

USO DE NEFELINA SIENITO COMO AGREGADO EM CONCRETO DE IMPRESSÃO 3D

Raquel Henrique Carvalho (IC) e Lígia Vitória Real (Orientador)

Apoio: PIBIC Mackpesquisa

RESUMO

A impressora 3D desponta como tecnologia inovadora que revolucionará o modo como as sociedades vivem, possibilitando a criação de objetos de forma rápida, mais barata e com menos prejuízo ao meio ambiente. Ainda mais aplicada à construção civil, a impressão 3D de materiais cimentícios demonstra novas possibilidades para o setor, agilizando as construções, diminuindo o desperdício de materiais, reduzindo custos e aproveitando o uso de materiais reciclados. Tendo em vista a importância do tema, a presente pesquisa tem como objetivo verificar a aplicabilidade de materiais cimentícios impressos em impressora 3D voltados para fins estruturais na área de construção civil, utilizando nefelina sienito como agregado miúdo. Para avaliar essa questão, realizaram-se ensaios no estado fresco – ensaio de consistência por espalhamento cônico e avaliação visual da extrusão por simulação de impressora – e estado endurecido do concreto – ensaios de resistência à compressão, velocidade de propagação da onda ultrassônica e módulo de elasticidade. A primeira etapa da pesquisa foi desenvolver um traço de referência com base em estudos já realizados, verificando a aplicabilidade do fíler calcário como adição mineral. Na sequência, foi aplicado agregado de nefelina sienito em substituição ao fíler. Os resultados demonstraram que o traço com fíler calcário e sem nefelina sienito apresentou propriedades adequadas para um concreto de impressão 3D, com menor consumo de cimento, alta resistência inicial e melhor coesão no estado fresco.

Palavras-chave: Impressão 3D de concreto. Nefelina sienito. Substituição do cimento.

ABSTRACT

The 3D printer emerges as an innovative technology that will revolutionize the way societies live, enabling the rapid and cost-effective creation of objects with reduced environmental impact. When applied to the construction industry, 3D printing of cementitious materials demonstrates new possibilities for the sector, streamlining construction processes, reducing material waste, cutting costs, and utilizing recycled materials. Considering the significance of this topic, the present research aims to assess the applicability of 3D-printed cementitious materials for structural purposes in the field of civil construction, using nepheline syenite as a fine aggregate. To evaluate this matter, tests were conducted in both the fresh state - the slump test and visual evaluation of extrusion through printer simulation - and the hardened state of the concrete - compressive strength tests, ultrasonic wave propagation velocity, and modulus of elasticity. The first stage of the research involved developing a reference mixture based on

previous studies, examining the applicability of limestone filler as a mineral addition. Subsequently, nepheline syenite aggregate was used as a replacement for the filler. The results demonstrated that the mixture with limestone filler and without nepheline syenite exhibited suitable properties for 3D printing concrete, including lower cement consumption, high initial strength, and improved cohesion in the fresh state.

Keywords: 3D Concrete Printing. Nepheline Syenite. Cement Replacement.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, inúmeros estudos e apontamentos surgiram na área de construção civil em busca de solucionar o atraso na implementação tecnológica em obras, especialmente no Brasil, que ainda utiliza predominantemente o sistema de alvenaria, dificultando a implementação de sistemas construtivos mais modernos devido à falta pesquisa e investimento, além de apresentar pouca abertura a mudanças, seja em termos de tecnologias, processos construtivos ou gestão da organização.

Considerando a necessidade de arranjos habitacionais capazes de se adaptar aos grandes centros urbanos em razão do exponencial processo de urbanização, construídos em larga escala e acessíveis à população de baixa renda, percebe-se a urgência de um desenvolvimento tecnológico na área para remediar essas deficiências socioeconômicas. Além disso, há a necessidade de agilizar as construções, diminuir os desperdícios de obras tradicionais, reduzir custos com material e transporte, e maximizar o aproveitamento de materiais reciclados a partir do uso de resíduos e entulhos (PORTO, 2016).

Entre as possibilidades de alta tecnologia na área de construção, a impressora 3D desponta, atingindo todos os fatores necessários para construções mais econômicas e sustentáveis que incluam a população carente e cumpram todas as especificações técnicas requeridas pelas normas. Criada no fim da década de 80, por Charles “Chuck” Hull, a primeira impressora 3D utilizava a tecnologia de estereolitografia, que combinava lasers e materiais fotossensíveis para imprimir formas geométricas. Desde então, diversas técnicas, materiais, escalas e máquinas foram adaptados para se integrarem no mundo da impressão tridimensional.

O funcionamento básico da impressora 3D atual segue o padrão de uma máquina de Prototipagem Rápida (RP – *Rapid Prototyping*), adicionando os materiais em camadas horizontais (RAULINO, 2011), definidas pelo software da impressora, produzindo objetos sólidos através de manufatura aditiva (PAIM & ALMEIDA, 2018).

Aplicada à construção civil, estudos desenvolveram diversos componentes, processos de impressão e técnicas para garantir a aplicabilidade no segmento. Acerca dos materiais, há o uso de geopolímeros, materiais ricos em sílica e alumina que oferecem resistência às ações químicas e a altas temperaturas (PINTO, 2006), e de materiais cimentícios à base de cimento Portland para impressão de estruturas em concreto. Neste trabalho, será enfatizado o uso do concreto para impressão 3D, escolhido com base no conhecimento prévio das propriedades e à matriz ser semelhante à do uso mais tradicional no Brasil.

As principais técnicas utilizadas para impressão 3D de concreto, como *Contour Crafting*, *Concrete Printing*, *CONPrint 3D*, *D-Shape* (Ibidem, 2016), dentre outras, procuram, de

maneiras distintas, garantir as propriedades requisitadas para construções utilizando um concreto impresso pela máquina híbrida. Existem propriedades do concreto extremamente específicas para este modelo, em essencial: extrusão, garantindo o posicionamento permanente da estrutura depois de uma rápida solidificação; tempo de fixação rápida pela impressão progressiva das camadas; e consistência do material.

Buscando diminuir o consumo de cimento e destinar o uso de materiais de resíduo, a presente pesquisa utilizará o mineral nefelina sienito, proveniente de rocha rica em feldspatos sódicos (SAMPAIO *et al*, 2008), disponível na região de Poços de Caldas e empregado geralmente nas indústrias de vidros e cerâmicas. No entanto, por ser pouco aproveitado durante a extração, há muitos resíduos disponíveis para serem utilizados como agregados miúdos para concreto.

