



Contribuição do uso de nanomateriais em matriz cimentícia por meio da manufatura aditiva visando uma construção sustentável

Marla Corso

Doutoranda, Universidade Positivo, Brasil.
marlacorso@hotmail.com

Maicon Douglas Leles da Silva

Mestre, Unicesumar, Brasil.
maiconleles@gmail.com

Flávia Aparecida Reitz Cardoso

Professora Doutora, UTFPR, Brasil.
reitz@utfpr.edu.br

Luciana Cristina Soto Herek Rezende

Professora Doutora, Unicesumar, Brasil.
lucianarezende17@gmail.com

Rodolfo Marques Sastre

Professor Doutor, Universidade Positivo, Brasil.
rodolfo.sastre@uol.com.br

RESUMO

Reduzir o impacto ambiental e cumprir com o compromisso social, respeitando o meio ambiente na promoção da sustentabilidade, em processos produtivos, tem sido debatido em diversos setores e, nos processos construtivos, a tecnologia é um aliado, pois a automatização e a inserção de componentes aos materiais, há uma diminuição de resíduos e melhora da qualidade das edificações. Diante disso, este estudo teve por objetivo avaliar a construtibilidade e a extrudabilidade na construção civil por meio da inserção de grafite e óxido de grafeno em matriz cimentícia. Os filamentos cimentícios produzidos foram avaliados quanto aos parâmetros físicos, químicos e mecânicos. Os resultados obtidos apontaram que a inserção tanto de grafite quanto de óxido de grafite na matriz cimentícia não interferiu na extrudabilidade e na construtibilidade do material. Foram obtidos valores de 9,34 MPa, 8,99 MPa e 8,91 MPa para a tração na flexão nas amostras acrescidas de 0,04% e 0,1% de grafite e 0,04% de óxido de grafeno, respectivamente. Quando avaliadas quanto à compressão axial, as amostras que continham óxido de grafeno com 0,1% e 0,2% e amostra de referência tiveram os valores de 127.546,00 MPa, 127.350,05 MPa, 126.844,12 MPa, respectivamente. A amostra com 0,1% de grafite apresentou comportamento positivo com relação ao teste de tração à flexão, compressão e menor deformação após a impressão, tornando viável a adição dos nanomateriais em filamento cimentício para a manufatura aditiva, de forma a possibilitar a produção de materiais mais resistentes.

PALAVRAS-CHAVES: Construção civil. Filamento cimentício. Construtibilidade. Extrusão.

1 INTRODUÇÃO

À luz de um grande número de construções em andamento, o impacto da indústria da construção civil nos ecossistemas tornou-se uma questão importante (ZOLFAGHARIAN *et al.*, 2012). Esses impactos ambientais adversos como resíduos, ruídos, poeira, resíduos sólidos e tóxicos, poluição do ar, poluição da água, mau cheiro, mudanças climáticas, uso do solo, operação com vegetação e emissões perigosas, têm sido significativos e irreversíveis ao meio ambiente. Além de configurar-se como uma das maiores exploradoras de recursos naturais renováveis e não renováveis (KAUR, 2012).

De acordo com dados do World Watch Institute (2022), a construção civil consome 40% de pedras brutas, cascalho e areia e 25% de madeira por ano. Também consome, anualmente, 40% de energia e 16% de água. A extração de recursos naturais é responsável por alterações irreversíveis no ambiente natural do campo e das zonas costeiras, tanto do ponto de vista ecológico como paisagístico. E a consequente transferência destas áreas para outros locais geograficamente dispersos culmina não somente no maior consumo de energia, mas também na maior quantidade de material particulado que se dispersa na atmosfera. As atividades de extração e construção de matérias-primas também contribuem para o acúmulo de poluentes na atmosfera (LIMA *et al.*, 2021).

Constantemente, são também lançadas poeiras e outras emissões incluindo substâncias tóxicas, como óxidos de nitrogênio e enxofre. Estas são liberadas durante a produção e transporte de materiais, assim como das atividades do local e são responsáveis por sérias ameaças ao ambiente (KAUR, 2012). Negligências no ambiente construtivo refletem ainda sérias consequências na biosfera e derramamentos tóxicos estão atingindo sistemas de águas subterrâneas e reservatórios (LIMA *et al.*, 2021). De acordo com Lima *et al.* (2021), cerca de 30% das terras do sistema estão sendo degradadas e, juntamente com os poluentes, estão esgotando a qualidade do meio ambiente. Além disso, um grande volume de resíduos sólidos é gerado.

Para Wu *et al.* (2021), a maioria dos resíduos de construção é desnecessária e muitos materiais de construção e demolição têm um alto potencial de reciclagem e reutilização. Embora seja possível, a reciclagem dos resíduos da construção é uma atividade demorada, a falta de

consciência ambiental entre os profissionais da área cria barreiras significativas e a maior parte do material reciclável tem sido lançado nos aterros sanitários. Os autores ainda afirmam que um plano de gerenciamento de resíduos poderia reduzir em até 15% os resíduos do local e uma economia de cerca de 50% nos custos de manuseio dos resíduos (WU *et al.*, 2021).

Terras outrora cultivadas foram transformadas pela construção civil ou perdidas por conta da extração e mineração de matérias-primas. Madeiras foram derrubadas para serem utilizadas tanto para o fornecimento de energia para a fabricação de materiais ou até mesmo diretamente como base para a construção. Tanto o desmatamento quanto a queima de combustíveis fósseis contribuem diretamente para o aquecimento e poluição do ar. Além disso, a indústria da construção é considerada um grande consumidor de energia e o uso de recursos finitos de combustíveis fósseis contribui, significativamente, para as emissões de dióxido de carbono (MARLON *et al.*, 2019; THOMAS *et al.*, 2020; LIMA *et al.*, 2021).

