água e resistência mecânica inadequada, especialmente sob condições de maior umidade e, portanto, são usados, principalmente em ambientes internos. Sendo assim, a expansão do escopo de sua aplicação requer a melhoria das características físicas e mecânicas dos produtos à base de gesso (YAKOVLEV *et al.*, 2015).

O uso de cargas com dimensões reduzidas na faixa de nanômetros permitiu projetar e criar novos materiais chamados nanocompósitos com melhorias nas propriedades físicas e mecânicas, sendo promissores para componentes de construção em termos de resistência à compressão, densidade, porosidade e novas aplicações (DAHLAN, 2021). A aplicação de componentes de tamanho nano já revolucionou áreas como da eletrônica e energia, medicina, dentre outras, sendo que recentemente, a nanotecnologia está se espalhando para diferentes áreas, sendo uma delas, a tecnologia da construção, a nanotecnologia pode essencialmente ser aplicada a todos os componentes da construção, reinventando os materiais (DAHLAN, 2021).

Neste contexto, pesquisas relacionadas à adição de nanomateriais para melhoria das propriedades mecânicas e físicas do gesso têm sido desenvolvidas, como por exemplo, Nindiyasari *et al.* (2016) avaliaram os impactos mecânicos sofridos com a adição de 1 e 2% de celulose nanofibrilada. Tokarev *et al.* (2017), Gordina *et al.* (2013) e Derevianko *et al.* (2018), avaliaram as modificações no gesso usando nanotubos de carbono. Matveeva *et al.* (2020) estudaram o efeito do nanomodificador de carbono (HFNCM) na estrutura e propriedades da pedra de gesso. Li *et al.* (2021) estudaram a influência da nano-sílica no gesso de dessulfurização de gases de combustão (FGD).

Existe um grande número de estudos que relatam ganhos com ênfase nas propriedades mecânicas quando adicionadas partículas inorgânicas, como talco (HADAL *et al.*, 2016) mica (KUELPMANN *et al.*, 2005), carbonato de cálcio (TJONG *et al.*, 2003) em matriz polimérica. O talco natural é uma carga mineral amplamente utilizada em polímeros na forma de pó micrométrico e nanométrico, principalmente devido ao seu baixo custo (HADAL; MISRA, 2004; YOUSFI *et al.*, 2013). O talco é o mineral mais macio conhecido, com dureza Mohs na escala 1 (YOUSFI *et al.*, 2013). Devido a sua geometria lamelar (as faces basais representam 90% da superfície total) tem um perfil hidrofóbico característico (SAVINI; ORÉFICE, 2020). No entanto, em matriz de gesso não foi encontrado estudos a respeito da inserção de nanotalcos.

Tendo em vista que a nanotecnologia pode criar materiais com novas propriedades e funcionalidades e que o nanotalco é um nanomaterial altamente disponível, barato e com propriedades interessantes, o objetivo desse estudo é incorporar diferentes teores de nanotalco na matriz de gesso, avaliando sua influência nas propriedades mecânicas e físicas, com o intuito de melhorar sua resistência à água e aumentar sua resistência mecânica, para assim, ampliar o escopo de utilização do gesso como material de construção. Como estudos relacionados a esse tema ainda são iniciais, há a necessidade de um maior aprofundamento acerca da junção desses materiais.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Obtenção e caracterização da matéria prima

Para a produção dos compósitos, foi utilizado como matriz o gesso comercial fino para fundição, proveniente do polo gesseiro do Araripe, estado de Pernambuco. Esse material apresenta massa específica aparente de 781 kg/m^3 , tempo de início e fim de pega de 9 e 22 minutos respectivamente, e módulo de finura de 0,85.

Como reforço utilizou-se nanotalco, que é um Mineral particulado de silicato de magnésio hidratado (Talco) $\text{Mg}_3(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2$, pertencente à família dos filossilicatos extraído de jazidas da empresa Xilolite, situada na cidade de Brumado, no estado da Bahia, no Brasil. O nanotalco foi obtido por processo de flotação, sendo puro, com estrutura lamelar, branco, isento de asbestos. A Tabela 1 mostra as informações químicas e físicas do talco CQ-T-004, fornecidas pela Xilolite.

Tabela 1 - Análise química e física do nanotalco.

ANÁLISE QUÍMICA	VALORES TÍPICOS
SiO ₂	57,50%
MgO	34,60%
CaO	0,48%
Al ₂ O ₃	0,50%
Fe ₂ O ₃	0,40%
Perda ao fogo (1000°C)	6,50%
Solúveis em ácido (HCl)	1,50%
pH (solução 10%)	8,5
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
Umidade (ex-fábrica - % máx.)	0,5
Densidade real (g/cm ³)	2,7
Dureza (Mohs)	1

Fonte: Da autora (2022).