No âmbito econômico a possibilidade de construções concluídas reduzindo o tempo de produção, custo operacional, custo de mão de obra e, também, em um tempo reduzido de produção. A adição de sienito no material cimentício a ser impresso, considerando que o composto possui baixa utilidade em sua retirada e há, portanto, bastante rejeito de seus usos comuns a ser explorado, também oferece possibilidades visando um destino econômico ao mineral (CRUZ, 2017).

A fim de avaliar as questões apontadas, a pesquisa teve como objetivo verificar a aplicabilidade de materiais cimentícios impressos em impressora 3D voltados para fins estruturais na área de construção civil, utilizando nefelina sienito como agregado miúdo. Para atender ao cumprimento do objetivo principal, teve-se como objetivos específicos:

- a. Definir mecanismos de avaliação da extrusão do concreto de impressão 3D em laboratório e determinar a caracterização das propriedades no estado fresco e endurecido.
- b. Desenvolver um traço de referência para impressão 3D, testando sílica ativa como material substituto ao cimento Portland.
- c. Comparar o traço de referência desenvolvido com um concreto utilizando nefelina sienito como agregado miúdo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. A construção civil e a impressão 3D

Com o desmontamento tecnológico voltado para a área de construção civil, surgiram-se muitos questionamentos relacionados a eficiência e sustentabilidade dos métodos tradicionais até então utilizados. É importante ressaltar que cada região adapta esse setor a fatores econômicos, culturais e usuais próprios, mas alguns sistemas construtivos continuam mais usuais como, em destaque, a alvenaria estrutural e a convencional.

Estes sistemas construtivos são empregados frequentemente no Brasil devido à baixa necessidade de mão de obra especializada, materiais em abundância e incentivos industriais para o uso dos materiais e estruturas relacionados. Ainda, a taxa de investimento no PIB brasileiro é deficiente quando comparada a de outros países, com cerca de 10% de diferença (ABRAMAT, 2014), colaborando para que as carências infraestruturais se perpetuem. Algumas outras características atribuídas a construção civil nacional referem-se ao vasto consumo e desperdício de materiais construtivos, necessidade de mais trabalhadores na obra (ABIKO, 2005) e prazo de término extenso.

Percebendo-se estas complicações, a manifestação de novos sistemas construtivos e tecnologias de aplicação foi de extrema importância para readaptar e desenvolver o setor de construção civil. Surge, entre inúmeras oportunidades, a alternativa de impressão 3D, que tem revolucionado os parâmetros atuais de construção.

Provinda da Quarta Revolução Industrial na virada do século XXI, a história da Impressora 3D é marcada por constantes mudanças desde o registro de sua primeira patente com Charles Hull, em 1986, ramificando os procedimentos capazes de serem realizados pela máquina. Sobre tais métodos, a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) classificou-os em sete gêneros, cujos mais famosos referem-se à sinterização eletiva a laser (SLS), modelagem por fusão e deposição (FDM) e esteolitografia (SLAT) (SILVA *et al*, 2019).

Seu nome técnico, Manufatura Aditiva (*Additive Manufacturing*) demonstra a capacidade da máquina de fabricar partes ou produtos completos a partir de softwares, utilizando diversos materiais como plásticos, metais, geopolímeros e materiais cimentícios

Os passos comuns aos sistemas de manufatura aditiva, de acordo com Abreu (2015), são: modelagem 3D do modelo através de programas computacionais; conversão para formato STL, padrão para impressão 3D que adapta o modelo programado para a geometria e malha da impressora; transferência para a máquina e manipulação do STL; configuração da máquina, na impressão das camadas pelas suas técnicas próprias; construção física do protótipo; e pós processamento, como a necessidade de cura.

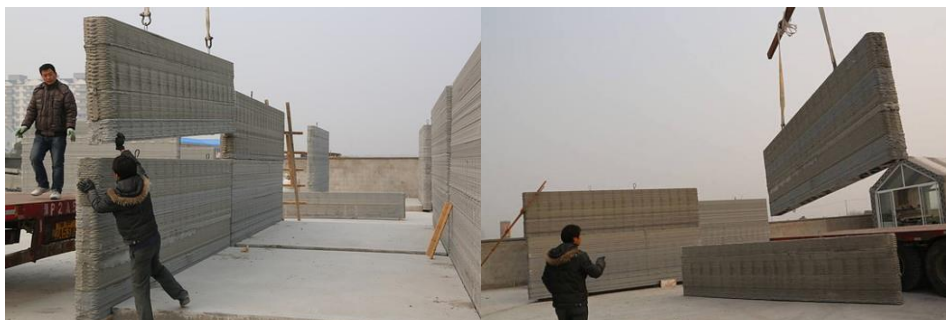
2.1.2 Técnicas de impressão 3D para construção civil

Para aplicabilidade na área de construção civil, elaboraram-se novas técnicas e abordagens derivadas das tradicionais relatadas anteriormente, objetivando a impressão de objetos maiores, como habitações, e utilizando cimento Portland como matriz (*3D Concrete Print*, sigla 3DCP). A *Countour Crafting* (CC) dos Estados Unidos e a WinSun na China são os principais exemplos de processos de manufatura digital por sobreposição de camadas de concreto (FLORÊNCIO *et al*, 2017).

Concebida na Universidade do Sul da Califórnia, a técnica de *Contour Crafting* foi a primeira tecnologia de impressão 3D voltada para o emprego de materiais cerâmicos e cimentícios e, até hoje, é a base para o desenvolvimento de outras tecnologias de 3DCP. Nesta técnica, o bocal extruda o material de impressão *in loco*, depois de uma mistura em reservatório interno, executando o processo em camadas externas (contornos) e depois preenche o núcleo do objeto também em camadas (KHOSHNEVIS, 2004).

Diretamente de Xangai, na China, a empresa WinSun reproduziu sua própria máquina e é, atualmente, uma das líderes mundiais no avanço de pesquisas e construções por meio da impressora 3D. A partir da criação de sua própria fábrica, produz de forma modular os elementos que serão transportados até o local da obra, onde serão montados com o auxílio de guindastes, como pode ser observado na Figura 1 (GRANZEL, 2019 & KAUR, 2021).