No contexto do desenvolvimento sustentável, é necessário que as indústrias produzam de forma mais eficiente, utilizando menor quantidade de recursos naturais e diminuindo a poluição causada. Vários recursos naturais são usados durante a execução de um projeto de construção, recursos estes que envolvem energia, terra, materiais e água (MARLON *et al.*, 2019). As operações dos equipamentos de construção também são responsáveis pelo consumo de recursos naturais, como eletricidade e óleo diesel e quando não são bem controlados, contribuem ainda mais para a poluição.

No entanto, conforme Daniyal *et al.* (2018), é possível, nos aspectos ambientais, realizar uma otimização dos recursos naturais, caracterizado no planejamento, construção e ocupação adequados à sustentabilidade dos ecossistemas. E a própria indústria da construção civil pode ser um grande expoente na gestão dos resíduos sólidos por meio da reutilização e reciclagem, por exemplo. Com isso, ela demonstrará, ao mesmo tempo em que utiliza e degrada boa parte do meio ambiente, também pode apresentar formas de mitigar esses impactos.

Por conta desta demanda, grandes investimentos na pesquisa têm acontecido, principalmente pelo fato de que esses materiais mais eficientes podem otimizar as propriedades no produto final e contribuir com a preservação dos recursos naturais, enquanto os processos podem proporcionar maior eficiência e desempenho (DANIYAL *et al.*, 2018). Destes, a manufatura aditiva é um processo que vem se destacando por sua eficiência e criação de objetos utilizando modelos digitais que possibilitam a produção sustentável de novos produtos. Por ser uma tecnologia recente e pouco explorada, um dos maiores desafios da impressão 3D no setor da construção é a capacidade de extrusão de matriz cimentícia com a inclusão de nanomateriais para a impressão de peças, estruturas e até mesmo a edificação por completo (BHARDWAJ *et al.*, 2019).

A aplicação de nanomateriais nestas matrizes cimentícias tem sido exitosa, pois possibilita a produção de materiais mais resistentes, com maior durabilidade, e ainda permite a adsorção do CO₂ presente na atmosfera. Além de contribuir para o desenvolvimento de produtos mais duráveis, diminuindo a necessidade de intervenções nas edificações e, conseqüentemente, reduzir a geração de resíduos que são lançados no ambiente (DANIYAL *et al.*, 2018). Ainda mais considerando que a produção de materiais mais sustentáveis e a implementação de sistemas de gestão ambiental e de responsabilidade social corporativa são ações também comprometidas com a Agenda 2030 e com o cumprimento dos Objetivos de

Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas, capazes de reduzir o impacto ambiental (DUBRAVSKÁ *et al.*, 2020; WU *et al.*, 2021).

Na argamassa de revestimento, a incorporação de nanomateriais almeja a obtenção de melhores resultados mecânicos para reduzir as patologias na construção civil (DANIYAL *et al.*, 2018). Além disso, permite a obtenção de estruturas com melhor qualidade e economias interessantes associadas à redução de materiais. É o que ocorre com a utilização do óxido de grafeno, que pode melhorar a estrutura da matriz cimentícia aumentando sua permeabilidade para resistir ao ataque de produtos químicos (POKHREL *et al.*, 2018). Além disso, a adição de óxido gráfico e grafite à argamassa de cimento melhora a resistência à compressão, resistência à tração e resistência à flexão (TUFAIL *et al.*, 2022).

Considerando a tríade manufatura aditiva, nanomaterias e preservação ambiental, neste trabalho objetivou-se desenvolver um filamento cimentício com inserção de grafite e de óxido de grafeno por meio da manufatura aditiva.

2 METODOLOGIA

2.1 Matérias-primas

Para a realização desta pesquisa, utilizou-se cimento Portland CII Z32 (Votoran), com massa específica de 900 a 1200 Kg/cm³ a 20°C e areia média como agregado miúdo. A areia foi adquirida em comércio local, peneirada com malha 4,75 mm conforme Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR NM - ISSO 3310-1 (2000), com massa específica de acordo com a ABNT NBR 16916 (2001) de 2631 Kg/cm³.

O óxido de grafeno em pó foi adquirido da marca Amazonas Grafeno. O grafite em pó de alta pureza utilizado foi da marca Sigma-Aldrich. Utilizou-se 0,04% de superplastificante a base de policarboxilato, comercialmente disponível como Master Glenium 51[®], e adquirido em comércio local.

2.2 Preparo das amostras

O traço unitário empregado nos filamentos cimentícios e na amostra referência foi de 1:1,33 (cimento: areia). Utilizou-se 0,04% de superplastificante a base de policarboxilato, comercialmente disponível como Master Glenium 51[®], em relação ao peso do cimento e relação água/cimento de 0,45g.

Foram preparados seis filamentos cimentícios, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Composição da amostra referência e as amostras modificadas

Amostras	Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Superplastificante (g)	Água (L)	Óxido de Grafeno (g)	Grafite (g)
REF	45	60	45	13,260	0	0
A	45	60	45	13,260	45	0
B	45	60	45	13,260	90	0
C	45	60	45	13,260	15	0
D	45	60	45	13,260	0	45
E	45	60	45	13,260	0	90
F	45	60	45	13,260	0	15

Fonte: Os autores, 2022.

O preparo das amostras foi realizado conforme a norma ABNT NBR 13281 (2001) e a mistura do óxido de grafeno e o grafite no filamento cimentício foi realizada por dispersão manual, direto na mistura seca do filamento (areia + cimento). Primeiramente, foram separados e pesados (Max Dst-30 da Triunfo - Brasil) os materiais secos de uma única vez (cimento, areia, óxido de grafeno e grafite) (Tabela 1). Em seguida, foram inseridos no misturador (MIX 90 da Betomaq - Brasil), com capacidade de 100L, com o equipamento ligado por cinco minutos para que houvesse a homogeneização do cimento, areia, óxido de grafeno e grafite. Após a mistura, adicionou-se 2/3 da água e misturado por cinco minutos, e para finalizar, adicionou-se o restante da água com o aditivo superplastificante. O misturador ficou ligado por mais cinco minutos, sendo ao todo 27 minutos para uma completa homogeneização da mistura. Depois de preparados os filamentos, no estado fresco, foram transferidos para o compartimento do subsistema de bomba de injeção e transportados até a saída no bico da impressora por meio de mangueiras, iniciando a extrusão, assim como apresentado por Silva (2022).