2.2 Produção dos compósitos

Para fins comparativos foram produzidos compósitos com variação da porcentagem de reforço inserido, totalizando cinco diferentes composições (TABELA 1). Ao todo foram produzidos trinta corpos de prova, sendo seis para cada tratamento.

Tabela 2 - Diferentes composições dos compósitos produzidos (relação massa/massa).

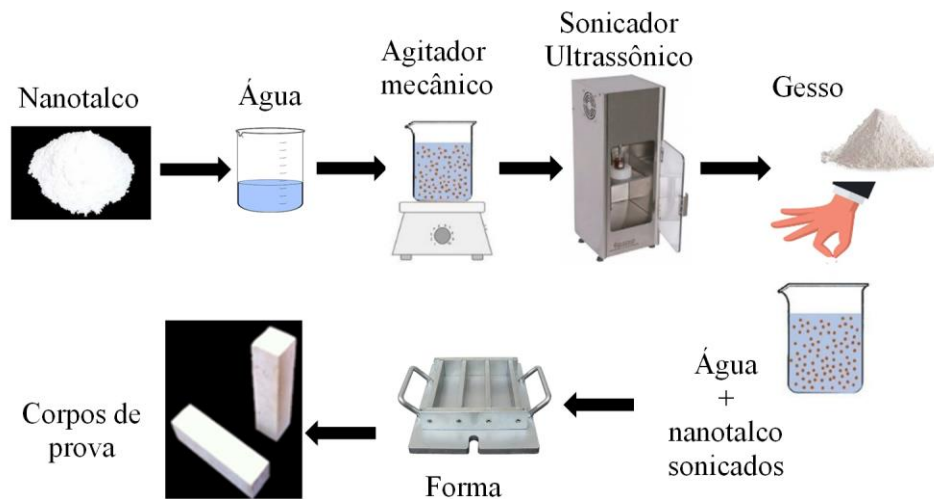
TRATAMENTO	COMPOSIÇÕES	
	GESSO (%)	NANOTALCO (%)
T1	100	0
T2	99,995	0,5
T3	99,99	1
T4	99,985	1,5
T5	99,98	2

Fonte: Da autora (2022).

Os teores de nanotalco foram 0 %; 0,5 %, 1 %, 1,5 % e 2 % em relação à massa de gesso. Os corpos de prova foram produzidos com o auxílio de moldes metálicos com dimensões internas de 40 x 40 x 160 mm, conforme especificações da EN 13279-2 (CEN), 2006), o processo de produção dos compósitos seguiu o esquema apresentado na Figura 1. O nanotalco inicialmente foi colocado em um béquer com a água de cada traço e agitado em um agitador mecânico por um período de 24 horas para esfoliação de suas camadas de clivagem. A relação água/gesso utilizada para a produção dos compósitos foi de 0,6 sendo esse valor escolhido por ser uma relação a/g que garante boa trabalhabilidade da pasta de gesso e ter sido utilizado em trabalhos semelhantes como de Gordina *et al.* (2013) e Pervyshin *et al.* (2016),

que também utilizaram este fator ao estudarem a incorporação de nanomateriais na matriz de gesso.

Figura 1 - Esquema representativo da produção dos corpos de prova de gesso com nanotalco.



Fonte: Da autora (2022).

Após o período de 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e armazenados em local seco, ventilado e livre da ação de intempéries. Durante o período de sete dias os mesmos foram reorientados diariamente para garantir uma cura uniforme. Com 28 dias realizaram-se os ensaios.

2.3 Avaliação das propriedades físicas e mecânicas

Para a determinação da massa específica seguiu-se a NM 23 (AMN, 2000), já para absorção de água por imersão seguiu-se a EN 520 – absorção de água após 2 horas.

Para obtenção das resistências mecânicas dos corpos de prova, foram realizados ensaios de flexão e compressão em máquina universal de ensaios de acordo com a norma UE 13279-2 (EN, 2008). Para o ensaio de flexão, os corpos de prova apresentavam dimensões de 40 x 40 x 160 mm, a distância entre os apoios da máquina foi de 100 mm e a carga foi aplicada no centro dos mesmos até a ruptura. Já para o ensaio de compressão, as dimensões dos corpos de prova foram de 40 x 40 x 40 mm, sendo também, aplicada a carga até sua ruptura. A partir desses ensaios foi determinada a resistência de ruptura à flexão (MOR) e a resistência à compressão (RC) dos corpos de prova.