Figura 1 – Montagem de peças impressas em 3D



Fonte: GRENZEL (2019)

Tanto os Estados Unidos como a China, além de Cingapura, Austrália, Países Baixos, Alemanha e Inglaterra são os principais países na dianteira da pesquisa e aplicação da tecnologia de impressão 3D de Concreto (ABREU & SOUZA, 2019). No Brasil, ainda há grande carência de explorações no âmbito tecnológico da manufatura aditiva, mas pode-se registrar a iniciativa da startup InovaHouse3D, de engenheiros brasileiros e a Portal 3D, de São Paulo.

2.1.3 Propriedades do concreto para impressão 3D

Para obras com fins estruturais, a resistência à compressão e a força de adesão entre camadas devem ser testadas a partir da norma. Além disso, o concreto deve ser viscoso e firme o suficiente para ser extrudado pelo bocal; deverá ter um tempo menor de endurecimento (tempo de pega) para sustentar rapidamente as próximas camadas impressas. Pensando nisso, muitos concretos para impressão 3D utilizam aditivos para acelerar o endurecimento e conferir mais viscosidade à mistura (TRUONG, 2019).

Outras considerações importantes foram observadas por Vespalec *et al* (2020), como: a força de tensão entre as camadas diminui conforme o aumento do tempo de impressão entre elas, pelo aumento de rugosidade; a granulometria dos agregados e sua distribuição

impactam na resistência e durabilidade do concreto; a exibição de trincas está ligada ao empacotamento entre as partículas; o melhor intervalo de tempo para impressão entre camadas é de 5 a 10-15 minutos; e que, apesar destas observações, estudos prévios sobre tais requisitos devem ser feitos de acordo com cada mistura.

2.2. Concreto com sienito

2.2.1. Sienito

O sienito é uma rocha ígnea de origem intrusiva ou plutônica, cuja composição básica é de feldspatos sódicos e minerais ferromagnesianos, com a presença de 80 a 95% de feldspatos e feldspatóides, como a nefelina, e é pobre em quartzo (DEL ROVERI *et al*, 2013). A granulometria dos grãos é variada, podendo ir de malhas de poucos milímetros até de 100µm (SAMPAIO *et al*, 2008), e seus tamanhos são geralmente irregulares.

A nefelina sienito é uma subclassificação das rochas de sienito, apresentando o feldspatóide nefelina em abundância e outros minerais máficos alcalinos, ricos em sódio, cálcio e potássio, e com baixo teor de sílica. Possui uma granulação média, com uma coloração que varia de cinza claro a escuro devido à presença dos minerais ferromagnesianos.

Suas principais aplicações se destinam a indústria de vidros e cerâmicas, bem como para a produção de rochas ornamentais. Além disso, pode ser utilizada como material para estradas, asfaltos, agregado para concreto, pigmento, fillers e grânulos para telhados. Na fabricação de vidro, a preferência dá-se pela possibilidade de vitrificação em temperaturas mais baixas, reduzindo o uso de combustível. Já na indústria de cerâmica, a nefelina sienito é utilizada como uma alternativa mais barata de feldspatos, pois é rica em alumina e possui propriedades semelhantes, melhorando a fusibilidade, a capacidade flutuante e a sinterização em baixas temperaturas. Para tais usos, entretanto, é necessário separar magneticamente o teor de hidróxidos de ferro que inviabiliza o aproveitamento do mineral (Idem, 2008).

Embora trate-se de uma rocha moderadamente rara, há ocorrência de depósitos espalhados pelo mundo. Na Europa, os registros apontam para os países nórdicos, ademais da Inglaterra, França e Portugal. Na América do Norte, há depósitos em algumas cidades dos Estados Unidos e Canadá, alguns países da África e na Rússia (VOLKMANN, 2004).

O Brasil é praticamente o único país da América do Sul com reservas de nefelina sienito, apresentando-as nos estados do Rio de Janeiro, Minas Gerais e Santa Catarina com maior predominância. Destacadamente na região de Poços de Caldas (MG) possui-se grande disponibilidade da rocha no Maciço Alcalino da Pedra Branca e Maciço Alcalino de Poços de Caldas, cuja aquela reserva será utilizada para o desenvolvimento do trabalho. Apresenta-se na Figura 2 uma rocha de nefelina sienito.

Figura 2 – Rocha de nefelina sienito do Maciço Alcalino de Pedra Branca



Fonte: CRUZ (2017)

2.2.2. Concreto com sienito

Considerando a pesquisa de Cruz (2017) sobre a relação entre adições de sienito no concreto e seus efeitos nas propriedades, entende-se pelos resultados que:

- A análise granulométrica do sienito reitera seu uso como agregado miúdo, tendo em conta sua fragmentação através de um britador de mandíbulas e moinho tipo galga, tendo mais de 95% dos grãos passando pela malha 4,75 mm em teste estabelecido pela norma ABNT NBR 7211:2009.
- A inclusão de sienito conduz em uma coesão inferior do concreto, isto é, prejudica a mistura dos materiais, alterando esta propriedade pela sua menor quantidade de finos na distribuição granulométrica, pelo seu pH e pela composição química (aumento na relação $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$).
- À medida em que se adiciona sienito em detrimento da brita, a densidade do concreto aumenta, tendo em vista que há uma grande diferença de densidade entre eles.
- Há uma inclinação para perda de resistência à compressão do concreto conforme adiciona-se sienito, devido às adversidades apresentadas acima e pela maior porosidade do sienito que demanda uma maior relação água/cimento. Essa relação, conforme indica a Lei de Abrams, é inversamente proporcional a resistência à compressão do concreto. Não obstante, o concreto que utiliza o mineral sienito nefelínico consegue ultrapassar a classe 30 de resistência aos 28 dias.
- Foi analisado, também, o custo aferido ao concreto pela adição de nefelina sienito, tendo seu custo total reduzido em 10% e proporcionando inúmeros benefícios

ambientais, como o destino do rejeito mineral e decrescimento na propagação de CO₂ para a atmosfera.

Conclui-se que, apesar das diferenças apresentadas, as propriedades do concreto essencialmente não sofrem alterações bruscas e são baseadas essencialmente na granulometria e empacotamento finais dos agregados. Tendo em vista os resultados analisados, o concreto com sienito exibe exímias propriedades, qualidades e benefícios para uso em construção.