2.3 Impressão das amostras

O processo de impressão ocorreu com vazão de 5 Kg/min e na velocidade de 50 mm/s, seguindo os seguintes parâmetros: 200 mm de largura e 250 de comprimento, para cada amostra. Em relação à altura, verificou-se por meio da análise construtibilidade quanto cada camada suporta, sendo que a altura máxima de impressão suportada pelo equipamento é de 165 mm.

Depois de preparadas as amostras e após serem submetidas ao processo de bombeamento e extrusão, foram caracterizadas no estado fresco pelos ensaios de índice de consistência (ABNT NBR 13276/2016), extrudabilidade e construtibilidade. As amostras foram coletadas do bico da extrusora em um recipiente metálico e após realizados os testes no estado fresco (índice de consistência) e no estado endurecido (de resistência à tração na flexão e à compressão axial).

As amostras foram ensaiadas quanto aos parâmetros mecânicos (de resistência à tração na flexão e à compressão axial, conforme as normas ABNT NBR 1327/20058 e 13279/2005), após 28 dias de cura, em equipamento DL 30000-EMIC.

As análises estatísticas foram realizadas empregando-se a função desejabilidade, proposta por Derringer e Suich em 1980 (COSTA *et al.*, 2011).

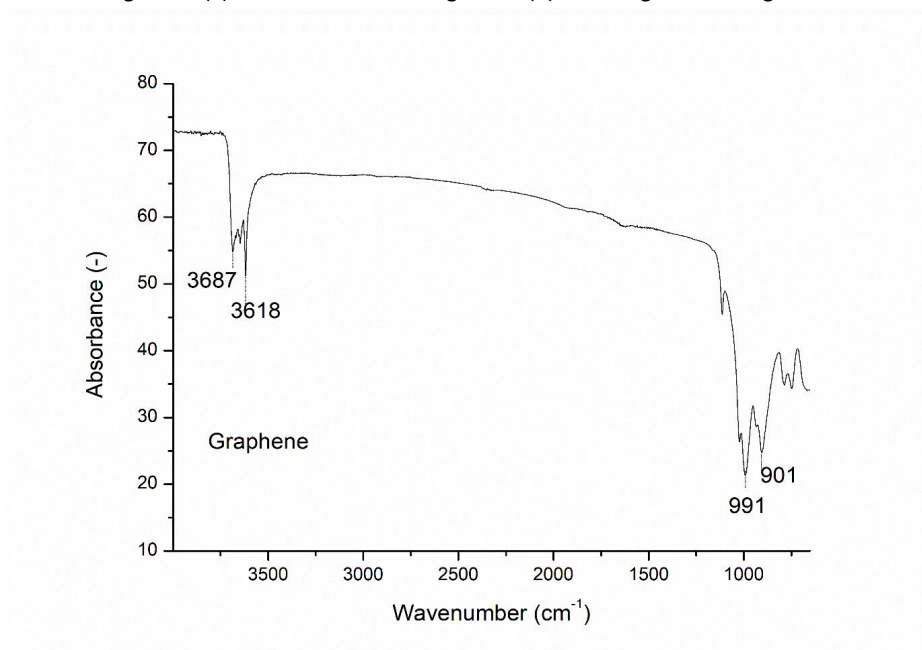
As análises estatísticas de tração, compressão, deformação e índice de consistência foram realizadas considerando-se o teste de Tukey ao nível de 5% de significância no intuito de verificar se as amostras diferiram significativamente ou se mantinham a mesma média em relação à amostra de referência.

3 RESULTADOS

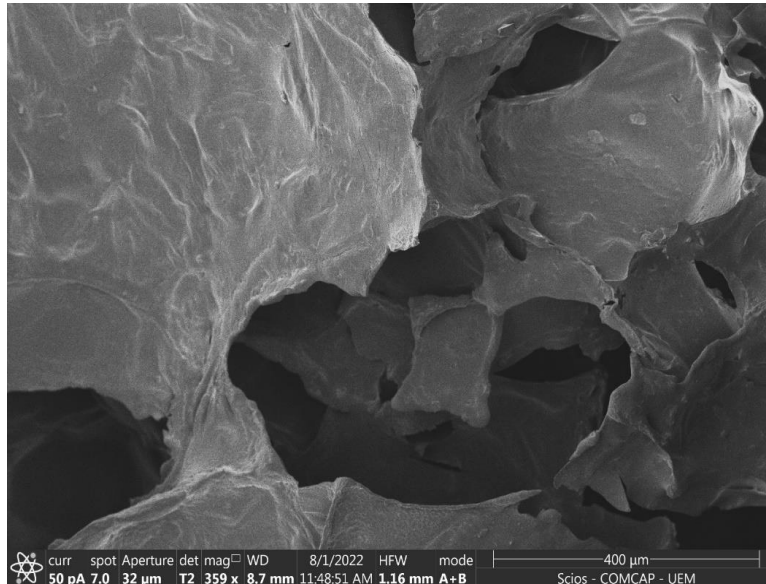
A análise de FTIR apresentou uma característica bastante particular e foram encontradas duas bandas acima da região de 3600, sendo elas em 3618 e 3687 cm^{-1} (Figura 1 (a)).

Gong *et al.* (2015) compararam óxido de grafite (GO), óxido de grafeno reduzido (rGO) e grafeno dopado com nitrogênio (NG). Verificaram em GO uma banda larga em 3338 cm^{-1} , pertencente ao forte estiramento do grupo OH; absorção em 1635 cm^{-1} devido ao modo de alongamento C=C; verificaram bandas em 1716, 1154 e 1033 cm^{-1} , correspondentes aos modos de estiramento de C=O, C-OH e C-O, respectivamente. Já para as moléculas de rGO, não houve absorção na região de 3338 cm^{-1} tendo desaparecido, o que revela a ausência do grupo OH após a redução. E a banda em 1586 cm^{-1} pertence a C=C, verificaram que não houve alteração de absorção em 1164 cm^{-1} atribuído a C-OH.