2.4 Avaliação microestrutural

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada para caracterizar a superfície de ruptura dos corpos de prova após o ensaio mecânico de flexão na região de fratura, com o objetivo de verificar a interação entre a matriz de gesso e o nanoreforço, observando se houve preenchimento dos espaços vazios da matriz pelos nanotalcos. Para cada amostra, os corpos de prova tiveram seu tamanho ajustado para aproximadamente $1 \times 1 \times 1$ cm. Estes foram secos em estufa a 70°C por um período de 10 horas e após isso sempre mantidos em recipientes contendo sílica-gel para manutenção da secagem. Em seguida, estes corpos de prova foram posicionados sobre porta amostras de alumínio (*stubs*) e cobertos com carbono, utilizando-se o equipamento evaporador de carbono Bal-tec. Após este tratamento, o microscópio eletrônico de varredura (MEV) FEG-UHR Clara Tescan com detector de raios-x X-Flash6-60 Bruker (MEV/EDS) no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural da Universidade Federal de Lavras foi devidamente calibrado para a condição de análise de elementos. A observação em MEV com análise de EDS foi realizada com magnificação de 200.000 x para quantificação relativa dos elementos, obtenção dos espectros de energia dos elementos, estudo de distribuição dos elementos (função *mapping*) para cada amostra, mantendo-se a distância de trabalho (WD) próximo de 9 mm, valor de Kcps maior que 30 unidades, voltagem em 20 KeV, Bean Current em torno de 1 nA. Imagens feitas utilizando detector de elétrons secundários foram obtidas com magnificações de 2.000, 20.000 e 200.000 x.

2.5 Análise dos resultados

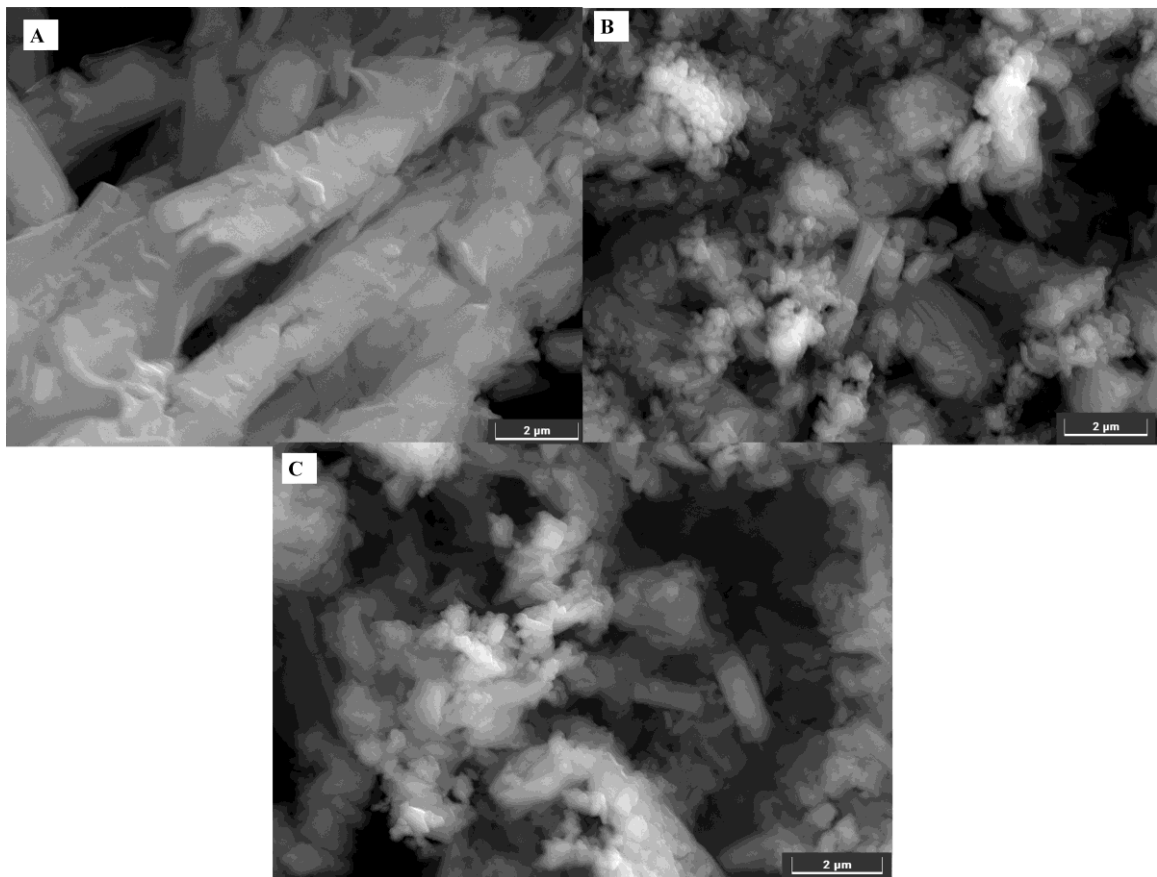
Os resultados das análises físicas e mecânicas foram avaliados utilizando delineamento inteiramente casualizado e submetidos à análise de variância e regressão, a 5% de significância, com o auxílio do software Sisvar.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Avaliação microestrutural e EDS