2.3. Adições minerais

Adições minerais são compósitos finamente moídos ou finos naturalmente que são adicionados ao concreto como complemento ao cimento Portland, a fim de melhorar as propriedades mecânicas, no estado endurecido, coesão entre os materiais, no estado fresco, e a durabilidade do concreto (BARBOSA, 2022). A adição desses materiais ao concreto pode apresentar benefícios referentes à sua resistência à compressão, resistência à tração e tenacidade, além de reduzir sua permeabilidade e aumentar sua durabilidade em ambientes agressivos. Além disso, a utilização de adições minerais no concreto também pode reduzir a quantidade de cimento Portland necessária na mistura, diminuindo assim a pegada de carbono do concreto e reduzindo os custos, expressando possíveis vantagens ambientais e econômicas que podem ser potencializadas de acordo com o uso em arga escala.

As adições minerais podem ser classificadas em três grupos, de acordo com a sua ação físico-química: pozolânico, material cimentante e fíler (BAUER, 2019). A presente pesquisa baseará seus estudos no uso de fíler calcário como adição mineral para o concreto de impressão 3D.

2.3.1. Fíler calcário

O fíler calcário é um material utilizado como adição mineral em concretos, visando melhorar suas propriedades e desempenho. Consiste em um pó fino, proveniente da moagem do calcário. Algumas das diversas vantagens apresentadas pelo uso de fíler calcário são: redução do uso de cimento, melhorias na trabalhabilidade do concreto, ajudando na coesão e fluidez do material, e possibilidades de aumentar a resistência à compressão e a outras solicitações mecânicas, tornando o concreto mais capaz de suportar esforços. Sua utilização adequada, de acordo com a dosagem e mistura de outros materiais pode contribuir para a produção de concretos mais eficientes, sustentáveis e de melhor desempenho.

3. METODOLOGIA

Foi estabelecido como ponto inicial a concepção de um traço de referência para impressão 3D de materiais cimentícios, tendo como base as orientações do traço desenvolvido por Rubin (2021), apresentado na Tabela 1. Reitera-se que a porcentagem de agregados é calculada de acordo com a relação entre o cimento Portland, enquanto o aditivo é calculado de acordo com sua porcentagem sobre o cimento.

Tabela 1 – Traço unitário Rubin em kg/kg (2021)

Consumo de cimento (kg/m ³)	Cimento	Sílica ativa	Areia Natural	Fíler calcário	Água	Aditivo
619	1,00	0,10	2,00	0,30	0,35	1,00%

Ao invés de utilizar aditivo dispersante, como feito por Rubin (2021), foi aplicado aditivo superplastificante devido à disponibilidade em laboratório. Assim, o concreto inicial foi adaptado e o traço apresentado na tabela 2 foi utilizado como referência.

Tabela 2 – Traço unitário em kg/kg adaptado aos materiais disponíveis

Consumo de cimento (kg/m ³)	Cimento	Sílica ativa	Areia Natural	Fíler calcário	Água	Aditivo
619	1,00	0,10	2,00	0,30	0,38	1,00%

Dadas as características da nefelina sienito apresentadas anteriormente neste artigo, optou-se por utilizá-la como agregado miúdo, em substituição ao fíler calcário.

Tabela 3 – Traço com substituição por nefelina sienito

Consumo de cimento (kg/m ³)	Cimento	Sílica ativa	Areia Natural	Nefelina sienito	Água	Aditivo
619	1,00	0,10	2,00	0,30	0,38	1,00%

3.1. MATERIAIS APLICADOS

Na Tabela 5 encontram-se a descrição e massa específicas dos materiais utilizados na pesquisa.

Tabela 4 – Descrição e massas específicas dos materiais aplicados

Material	Descrição	Massa específica (g/cm ³)
Cimento	CPV - LafargeHolcim	3,09
Sílica ativa	Tecnosil	2,62
Fíler calcário	Calcário dolomítico	2,72
Agregado miúdo	Areia natural	2,66
Nefelina sienito	Maciço Alcalino de Poços de Caldas	2,71

Aditivo	Superplastificante - MC Powerflow 1004	1,12
Água	Rede de abastecimento	1,00

3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Foram realizados ensaios para avaliar a granulometria dos agregados de fíler calcário e da areia natural. Por meio desse ensaio, foi possível determinar a distribuição das partículas em diferentes faixas de tamanho, permitindo a classificação granulométrica dos agregados. Além disso, a determinação do módulo de finura foi realizada, fornecendo informações adicionais sobre a textura e a distribuição das partículas.

Já para a nefelina sienito, determinou-se a distribuição de tamanho da partícula do sienito. Posteriormente, foram realizados ensaios para avaliar a composição química dos agregados. Através da técnica de análise química, foram identificados os elementos presentes nos materiais e suas respectivas concentrações. Essa análise química proporcionou insights sobre a natureza dos agregados, permitindo compreender melhor suas características e possíveis interações com outros componentes do concreto.

3.3. SIMULAÇÃO DE IMPRESSORA 3D

Durante a busca pelo traço de referência do concreto para impressão 3D, foi realizada uma investigação para simular a extrusão do material por meio de equipamentos disponíveis no laboratório. Com a colaboração de docentes e pesquisadores da área, utilizou-se uma extrusora manual para a impressão de traços experimentais. As primeiras idas ao laboratório foram feitas com a pistola "Extrusora 1", que pode ser vista na Figura 3.

Observou-se que a Extrusora 1 não atendia às expectativas para um bico de impressão 3D, pois a estreita abertura obstruía a saída do material e o maquinário impedia a participação manual para impulsionar a extrusão. Sendo assim, novas alternativas de simulação foram exploradas, e através de pesquisas sobre 3DCP, foi utilizada uma pistola de silicone como extrusora, que reduziu os problemas encontrados na extrusora anterior. Essa extrusora (Extrusora 2) foi usada nos testes do traço de referência e no traço de estudo, com nefelina sienito e pode ser observada na Figura 4.