Figura 1 - (a) Análise FTIR óxido de grafeno (b) Morfologia óxido de grafeno



(a)



(b)

Fonte: Os autores, 2022.

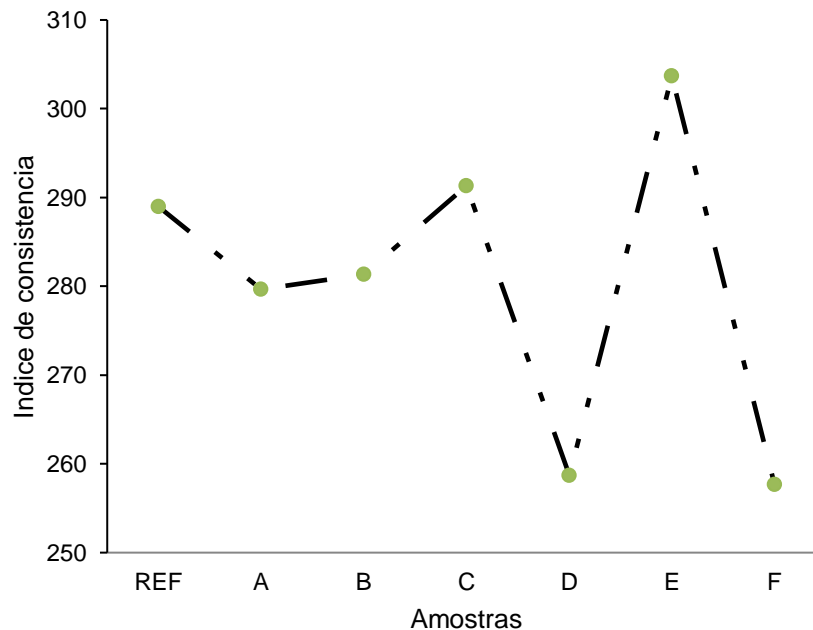
É possível observar a presença das folhas do OG (Figura 1 (b)). Nota-se uma rugosidade proveniente do aumento do espaçamento entre as folhas, demonstrando que houve o processo de oxidação do material.

Em relação à massa específica do cimento Portland utilizado determinado pelo fabricante, é de 900 a 1200Kg/cm³ a 20°C. De acordo com as características físicas obtidas para o agregado miúdo, os valores estão de acordo com o recomendado para a utilização em um filamento cimentício. A composição granulométrica apresenta a porcentagem do agregado miúdo; está em uma granulometria de 9,5 mm a 0,15 mm, característica para a composição utilizada em argamassa de revestimento, sendo ideal para o bombeamento e extrusão do filamento cimentício.

Foi realizado o ensaio de índice de consistência em relação à fluidez da pasta de cimento e a capacidade de bombeamento, teste mais conhecido para avaliar a propriedade fresca de materiais cimentícios, na amostra de referência (REF), e nas amostras modificadas e incorporadas com óxido de grafeno [A (0,1), B (0,2), C (0,04)] e grafite [D (0,1), E (0,2), F (0,04c), conforme a Tabela 1].

Na Figura 2, é possível verificar que as amostras incorporadas com óxido de grafeno nas proporções 0,1 (A) e 0,2 (B), tiveram uma redução da fluidez da pasta cimentícia, mas não diferiram significativamente no índice de consistência, assim como as amostras incorporadas com grafite nas proporções 0,1 (D) e 0,04 (F) também não diferiram entre si. Segundo Song e Li (2021), o óxido de grafeno tende a reduzir a fluidez, pelo fato deste nanomaterial permitir a formação de aglomerados de cátions de cálcio por reticulação química, aprisionando água livre e, conseqüentemente, reduzindo a fluidez. Além disso, dependendo da variação do tamanho do nanomaterial, pode interferir no progresso da reação da hidratação e, conseqüentemente, na extrusão do filamento na impressora e a na cura da massa (ZHOU *et al.*, 2020). No caso do grafite, dependendo do seu tamanho e formato, pode incorporar mais na amostra e reduzir assim a trabalhabilidade da amostra (MEDINA *et al.*, 2018).

Figura 2 - Variação do índice de consistência para as amostras



Fonte: Os autores, 2022.

Amostra REF; Amostra com Óxido de Grafeno 0,1% (A); Amostra com Óxido de Grafeno 0,2% (B); Amostra com Óxido de Grafeno 0,04 % (C); Amostra com Grafite 0,1% (D); Amostra com Grafite 0,2% (E); Amostra com Grafite 0,04% (F).

O índice de consistência ($303,67 \text{ mm} \pm 1,20 \text{ mm}$) deu-se para a amostra incorporada com 0,2 de grafite (E) (Figura 2), com um aumento de cerca de 17% no índice de consistência. Foi observado por Tufail *et al.* (2022) um aumento na fluidez da pasta, pelo fato de que os nanomateriais podem lubrificar as partículas sólidas da pasta de cimento, melhorando assim a fluidez e, conseqüentemente, podendo reduzir o uso de superplastificante.