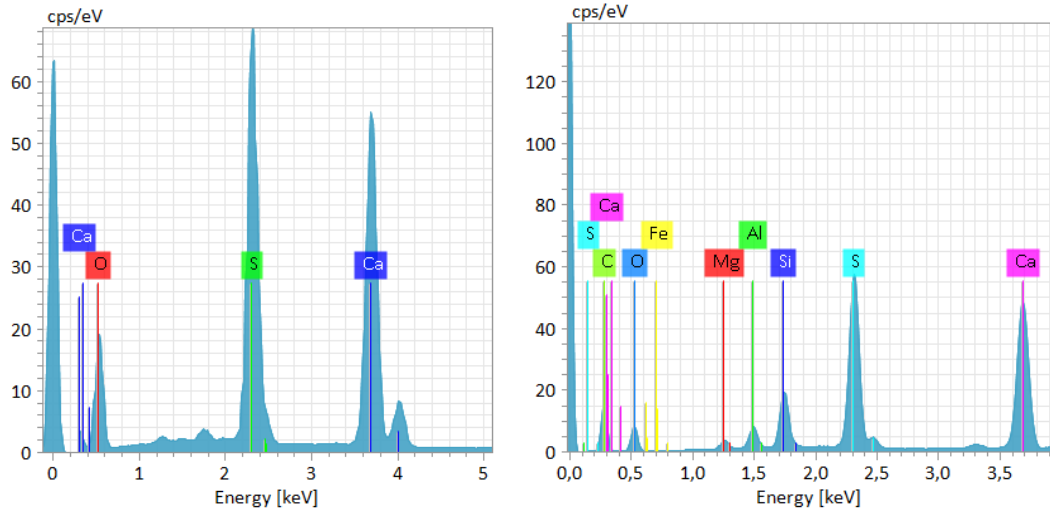
Na Figura 2A pode-se observar cristais de gipsita alongados, prismáticos e em formato de agulhas, a adição de 1 % de nanotalco (FIGURA 2B) modificou a morfologia dos cristais de gesso, resultando na alteração da microestrutura, passando a apresentar uma estrutura mais densa. No entanto, quando adicionado 1,5 % de nanotalco, (FIGURA 2C), apesar da morfologia ter mudado, observou-se maior quantidade de espaços vazios.

Figura 2 - Eletromicrografia de varredura das amostras contendo nanotalco em matriz de gesso. (A) Sem adição de nanotalco; (B) 1 % de nanotalco; (C) 1,5 % de nanotalco.



Fonte: Da autora (2022).

Figura 3 - (a) EDS da amostra referência (b) EDS da amostra com 1 % de nanotalco.



Fonte: Da autora (2022).

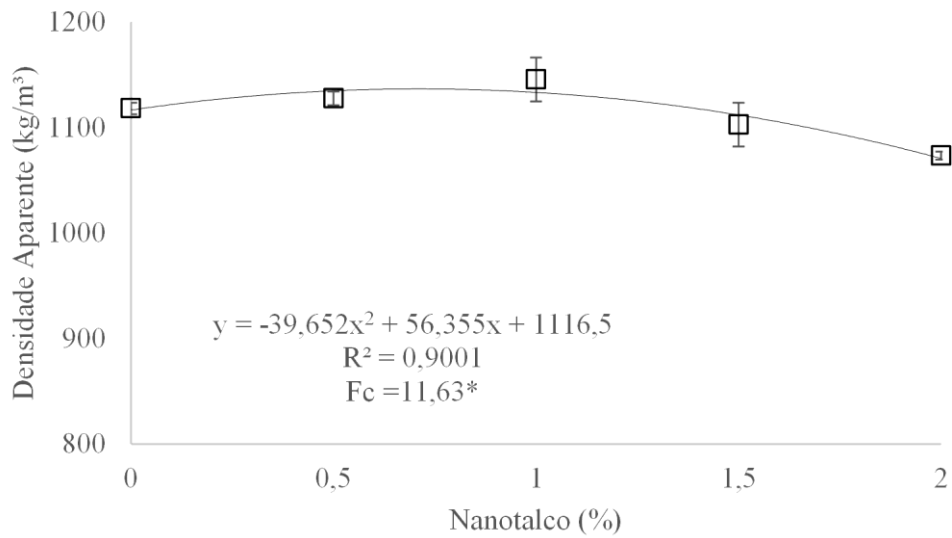
A análise do EDS (FIGURA 3a) comprova a presença dos elementos constituintes das fases cristalinas correspondentes ao gesso β , apresentando cálcio, oxigênio e enxofre. Já a Figura 3b mostra além dos constituintes do gesso, a presença de silício, alumínio, magnésio, ferro e carbono, constituintes do nanotalco conforme a Tabela 1.