Figura 3 – Extrusora 1

Figura 4 – Extrusora 2



Fonte: Autora



Fonte: Autora

3.4. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO EM ESTADO FRESCO

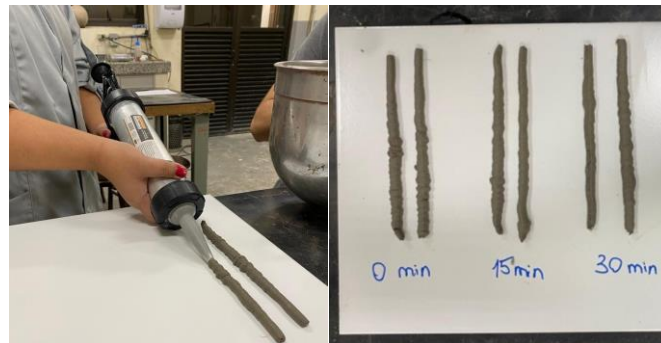
O principal método de análise da correspondência dos traços à expectativa das propriedades de concreto de impressão 3D foi através da consistência do concreto, sendo o segundo ensaio para avaliação do concreto em estado fresco após a verificação da extrusão pelo bico da Extrusora 2. Para avaliar essa propriedade, foram utilizados o índice de consistência por espalhamento cônico e a avaliação visual de camadas impressas pela Extrusora 2. Através dessas observações, foram feitas conjecturas sobre a capacidade de adesão entre as camadas, tempo de endurecimento mais curto e suporte de próximas camadas. Por outro lado, aplicou-se o ensaio de consistência prescrito pela NBR 13276 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016) para argamassas, tendo em vista que o concreto desenvolvido não contém agregados graúdos, a fim de evitar problemas na saída de material do equipamento de impressão.

Figura 5 – Índice de consistência



Fonte: Autora

Figura 6 – Avaliação visual da impressão com a extrusora 2



Fonte: Autora

3.5. ENSAIOS DO CONCRETO ENDURECIDO

Com o intuito de avaliar as propriedades do concreto endurecido, foram realizados ensaios de resistência à compressão e ultrassom em corpos de prova com 7 dias. Enfatizou-se a pesquisa relativa aos 7 dias devido a importância da impressão de camadas nas primeiras idades. Necessita-se que o concreto ganhe resistência inicial rapidamente para prosseguir na

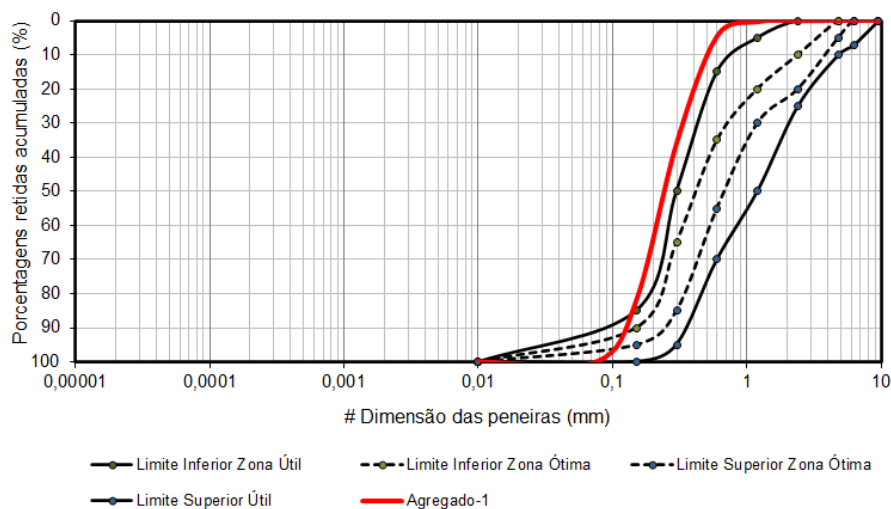
impressão das próximas camadas e para que o concreto permaneça no local designado da forma. Para essa idade, três corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, foram moldados, sendo eles rompidos por meio de compressão mecânica segundo NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018). Antes do rompimento dos corpos de prova, verificou-se a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas de acordo com a norma NBR 8802 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019). Com os resultados de ultrassom foi calculado o módulo de elasticidade, conforme prescrito na ASTM C597-09 e apresentado por Pacheco *et al* (2014).

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

No presente item, serão descritos os resultados da caracterização dos agregados fíler calcário, areia rosa fina (areia natural) e nefelina sienito. A Figura 7 apresenta os resultados da análise granulométrica da areia rosa fina. O módulo de finura ficou igual a 1,22 e o diâmetro máximo característico igual a 0,60 mm.

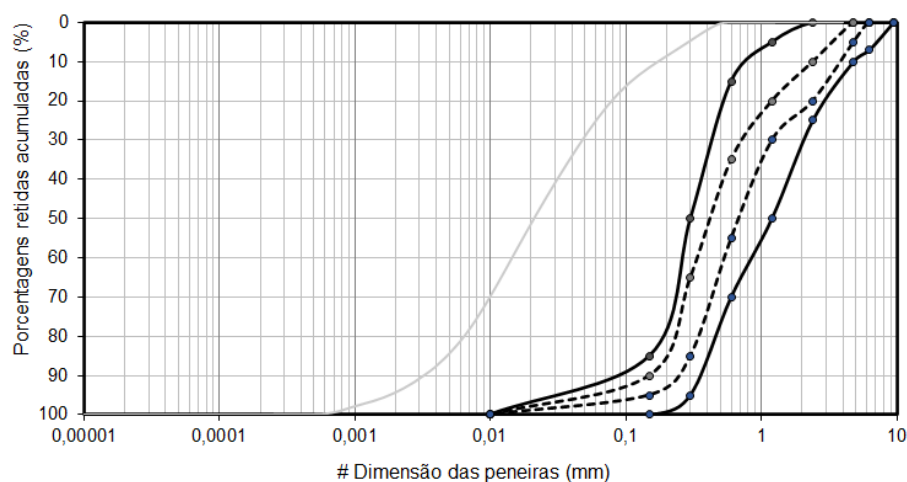
Figura 7 – Análise granulométrica da areia natural



Fonte: Autora

Os resultados da análise granulométrica do fíler calcário estão apresentados na Figura 8.

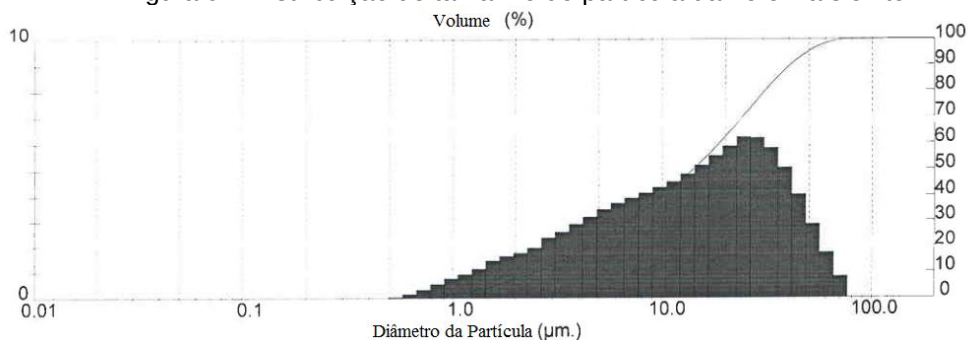
Figura 8 – Análise granulométrica do fíler calcário



Fonte: Autora

A Figura 9 expressa a distribuição de tamanho de partícula da nefelina sienito e na Tabela 5, os resultados deferidos da análise química do agregado. Ressalta-se que o material apresenta partículas inferiores a 100 μm . É possível observar que o material apresenta altos teores de sílica e baixos teores de alumina.