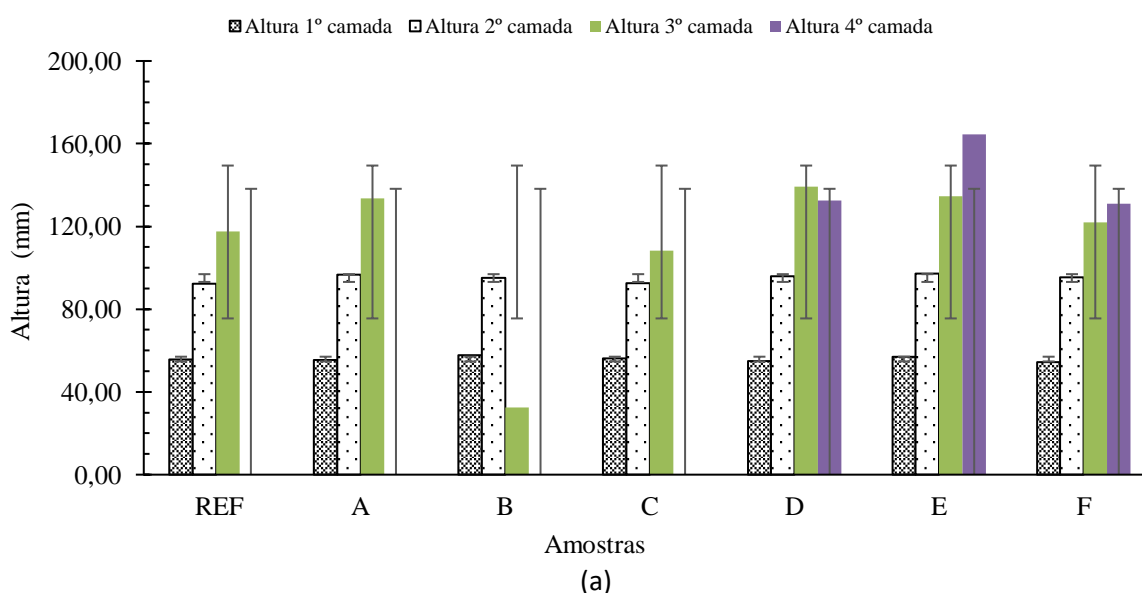
Em relação à extrudabilidade, todas as amostras foram extrudadas pela impressora, apresentando um tempo aberto médio, tempo que a mistura é dispensada sem parar ou entupir o bico, de aproximadamente 4 min e 40 segundos para a construtibilidade das quatro camadas, quando ocorreu. Sendo esse um fato importante, pois este tempo pode interferir na trabalhabilidade da mistura na impressão segundo (SONG; LI, 2021).

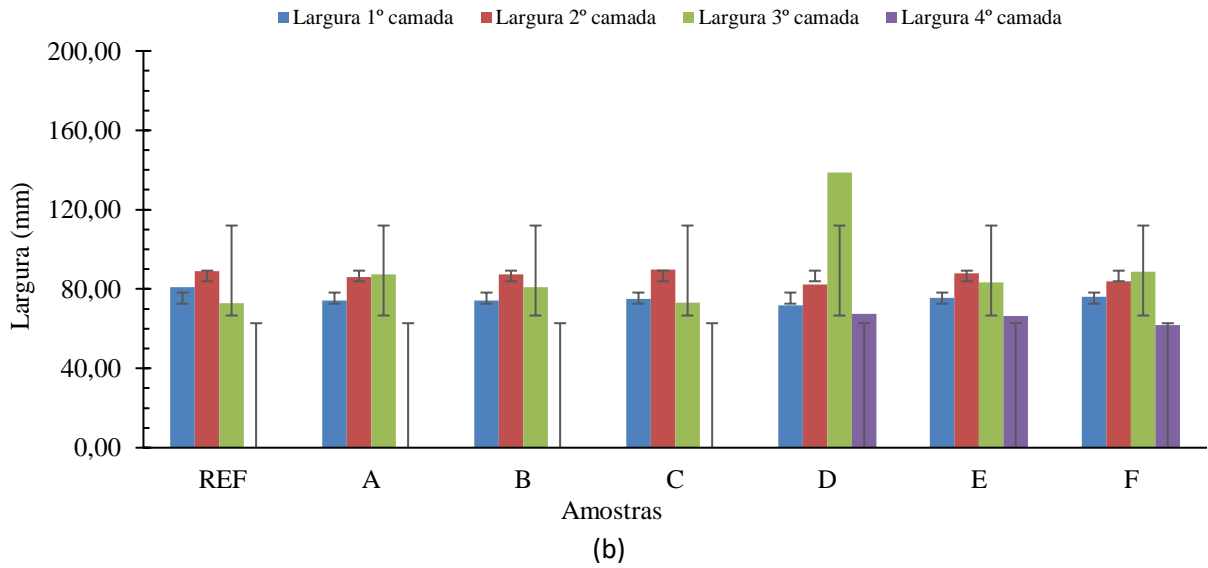
Com o intuito de avaliar o efeito da adição do grafite e do óxido de grafeno na capacidade de impressão do filamento, foi avaliada a capacidade de construção do mesmo. Como não há uma norma uniforme para testar a capacidade de construtibilidade da impressão, várias metodologias foram testadas e comparadas neste estudo de deformação vertical, assim como Zou *et al.* (2021) e Ma *et al.* (2018). Verificou-se que todas as amostras foram impressas até a terceira camada. As amostras modificadas com grafite, D, E e F, suportaram até a quarta camada, sendo as alturas máximas de impressão de 157,73, 164,56 e 156,24 mm, respectivamente, conforme se observa na Figura 3 (a) e Figura 4.

Analisando os dados, verifica-se que não houve diferença significativa na primeira camada da altura e da largura em relação a todas as amostras de filamentos. O mesmo acontece para as camadas 2, 3 e 4 em relação à altura, com exceção das amostras REF, A, B e C que não tiveram nenhuma altura na quarta camada. De acordo com Kazemian *et al.* (2017), existem 3 principais fontes responsáveis pela deformação que se aplicam a uma camada impressa: a pressão de extrusão, a ação do próprio peso e o peso da adição subsequente de novas camadas. Neste caso a deformação se deu pela ação do próprio peso e pela adição de outras camadas.

Para as larguras da camada 2, semelhanças significativas aconteceram e diferenças significativas na terceira camada. Na quarta camada também não se teve impressão na largura. Comparando a relação entre as camadas para cada uma das amostras, aconteceu o esperado, ou seja, a cada nova camada uma nova altura aconteceu com diferença significativa, com exceção para as camadas 3 e 4 das amostras E e F em função de um grande desvio, conforme Figura 3 (b) e Figura 4. Para a largura, a amostra D apresentou mesma média significativa entre a 3ª e a 4ª camada com grande desvio para a 3ª camada. Na largura da amostra F, somente a 1 camada se diferiu das demais. A menor altura aconteceu para a amostra A (55,34 mm ± 0,63 mm) e a maior (164,56 mm ± 4,53 mm) para a amostra E. Menor largura na primeira camada para a amostra E (71,90 mm ± 0,72 mm) e a maior na camada 3 para a amostra D (104,06 mm ± 13,71 mm).