Pervyshin *et al.* (2017) incorporaram na matriz de gesso resíduo de pó metalúrgico, e relataram que houve formação de uma estrutura densa de gesso sólido, devido aos compostos pouco solúveis à base de hidrossilicatos de cálcio e alumínio que foram formados. Nesse trabalho, espera-se que ocorra o mesmo, devido ao nanotalco também apresentar esses elementos químicos.

3.2 Propriedades físicas dos compósitos

Em relação à densidade aparente (Figura 2) houve uma ligeira tendência de aumento até certo nível de inserção do nanotalco seguido de diminuição, sendo que o ajuste foi significativo e de acordo com a equação da reta, o ponto máximo da densidade aparente foi com uma porcentagem de 0,7 % de nanotalco, tendo um aumento de 1,8% quando comparado com o tratamento testemunha.

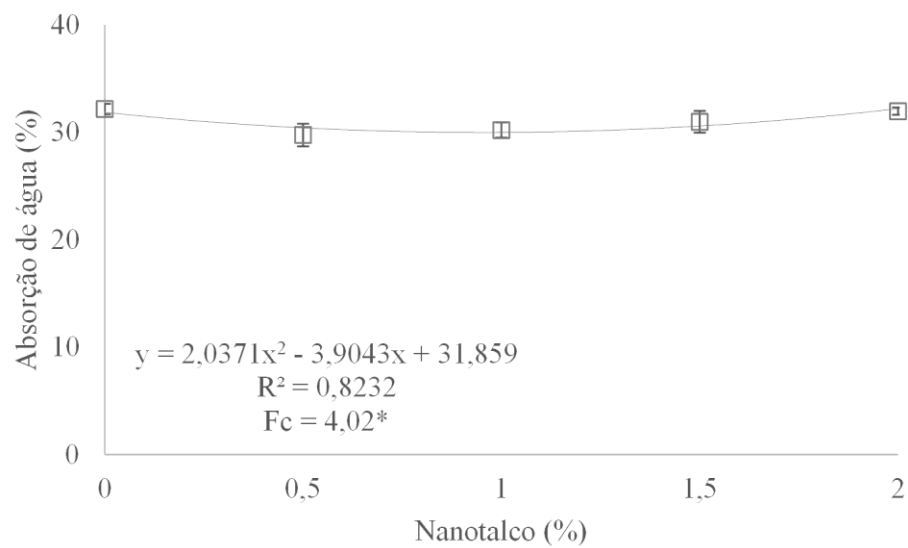
Figura 2 - Densidade aparente dos compósitos produzidos.



Fonte: Da autora (2022).

Para a absorção de água em 2 horas de imersão (FIGURA 3), houve uma ligeira diminuição na absorção de água seguida de um ligeiro aumento, sendo que através do ajuste que foi significativo, o ponto mínimo da curva característica foi com 0,9% de incorporação de nanotalco, tendo uma diminuição de 5,86 % na absorção de água quando comparado com o tratamento testemunha.

Figura 3 - Absorção de água dos compósitos produzidos.



Fonte: Da autora (2022).

Observa-se que até determinada porcentagem de inserção do nanomaterial houve aumento na densidade aparente e, conseqüentemente, diminuição na absorção de água, tendo posteriormente diminuição na densidade aparente e aumento na absorção de água. Este comportamento pode ter ocorrido devido ao preenchimento de poros até determinada porcentagem de inclusão dos nanomateriais, sendo que, com porcentagens maiores, pode ter ocorrido uma aglomeração dos mesmos.