Figura 9 – Distribuição de tamanho de partícula da nefelina sienito



Fonte: Autora

Tabela 5 – Análise química da nefelina sienito

Elementos	Sienito
SiO ₂	63,2
Al ₂ O ₃	19,6
Fe ₂ O ₃	0,23
CaO	0,38
Na ₂ O	6,9
K ₂ O	8,3
TiO ₂	0,14
MgO	0,01
ZrO ₂	traços

Fonte: Autora

4.2. ENSAIOS DO CONCRETO EM ESTADO FRESCO

De acordo com a metodologia descrita, foram conduzidos ensaios para avaliar a consistência do concreto por meio de testes de espalhamento e simulação da impressão

utilizando a Extrusora 2. Os resultados e imagens do ensaio de consistência para o traço de referência estão apresentados na Figura 10 e as impressões estão apresentadas na Figura 11.

Figura 10 – Espalhamento do traço de referência

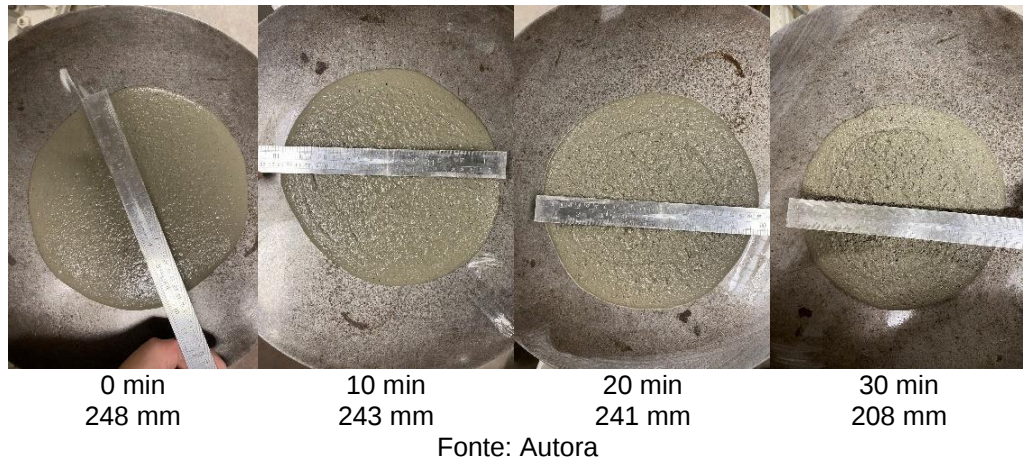


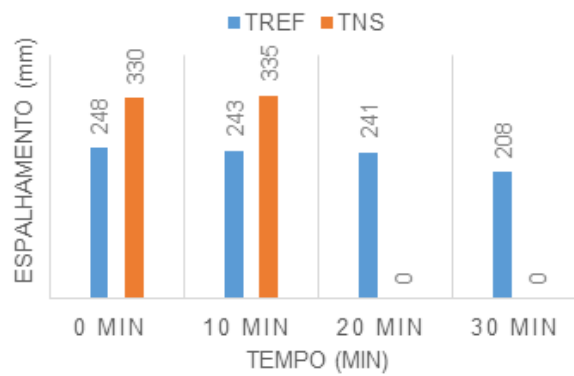
Figura 11 – Impressão do traço de referência



Fonte: Autora

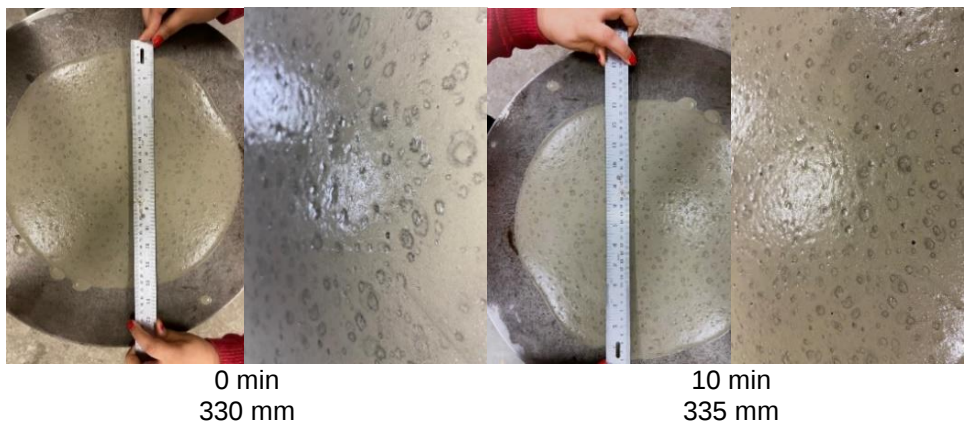
É possível observar que, para o traço de referência (TREF), houve redução pequena do espalhamento ao longo dos 30 minutos observados (Figura 12). Isso era esperado, uma vez que com o avanço do tempo, o aditivo superplastificante reduz seu efeito. Em contrapartida, o traço com nefelina sienito (TNS) apresentou comportamento autoadensável (Figura 13), aumentando seu espalhamento ao longo do tempo, até impossibilitar o ensaio de espalhamento e da simulação da impressão, por assumir características de alta fluidez a partir dos 20 minutos (Figura 14). Além disso, observou-se que bolhas de ar incorporado apareceram durante o espalhamento do TNS, podendo demonstrar a segregação dos agregados. É possível que isso tenha acontecido pois o fíler é mais fino que a nefelina sienito.