Figura 3 - Resultados do ensaio de construtibilidade: a) altura; b) largura





Fonte: Os autores, 2022.

Amostra REF; Amostra com Óxido de Grafeno 0,1% (A); Amostra com Óxido de Grafeno 0,2% (B); Amostra com Óxido de Grafeno 0,04 % (C); Amostra com Grafite 0,1% (D); Amostra com Grafite 0,2% (E); Amostra com Grafite 0,04% (F).

Figura 4 - Imagens do ensaio de construtibilidade



ARG
REF



A



B



C



D



E



F

Fonte: Os autores, 2022.

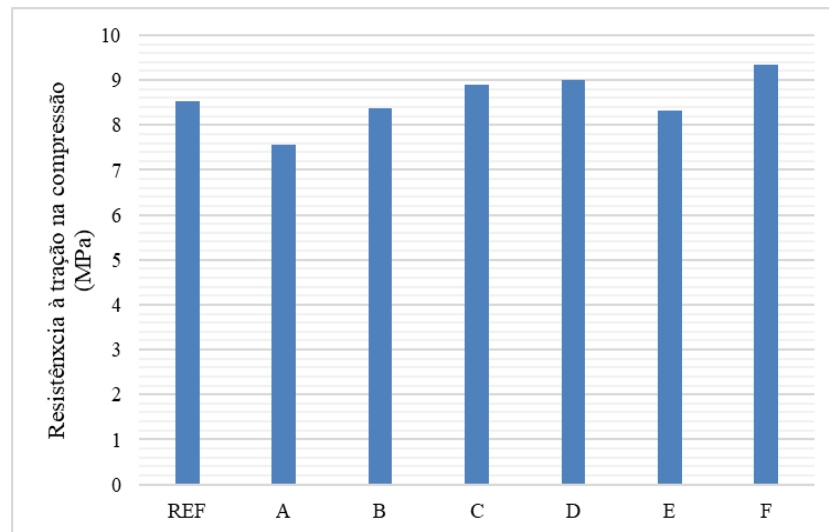
Arg. REF Arg. Óxido de Grafeno 0,1 (A) Arg. Óxido de Grafeno 0,2 (B) Arg. Óxido de Grafeno 0,04 (C) Arg. Grafite 0,1 (D) Arg. Grafite 0,2 (E) Arg. Grafite 0,04 (F).

As deformações verticais médias totais para todas as camadas foram de 37,69%, 36,67% e 38,62%, respectivamente, sendo que as amostras D, E e F se distinguiram com sucesso das demais e indicaram o efeito positivo do grafite na melhoria da construtibilidade.

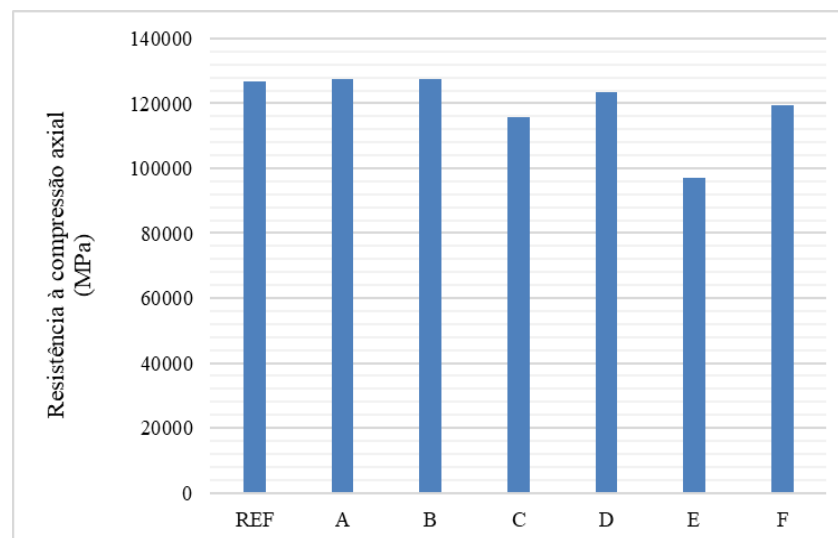
Com o intuito de analisar a influência do grafite e do óxido de grafeno nas propriedades mecânicas das amostras, foram realizados os testes de tração na flexão e logo após o teste de compressão axial.

Pelos resultados apresentados na Figura 5 (a), em que se analisou a significância para teste de tração na flexão, é possível verificar que não houveram diferenças significativas entre as amostras acrescidas de grafite e óxido de grafeno, nas proporções 0,1%, 0,2% e 0,04%, respectivamente. Em relação à média, os três melhores resultados foram: a maior tração (9,34 MPa) foi observada na amostra F, em sequência amostra D (8,99MPa) e a amostra C (8,91MPa), e a menor média da tração (7,57 MPa) foi na amostra A, uma diferença de cerca de 8% em relação à efetividade do grafite (menor porcentagem). A amostra de referência apresentou maior desvio em relação aos corpos de prova 1, 2 e 3, mas não diferiu significativamente das demais.