Uma boa dispersão das partículas na matriz é fundamental para prevenir aglomerados e os chamados ‘pontos fracos’. Dessa forma, o fato do nanotalco ser hidrofóbico, porcentagens maiores pode ter ocasionado uma má distribuição das partículas na matriz no processo de produção dos corpos de prova, tornando-os menos homogêneos. Isso porque, em ambiente aquoso, as plaquetas de nanotalco não se dispersam prontamente com um elemento de estabilidade (CALABRIA-HOLLEY *et al.*, 2017).

O aumento da porosidade é muito relatado na literatura quando se trata de compósitos e nanocompósitos à base de gesso, e o principal motivo apontado é a formação de canais nas interfaces matriz-reforço (RIBEIRO *et al.*, 2014; SHIROMA; CAMARINI; BERALDO, 2016; THUMBS; KOHLER, 1996). Visto isso, entende-se que o grau de formação desses canais está relacionado ao nível de interação entre estas fases.

Diversos são os fatores que prejudicam essa interação e causam incompatibilidade entre as fases, podendo ser citados as propriedades químicas dos materiais utilizados como reforço, o processo de hidratação e cristalização do gesso, o tamanho e formato das partículas ou fibras, a dispersão, dentre outros (DEREVIANKO; KONDRATIEVA; HRYSHKO, 2018; HINCAPIE; CINCOTTO, 1997; NINDIYASARI *et al.*, 2016; TOKAREV *et al.*, 2017; VELOSO *et al.*, 2021).

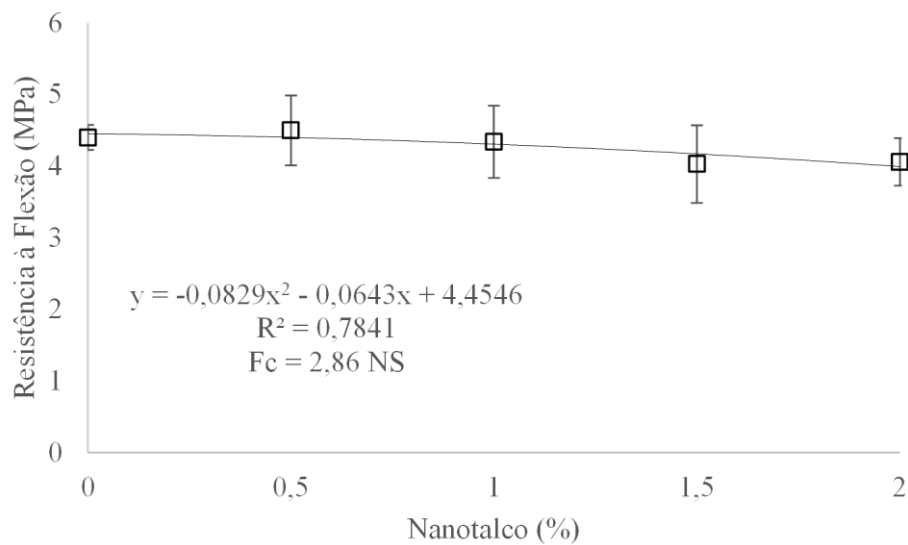
Pervyshin *et al.*, (2017) incorporaram na matriz de gesso resíduo de pó metalúrgico e obtiveram melhora da resistência à água, visto que o pó metalúrgico, durante a hidratação do gesso favoreceu a formação de uma fase amorfa de hidrossilicatos de alumínio e cálcio, que protegeu os cristais de gesso da dissolução. O nanotalco como visto na análise de EDS também apresentou estes elementos químicos.

3.2 Propriedades mecânicas dos compósitos

No ensaio de flexão estática (FIGURA 4), o resultado obtido mostra que, de acordo com o ajuste estatístico, não houve alteração significativa quanto à resistência à flexão à medida que se aumentava a incorporação de nanotalco.