Figura 12 – Resultados da consistência dos traços ensaiados



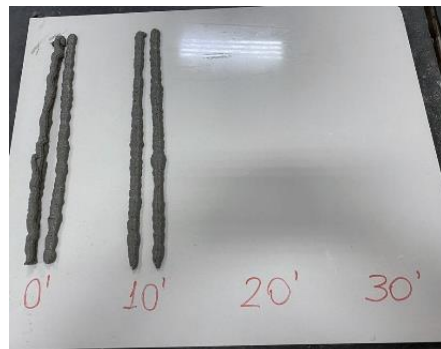
Fonte: Autora

Figura 13 – Espalhamento do traço com nefelina sienito – TNS



Fonte: Autora

Figura 14 – Impressão do TNS



Fonte: Autora

Quando comparado aos resultados deferidos por Rubin (2021), percebe-se que houve uma perda na trabalhabilidade do concreto semelhante de cerca de 15% aos 30 minutos em ambos os traços de resistência.

4.2. ENSAIOS DO CONCRETO EM ESTADO ENDURECIDO

4.2.1. Velocidade de propagação da onda ultrassônica

Antes de proceder com os ensaios de resistência à compressão, foram obtidas as leituras das velocidades de propagação de ondas ultrassônicas, cujos resultados estão apresentados de maneira clara e concisa na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados da velocidade de propagação da onda ultrassônica

Traço	Idade (dias)	Altura (mm)	Velocidade (m/s)	E (GPa)
TREF	7	98,17	4541	46,00
TNS		97,46	4057	28,72

Fonte: Autora

A Tabela 7 demonstra a classificação utilizada por Bauer (2019) para relacionar velocidades de propagação de ondas ultrassônicas às condições do concreto.

Tabela 7 – Classificação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

Velocidade de propagação (m/s)	Condições do concreto
≥ 4500	Excelente
4500 a 3500	Boa
3500 a 3000	Regular
3000 a 2000	Geralmente ruim
< 2000	Ruim

Fonte: Whitehurst (1996) *apud* Bauer (2019)

Ao analisar os resultados, a classificação da qualidade do concreto TREF é excepcional, uma vez que a velocidade de propagação de onda ultrassônica foi superior a 4500 m/s. Já no caso do concreto TNS, a qualidade é considerada boa, uma vez que a velocidade obtida ficou abaixo desse limite.

Além disso, notou-se que o módulo de elasticidade do concreto com nefelina sienito reduziu cerca de 60% quando comparado ao TREF. Tal acontecimento pode ser explicado pela redução de resistência mecânica à compressão simples ou pelo uso do material em si.

4.2.2. Resistência à compressão simples

Os resultados médios dos três corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples, para o traço de referência (TREF) e traço com nefelina sienito (TNS), na idade de cura avaliada de 7 dias são apresentados na Tabela 8. Ainda, a Figura 15 apresenta os resultados médios com seus respectivos desvios padrões comparativamente.

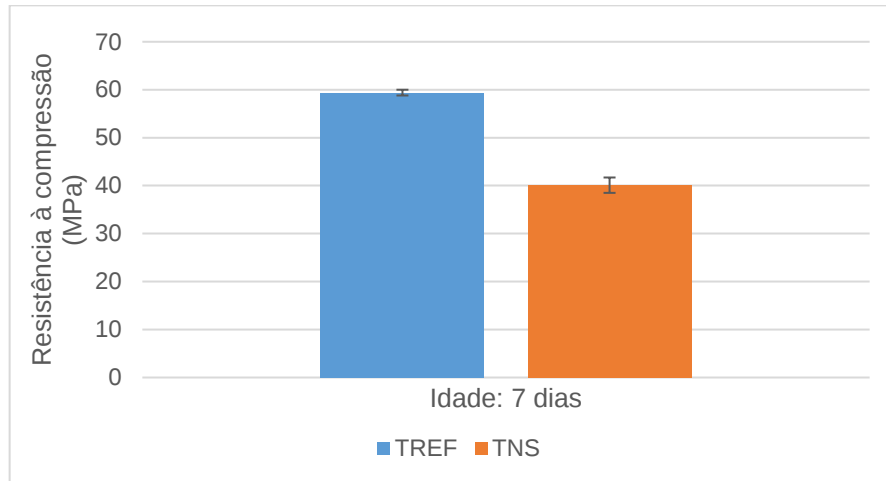
Tabela 8 – Resultados comparativos de resistência à compressão simples

Traço	Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)
TREF	7	59,4 ± 0,6

TNS	7	40,1 ± 1,6
-----	---	------------

Fonte: Autora

Figura 15 – Resultados de Resistência à compressão simples



Fonte: Autora

Observa-se que houve uma redução de quase 70% na resistência mecânica à compressão do traço com nefelina sienito quando comparado ao traço com sílica ativa. Essa redução pode ser explicada pelas mesmas justificativas possíveis apresentadas pelo aumento do espalhamento cônico: segregação e exsudação dos agregados no TNS, causados pela maior grossura da nefelina sienito. De qualquer forma, ambos os traços apresentam resistência à compressão mecânica necessária para serem utilizados na impressão 3D de concreto, porque apresentam alta resistência inicial.

Ademais, quando comparado com os resultados de Rubin (2021), a resistência à compressão do TREF, aos 7 dias, é 16% menor que o resultado obtido pela pesquisadora. Enquanto o TNS, quando comparado ao traço da pesquisadora Cruz (2017) com brita 1 ao invés de areia natural e sílica ativa, apresenta resistência mecânica aproximada aos resultados obtidos com dosagem de nefelina sienito variada.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, foi avaliada a aplicabilidade de materiais cimentícios impressos em uma impressora 3D para fins estruturais na área da construção civil, utilizando nefelina sienito como agregado miúdo. Foram realizados ensaios no estado fresco e no estado endurecido do concreto, comparando os resultados obtidos com a adição de nefelina sienito aos resultados previamente obtidos com a adição de fíler calcário. Constatou-se que o traço de concreto desenvolvido com a adição do fíler calcário apresenta as propriedades necessárias para utilização na impressão 3D, enquanto o traço com nefelina sienito exibe alta

resistência inicial, porém sua consistência é similar à de um concreto autoadensável, impossibilitando sua aplicação.

Além disso, todos os objetivos específicos também foram atingidos, considerando que foram definidos mecanismos de avaliação da extrusão do concreto a partir de uma extrusora experimental, desenvolveu-se um traço de referência para impressão 3D e, assim, compará-lo ao traço com nefelina sienito.

Recomenda-se para pesquisas futuras a substituição maior do cimento Portland por fíler calcário e materiais pozolânicos, com o objetivo de reduzir o consumo de cimento do concreto e assim, possibilitar maiores benefícios econômicos e ambientais. Finalmente, sugere-se também que novas formulações de dosagens contendo nefelina sienito sejam estudadas, a fim de verificar sua aplicabilidade quando combinada com diferentes materiais.