Figura 5 - Resultados dos ensaios: a) Resistência à tração na flexão; b) resistência à compressão axial



(a)

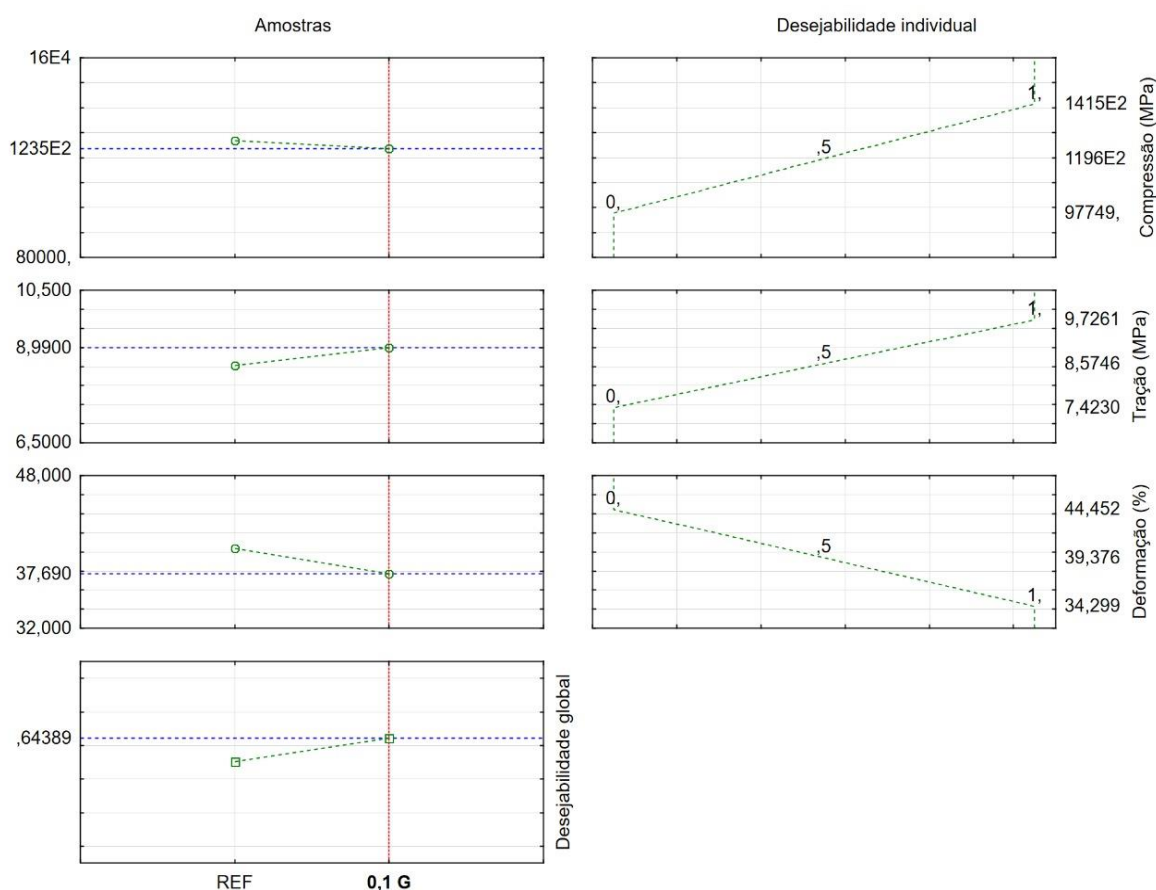


Fonte: Os autores, 2022.

Amostra REF; Amostra com Óxido de Grafeno 0,1% (A); Amostra com Óxido de Grafeno 0,2% (B); Amostra com Óxido de Grafeno 0,04 % (C); Amostra com Grafite 0,1% (D); Amostra com Grafite 0,2% (E); Amostra com Grafite 0,04% (F).

O aumento na resistência à tração na flexão com a adição de grafite (Figura 5 (a)), está atribuído aos efeitos sinérgicos deste material com a pasta cimentícia. Por sua vez, a redução na flexão pode estar ligada a aglomeração das placas, pois os nanomateriais com altas áreas específicas estão sujeitos a aglomeração por interações secundárias, podendo ocasionar dispersão ineficaz das partículas e consequentemente provocar o aumento dos poros internos e da porosidade (TUFAIL *et al.* 2022).

Figura 6 - Resultado da análise estatística e viabilidade dos resultados



Fonte: Os autores, 2022.

Para a análise de resistência à compressão axial, as amostras de grafite e óxido de grafeno, assim como a referência não apresentaram diferenças significativas (Figura 5 (b)), isto pode se dar pelo fato de as amostras chegarem no limite de força da máquina do ensaio e não romperem. A amostra E tenha apresentado a menor compressão e o maior desvio em relação às demais amostras (9,69 Mpa \pm 1,58MPa).

Wang *et al.* (2013) e Song e Li (2021) também verificaram aumento na resistência a flexão e a compressão nas pastas de cimentos com adição de OG, mesmo com a redução na

fluidez, isso deve-se pelo fato de que o óxido de grafeno promove uma forte interação interfacial nos grupos carboxílicos e na hidratação da do filamento cimentício (SILVA *et al.*, 2021).

Além disso, como os nanomateriais apresentam uma natureza ultrafina, atuam preenchendo os poros entre os grãos de cimento, promovendo uma microestrutura mais densa e melhor resistência a penetração de material nocivo, resistindo assim as forças nocivas do ambiente (SONG; LI, 2021).

Desta forma, por meio da análise estatística e viabilidade todos os resultados em relação aos testes mecânicos e de deformação, pode-se verificar (Figura 6) que a amostra D foi a melhor amostra, apresentando os melhores resultados no teste de tração à flexão, compressão e menor deformação após a impressão. A aplicação de função de desejabilidade na otimização de métodos analíticos traz inúmeras vantagens como eficiência, economia e objetividade na otimização de procedimentos com múltiplas respostas (VERA CANDIOTI *et al.*, 2014), sendo possível analisar a viabilidade de aplicação das misturas realizadas.

4 CONCLUSÃO

Com base na análise dos resultados, verificou-se que todas as amostras foram extrudadas pela impressora, sendo que as amostras modificadas com grafite tiveram melhores resultados na extrudabilidade, pois suportaram até a quarta camada de impressão. As amostras modificadas tiveram resultados diferentes da amostra de referência no estado endurecido, a amostra F, a amostra D e a amostra C tiveram os melhores resultados no ensaio de tração na flexão. No teste de compressão axial as amostras acrescidas de óxido de grafeno, tiveram os melhores resultados em relação a amostra de referência, pelo fato contribuir com o processo de hidratação e preencher os poros da matriz cimentícia.