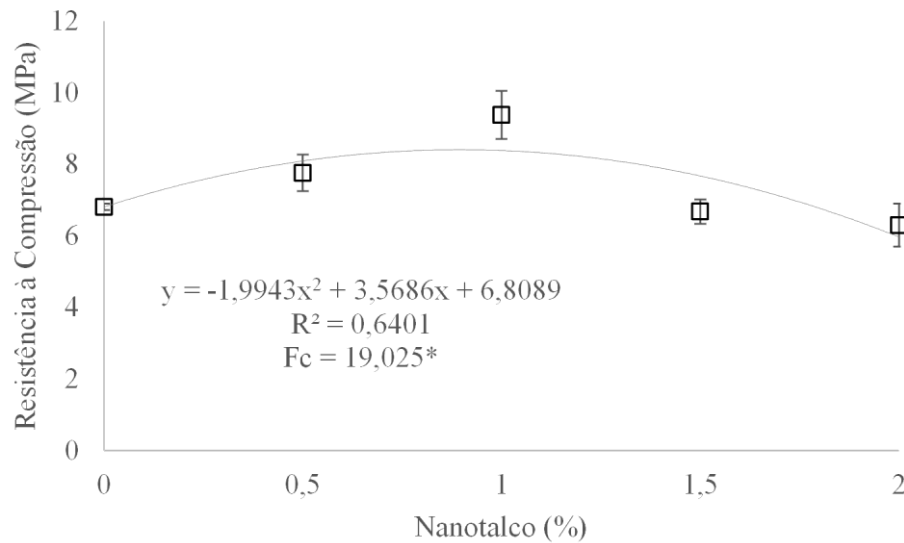
Já no ensaio de compressão (FIGURA 5), os resultados mostram que houve melhoria na resistência até determinada porcentagem de inserção do nanomaterial, seguido de diminuição. De acordo com o ajuste estatístico que foi significativo, com uma inserção de 0,9 % de nanotalco, houve um aumento de 24,12% na resistência à compressão comparando com a testemunha.

Figura 4 - Módulo de ruptura à flexão dos compósitos produzidos.



Fonte: Da autora (2022).

Figura 5 - Resistência à compressão dos compósitos produzidos. * = diferença estatisticamente significativa.



Fonte: Da autora (2022).

Na literatura é possível encontrar uma variedade de respostas aos ensaios mecânicos em compósitos e nanocompósitos de matriz de gesso, e isso se deve ao tipo de reforço inserido, a dispersão deste na matriz, a quantidade, dentre outros fatores.

Os valores de referência, ou seja, compósitos sem adição de nanomateriais, apresentaram valores de resistência à flexão média de 4,45 MPa, próximo ao encontrado por Nindiyasari *et al.* (2016), Rivero *et al.* (2014) e Serna *et al.* (2012), que encontraram 5,65; 5,11 e 5,45 Mpa, respectivamente.

Derevianko, Kondratieva e Hryshko (2018), em seu trabalho com nanotubos de carbono na matriz de gesso, observaram a mesma tendência encontrada aqui para a resistência à compressão e flexão sendo que, até um certo nível de inserção do nanoreforço, as resistências aumentaram gradativamente, e depois, aumentando ainda mais o teor, estas foram reduzidas.

Nindiyasari *et al.* (2016) observaram aumento na resistência à compressão da matriz de gesso de 18,37 % quando adicionado 1% de nanofibrilas de celulose (NFCs) comparado com o tratamento sem incorporação de NFCs, os autores atribuíram esse aumento nas resistências o fato das NFCs terem preenchido os poros dos compósitos.

Long *et al.* (2021) estudaram a incorporação de talco em poli(etileno 2,5-furanodicarboxilato) (PEF), o talco reforçou drasticamente as propriedades mecânicas dos compósitos, e uma baixa carga de 1,0% em peso de talco levou a incrementos médios

de resistência à flexão em 49%, os autores justificam esse aumento devido a boa interação interfacial originada das ligações de hidrogênio entre a carga e a matriz PEF.

Da mesma forma, como ocorre para as propriedades físicas, a porosidade, microfissuras presentes no compósito, o formato e tamanho das partículas, que podem provocar heterogeneidade e segregação em áreas do compósito, a fraca interface reforço/matriz são as principais influências nas propriedades mecânicas (DAI; FAN, 2015; KHALIL *et al.*, 2014; KHALIL; TAWFIK; HEGAZY, 2018; ROCHA; MIRANDA; PARCHEN, 2019; SHIROMA; CAMARINI; BERALDO, 2016). No caso do presente trabalho, com a inclusão do nanotalco, pode-se inferir que houve modificação nas propriedades físicas e mecânicas, principalmente com relação a resistência à compressão, que aumentou de maneira mais expressiva.

4 CONCLUSÕES

Quando adicionadas pequenas porcentagens de nanotalco (até 0,9%) na matriz de gesso, houve aumento de até 1,8% na densidade aparente, aumento de até 24,12% na resistência à compressão, diminuindo a absorção de água em até 5,86%, não alterando significativamente a resistência à flexão.

Através da análise microestrutural houve compatibilidade entre a matriz e o nanoreforço e homogeneidade na distribuição das partículas quando inserida pouca quantidade de nanotalco (até 0,9 %), sendo que, quando essa adição aumentou, observou-se uma matriz com mais espaços vazios, menos preenchida.