5. REFERÊNCIAS

- ABIKO, Alex Kenya; MARQUES, Felipe Silveira; CARDOSO, Francisco Ferreira. Análise econômica da construção civil. *In: Setor de construção civil: segmento de edificações*, p. 17-33, 2015.
- ABRAMAT; FGV. **Perfil da Cadeia Produtiva da Construção e da Indústria de Materiais e Equipamentos: A infraestrutura no Brasil - limitações e perspectivas**. 2014. p. 29-33. Disponível em: <http://www.abramat.org.br/datafiles/publicacoes/materiais-equipamentos2014.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2022.
- ABREU, Sofia Alexandra Chaves. **Impressão 3D baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo**. Portugal: Projeto de Pós-Graduação da UP/Ciências da engenharia e tecnologia, 2015.
- ABREU, Victor Hugo Souza de; SOUZA, Gabriel Marques de. Uma revisão bibliométrica sobre a impressão 3D em concreto. *In: Brazilian Journal of Production Engineering-BJPE*, p. 50-62, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. **NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro, 2019.
- _____. **NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2016.
- BARBOSA, Marcella de Sena. **Desenvolvimento de compósitos para impressão 3D com consumo de cimento reduzido por meio de adições minerais**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia. Natal, 2022. 80 f.
- BAUER, L.A. Falcão. **Materiais de construção – Volume 1**. 6. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2019.
- CHEN, Y. et al. **Limestone and Calcined Clay-Based Sustainable Cementitious Materials for 3D Concrete Printing: A Fundamental Study of Extrudability and Early-Age Strength Development**. *Applied Sciences*, v. 9, n. 13, p. 2761, 2019.

CHEN, Y. et al. (2021). **The Role of Supplementary Cementitious Materials in 3D Concrete Printing: A Review**. *Materials*, 14(3), 662.

CRUZ, Caroline Moraes da. **Efeito da adição de sienito nas propriedades de concretos: estudo das equações de empacotamento e propriedades tecnológicas**. Minas Gerais: Programa de Pós-Graduação da UNIFAL/Ciência e Engenharia de Materiais, 2017.

DEL ROVERI, Carolina et al. Caracterização tecnológica para aproveitamento de matéria-prima sienítica com nefelina. *In: Revista do Instituto Geológico*, v. 34, n. 2, p. 27-39, 2013.

FLORÊNCIO, Eduardo Quintella et al. Concreto para uso em impressora 3d e sua utilização na construção de edificações: um estudo prospectivo. *In: Cadernos de Prospecção*, v. 10, n. 3, p. 578, 2017.

GRENZEL, Lucas Yagor dos Santos. **Estudo das técnicas de fabricação aditiva (impressão 3d) e da sua aplicação na construção civil**. Rio Grande do Sul: Projeto de Graduação da Unijuí/Engenharia Civil, 2019.

JUMIKIS, A.; MEŽNERIS, J. (2016). **Influence of microsilica on concrete properties**. *Procedia Engineering*, 151, 427-431.

KAUR, Gulshan et al. 3D Printing: A Review of Material, Properties and Application. *In: Advances in Manufacturing and Industrial Engineering*, p. 555-563, 2021.

KHOSHNEVIS, Behrokh. Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. *In: Automation in construction*, v. 13, n. 1, p. 5-19, 2004.

LOPES, M. P. C. et al. **Efeito da adição de sílica ativa na resistência mecânica e durabilidade do concreto de alta resistência**. *Revista Matéria*, v. 20, n. 1, p. 135-145, 2015.

PACHECO, J.; BILESKY, P.; MORAIS, T. R.; GRANDO, F.; HELENE, P. **Considerações sobre o módulo de elasticidade do concreto**. *In: Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto*. Natal, 2014.

PAIM, Fabiane Gomes; ALMEIDA, Márcia Rego Sampaio de. Estudo prospectivo sobre a utilização da impressora 3d na área da construção civil. *In: Cadernos de Prospecção*, v. 11, p. 463, 2018.

PINTO, Amândio Teixeira. **Introdução ao estudo dos geopolímeros**. Portugal: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2006.

PORTO, Thomás Monteiro Sobrino. **Estudo dos avanços da tecnologia de impressão 3D e da sua aplicação na construção civil**. Rio de Janeiro: Projeto de Graduação UFRJ/Escola Politécnica, 2016.

RAULINO, Bruno Ribeiro. **Manufatura aditiva: desenvolvimento de uma máquina de prototipagem rápida baseada na tecnologia FDM (modelagem por fusão e deposição)**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecatrônica). Brasília: Universidade de Brasília, 2011.

RUBIN, Ariane Prevedello et al. **Influência da taxa de estruturação nas propriedades reológicas, físicas e mecânicas de concretos para impressão 3D (3DCP)**. Santa Catarina, 2021.

SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida. Nefelina sienito. *In: LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando A. Freitas (org.). Rochas e minerais industriais: usos e especificações*. CETEM, 2008.

SILVA, Alexandre Macêdo da et al. **Impressão 3D na Construção Civil**. Goiás: Atividade Integrativa da uniEVANGÉLICA/Engenharia Civil, 2019.

TREGGER, N. A. et al. **Influence of clays on the rheology of cement pastes**. *Cement and Concrete Research*, v. 40, n. 3, p. 384–391, 2010.

TRUONG, Andrew. **State-of-the-Art Review on 3D Printing Technology Applications in Construction**. Estados Unidos: Projeto de Pós-Graduação da UC Irvine/Ciências, 2019.

VESPALEC, Arnošt et al. Interface Behavior and Interface Tensile Strength of a Hardened Concrete Mixture with a Coarse Aggregate for Additive Manufacturing. *In: Materials*, v. 13, n. 22, p. 5147, 2020.

VOLKMANN, Alexandre Ritter. **Estudos de rotas de beneficiamento da nefelina-sienito para aplicação como fundente na massa cerâmica do porcelanato**. Rio Grande do Sul: Projeto de Pós-Graduação da UFRGS/Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, 2004.

As autoras agradecem ao Instituto Presbiteriano Mackenzie pela bolsa de Iniciação Científica da aluna, a Universidade Presbiteriana Mackenzie e a Escola de Engenharia pela disponibilização de seus laboratórios, bem como de seus técnicos para a realização dos ensaios realizados.

Contatos: quelhcarvalho@gmail.com e ligia.real@mackenzie.br