Por meio da análise estatística e viabilidade, tem-se que a amostra D foi a melhor amostra, apresentando os melhores resultados no teste de tração à flexão, compressão e menor deformação após a impressão.

Desta forma, torna-se viável a utilização de filamento cimentício reforçado com o óxido de grafeno e grafite para a aplicação na manufatura aditiva no setor da construção civil, uma vez que é possível apontar que a nova matriz cimentícia contribuirá com o desenvolvimento econômico, social e ambiental. Por consequência, fortalecerá os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), a fim de fomentar o desenvolvimento sustentável e justificar a adoção desta tecnologia e seus processos mais limpos.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 13276, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação do índice de consistência, Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT NBR 13278, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT NBR 13281, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Requisitos, Rio de Janeiro, 2001.

ABNT NBR 13279, Associação Brasileira de Normas Técnicas Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos: Determinação da resistência à compressão, Rio de Janeiro, 2005.

ABNT NBR NM ISO 3310-1, Associação Brasileira de Normas Técnicas - Norma Mercosul. Peneiras de ensaio: Requisitos técnicos e verificação, Rio de Janeiro, 2000.

BHARDWAJ, A. et al. Additive manufacturing processes for infrastructure construction: a review. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 141, n. 9, p. 233-245, 2019.

CANDIOTI, L. V.; ZAN, M. M.; CAMARA, M. S.; GOICOECHEA, H. C. Experimental design and multiple response optimization using the desirability function in analytical methods development. Nova Iorque, **Elsevier**. Talanta, v. 124, p. 123-138, 2014.

CAO, Y. et al. Preparation and enhanced CO₂ adsorption capacity of UiO-66/graphene oxide composites. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 27, p. 102-107, 2015.

COSTA, N. R.; LOURENÇO, J.; PEREIRA, Z. L. Desirability function approach: A review and performance evaluation in adverse conditions. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v.107, p. 234 -244, 2011.

DANIYAL, M. et al. Application of nanomaterials in civil engineering. **Advanced Structured Materials**, p. 169-189, 2017.

DUBRAVSKÁ, M. et al. Corporate social responsibility and environmental management linkage: an empirical analysis of the Slovak Republic. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 13, 2020.

GONG, Y. et al. Influence of graphene microstructures on electrochemical performance for supercapacitors. **Progress in Natural Science: Materials International**, v. 25, n. 5, p. 379-385, 2015.

KAZEMIAN, A. et al. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: laboratory testing of fresh printing mixture. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 639-647, 2017.

KAUR, M. Environment impact assessment and environment management studies for an upcoming multiplex - a case study. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering**, v. 1, n. 4, p. 22-30, 2012.

LIMA, L. et al. Sustainability in the construction industry: a systematic review of the literature. **Journal of Cleaner Production**, v. 289, p. 125730, 2021.

MA, G.; LI, Z.; WANG, Li. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing. **Construction And Building Materials**, v. 162, p. 613-627, 2018.

MARLON, J. R. et al. How hope and doubt affect climate change mobilization. **Frontiers in Communication**, [s.l: s.n.], 2019.

MEDINA, N. F.; BARBERO-BARRERA, M, M.; JOVÉ-SANDOVAL, F. Improvement of the mechanical and physical properties of cement pastes and mortars through the addition isostatic graphite. **Construction And Building Materials**, v. 189, p. 898-905, 2018.

POKHREL, J. et al. CO₂ adsorption behavior of amine-functionalized ZIF-8, graphene oxide, and ZIF-8/graphene oxide composites under dry and wet conditions. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 267, p. 53-67, 2018.

RODRIGUES, F.A.; JOEKES, I. (2011) Cement and industry: sustainability, challenges and perspectives. **Environmental Chemistry Letters**, v. 9, n. 2, p. 151-166, 2021.

SILVA, M. D. L.; BERGAMASCO, G. B.; BERTO, L. K.; REZENDE, L. C. S. H. Uma análise da manufatura aditiva aplicada ao planejamento urbano sustentável: revisão de aplicações, desafios e potencialidades. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 7, p. 328-341, 2021.

SILVA, M. D. L. **Desenvolvimento e validação de um protótipo de impressora 3D em escala de bancada visando a aplicação na construção civil**. 2022. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas, Centro Universitário de Maringá, Maringá, 2022.

SONG, H.; LI, X. An overview on the rheology, mechanical properties, durability, 3d printing, and microstructural performance of nanomaterials in cementitious composites. **Materials**, v. 14, n. 11, p. 2950, 2021.

THOMAS, A. et al. Climate change and small island developing states. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 45, n. 1, [np], 2020.

TUFAL, R. F. et al. Evaluation of the fresh and mechanical properties of nano-engineered self compacting concrete containing graphite nano/micro platelets. **Case Studies In Construction Materials**, v. 17, p. 1-13, 2022.



WANG, L. et al. Experimental evaluation of adsorption technology for CO₂ capture from flue gas in an existing coal-fired power plant. **Chemical Engineering Science**, v. 101, p. 615–619, 2013.

WU, Y. et al. Framing the evolution of the corporate social responsibility and environmental management journal. **Corporate Social Responsibility and Environmental Management**, v. 28, n. 4, p. 1397–1411, 2021.

ZOLFAGHARIAN, S. et al. Environmental impacts assessment on construction sites. *In*: CONSTRUCTION RESEARCH CONGRESS. Universiti Teknologi Malaysia, 1., 2012. **Anais [...]**. Malaysia, 2012, p. 1750–1759.

ZOU, S.; XIAO, J.; DUAN, Z.; DING, T.; HOU, S.. On rheology of mortar with recycled fine aggregate for 3D printing. **Construction And Building Materials**, v. 311, p. 125-312,. 2021.

ZHOU, G. X. et al. 3D printing geopolymer nanocomposites: graphene oxide size effects on a reactive matrix. **Carbon**, v. 164, p. 215-223, 2020.