Em suma, a inclusão de nanotalco em pequenas quantidades (até 0,9%) na matriz de gesso, se mostra uma alternativa viável para melhorar as propriedades do gesso e ampliar cada vez mais sua utilização.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras e a FAPEMIG, que colaboraram para a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

- CALABRIA-HOLLEY, J. *et al.* Tailored montmorillonite nanoparticles and their behaviour in the alkaline cement environment. **Applied Clay Science**, [S.l.], v. 143, p. 67–75, jul, 2017.
- CEN. European Committee of Standardization. **EN 13279-2**. Gypsum binders and gypsum plasters. Part 2: Test methods. Bruxelas, 2006.
- CEN. European Committee of Standardization. **EN 13279-1**. Gesso e produtos à base de gesso para a construção; Parte 1: Definições e requisitos. Bruxelas, 2008.
- DAI, D.; FAN, M. Preparation of bio-composite from wood sawdust and gypsum. **Industrial Crops and Products**, [S.l.], v. 74, p. 417–424, 5 nov. 2015.
- DAHLAN, A. S. Impact of nanotechnology on high performance cement and concrete. **Journal of Molecular Structure**, [S.l.], v. 1223, 5 Jan. 2021.
- DEREVIANKO, V.; KONDRATIEVA, N.; HRYSHKO, H. Study of impact factors and the mechanism of gypsum binder hydration process in the presence of nanomodifiers. **French-Ukrainian Journal of Chemistry**, [S.l.], v. 6, n. 1, p. 92–100, 2018.
- GORDINA A.F.; TOKAREV JU.V.; JAKOVLEV G.I.; KERENE JÁ.; SYCHUGOV S.V.; ALI EL SAYED MOHAMED. 2013. Evaluation of the Influence of Ultradisperse Dust and Carbon Nanostructures on the Structure and Properties of Gypsum Binders, **Procedia Engineering Modern Building Materials, Structures and Techniques**, [S.l.], v. 57, p. 334–342, 2013.
- HINCAPIE, A. M.; CINCOTTO, M. A. Efeito de retardadores de pega no mecanismo de hidratação e na microestrutura do gesso de construção. **Ambiente Construído**, [S.l.], v. 1, n. 2, p. 07–16, 1997.
- KHALIL, A. A. *et al.* Effect of some waste additives on the physical and mechanical properties of gypsum plaster composites. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 68, p. 580–586, 2014.
- LI, J. CAO, Q. REN *et al.* Effect of nano-silica and silicone oil paraffin emulsion composite waterproofing agent on the water resistance of flue gas desulfurization gypsum, **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 287, 123–155, 2021.
- NINDIYASARI, F. *et al.* Characterization and mechanical properties investigation of the cellulose/gypsum composite. **Journal of Composite Materials**, [S.l.], v. 50, n. 5, p. 657–672, 2016.
- PERVYSHIN, G.N.; G.I. YAKOVLEV, A.F.; GORDINA, J.; KERIENE, I.S.; POLYANSKIKH, H.-B.; FISCHER, N.R.; RACHIMOVA, A.F. “**WaterResistant gypsum composition with man-made modifiers**,” 2017.

RIBEIRO, S. *et al.* Compósitos Obtidos de Resíduos de Papel, Reforçados com Pó de Serragem e de Gesso Composites Obtained from Waste Paper and Reinforced Sawdust and Plaster. **Engineering and Science**, [S.l.], v. 2, n. 1, p. 1–9, 2014.

ROCHA, T. M. S.; MIRANDA, L. F. R.; PARCHEN, C. F. A. Influência da composição granulométrica das partículas de resíduos de madeira nas propriedades de compósitos minerais: parte 2: gesso-madeira. **Ambiente Construído**, [S.l.], v. 19, n. 4, p. 195–206, 2019.

SHIROMA, L.; CAMARINI, G.; BERALDO, A. L. Effect of wood particle treatment on the properties of gypsum plaster pastes and composites. **Revista Materia**, [S.l.], v. 21, n. 4, p. 1032–1044, 1 out. 2016.

SERNA, A. *et al.* Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 35, p. 633–641, out. 2012.

THUMBS, J.; KOHLER, H.-H. Capillaries in alginate gel as an example of dissipative structure formation. **Chemical Physics**, [S.l.], v. 208, n. 1, p. 9–24, jul. 1996.

TOKAREV, Y. *et al.* Modification of Gypsum Binders by Using Carbon Nanotubes and Mineral Additives. **Procedia Engineering**, [S.l.], v. 172, p. 1161–1168, 2017.

VELOSO, M. C. R. DE A. *et al.* Produção e caracterização de compósitos à base de gesso reforçado com partículas de resíduo da agroindústria do cacau. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 1, 2021.