



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA (CT)  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA (CCET)



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS

## TESE DE DOUTORADO

# Avaliação de misturas cimentícias para impressão 3D com desempenho térmico otimizado

Rísia Amaral Araújo

Orientador: Prof. Dr.  
Antonio Eduardo Martinelli

Agosto de 2022  
Natal – RN

**Rísia Amaral Araújo**

**Avaliação de misturas cimentícias para impressão 3D com desempenho térmico otimizado**

Tese apresentada ao Centro de Ciências Exatas e da Terra da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de doutor em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Eduardo Martinelli

Agosto de 2022  
Natal – RN

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Araújo, Rísia Amaral.

Avaliação de misturas cimentícias para impressão 3D com desempenho térmico otimizado / Rísia Amaral Araújo. - 2022. 125 f.: il.

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Natal, RN, 2022. Orientador: Prof. Dr. Antonio Eduardo Martinelli.

1. Concreto impresso 3D - Tese. 2. Agregado leve de argila expandida - Tese. 3. Design de experimentos - Tese. 4. Reometria por squeeze-flow - Tese. 5. Conforto térmico - Tese. I. Martinelli, Antonio Eduardo. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 691.32

## AGRADECIMENTOS

Faz-se necessário agradecer nominalmente ao Poder Superior deste Universo e àqueles que diretamente ou indiretamente, participaram, na elaboração desta Tese. Dessa forma, expresso aqui os meus mais sinceros agradecimentos:

Aos meus pais e familiares pelo incentivo e apoio.

Ao meu orientador Prof. Dr. Antonio Eduardo Martinelli pela oportunidade de pesquisar dentro da minha área de formação, empenho em fornecer os meios/tecnologias para desenvolvimento de um novo composto e pela orientação desse trabalho;

Ao, Prof. Dr. Kleber Cavalcanti, pela orientação, compreensão, paciência e parceria nos ensaios, além de ter aberto o caminho durante o mestrado para que eu viesse integrar o LABCIM posteriormente;

Aos bolsistas Ana Luiza, Uesley e Carol, pelo auxílio, sugestões, empenho e dedicação depositados para a realização dos ensaios de laboratório;

Ao Instituto de química pela disponibilização da estrutura laboratorial, equipamentos e ensaios, nas pessoas do Diretor Eledir, técnico geral, Alberto, auxiliar de serviços, Pedro e técnico do Laboratório de Análises Térmicas Joadir.

Ao Laboratório de Peneiras Moleculares (Labpemol), pelas análises DRX ,FRX e ensaio *Chapelle*.

Ao LABCIM, em especial pelas sugestões e esclarecimentos teóricos, disponibilização da estrutura laboratorial, análises e ensaios, nas pessoas do prof. Julio, Paulo Henrique, Msc Will Batista e técnicos Adriano e Fabrício;

Ao LABMEM, pela realização dos ensaios mecânicos e PPgCEM pela realização das análises MEV, FRX e DRX;

Ao técnico do Laboratório de materiais de construção, Sandro, e aos bolsistas pelo auxílio prestado na realização dos ensaios;

E a CAPES-CNPQ pela concessão da bolsa de estudo e apoio da pesquisa.

## RESUMO

A impressão 3D de concretos (3DCP) tem ganhado forte impulso ao longo dos últimos anos. Porém, misturas capazes de otimizar o conforto térmico de estruturas impressas ainda precisam ser estudadas. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho é avaliar a influência do teor de substituição de areia natural por agregado leve de argila expandida (LECA) nas propriedades mecânicas e físicas de misturas à base de cimento Portland para 3DCP. As misturas foram formuladas a partir de um planejamento fatorial  $2^2$  tendo como fatores independentes o teor de substituição (%sub) de areia por LECA e a relação agregado sobre ligantes (a/b). A substituição da areia natural por LECA foi realizada em volume, em função da diferença de densidade entre eles. A técnica de Squeeze-flow, em conjunto com o ensaio de *flow-table*, foi utilizada para avaliar o comportamento reológico das misturas para 3DCP contendo agregados de até 1,2 mm de diâmetro máximo. Os resultados experimentais obtidos através do ensaio de squeeze-flow mostraram que a substituição de areia por LECA aumentou a tensão de escoamento e a viscosidade da mistura, o que resulta em aumento da construtibilidade sem deixar de apresentar trabalhabilidade equivalente a mistura de referência. Além disso, constatou-se que a substituição da areia pela LECA aumentou o isolamento térmico sem comprometer importantes propriedades estruturais, como resistência mecânica e porosidade. Por fim, o comportamento térmico dos compósitos foi modelado e foi encontrada uma equação dependente apenas do fator teor de substituição (%sub).

**Palavras-chave:** Concreto impresso 3D, agregado leve de argila expandida, design de experimentos, reometria por *squeeze-flow*, conforto térmico.

## **ABSTRACT**

**TITLE:** Evaluation of cement mixes for 3D printing with optimized thermal performance

The development of 3D printed concrete mixes has been significantly studied during the last few years. However, the optimization of the thermal comfort of printed structures still requires further improvement. Therefore, the objective of the present study is to evaluate the effect of replacing natural sand by light expanded clay aggregate (LECA) on the properties of Portland-based 3DCP mixes. The mixtures were defined by a 2<sup>2</sup> factorial design with independent factors as the substitution content (% sub) of sand by LECA and the aggregate relation to binders ratio (a/b). The substitution of natural sand by LECA was carried out in volume% due to the difference in density, to maintain the granulometric distribution of the mixes. The compression flow technique together with the well-known consistency table were used to evaluate the rheological behavior of 3DCP mixes containing aggregates with up to 1.2 mm in maximum diameter. The experimental results show that the substitution of sand by LECA increased the yield stress of the mixes and improved their constructability, maintaining the same workability, compressive strength and porosity as the reference LECA-free mixture. The thermal insulation behavior of the mixes was improved by the use of LECA in the composition. The thermal behavior of the mixes was modeled and an equation dependent only on the (%sub) factor was found.

**Keywords:** 3D printed concrete, light expanded clay aggregate, mix design, squeeze flow rheometry, thermal comfort.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	4
RESUMO .....	5
ABSTRACT .....	6
LISTA DE FIGURAS .....	9
LISTA DE tabelas.....	11
CAPÍTULO 1 .....	12
INTRODUÇÃO .....	12
1.1 Objetivo Geral.....	17
1.2 Objetivos específicos.....	17
CAPÍTULO 2 .....	12
REFERENCIAL TEÓRICO .....	12
2.1 Impressão de concreto 3D (3DCP) .....	12
2.1.1 Materiais componentes de misturas 3DCP .....	14
2.2 Agregado leve de argila expandida (LECA).....	15
2.2.1 Porosidade e absorção de água .....	17
2.3 Propriedades dos materiais 3DCP .....	19
2.3.1 Extrudabilidade .....	20
2.3.2 Reologia e comportamento de materiais extrudados .....	20
2.3.3 Tempo de abertura .....	22
2.3.4 Construtibilidade .....	23
2.3.5 Propriedades no estado endurecido .....	25
2.3.6 Proporções de misturas 3DCP .....	26
2.4 Métodos de ensaio para caracterizar 3DCP .....	27
2.4.1 Métodos para caracterização no estado fresco - Reometria por Squeeze-flow .....	27
2.4.2 Comportamento mecânico de concreto fresco .....	33
2.4.3 Trabalhabilidade com ensaio da mesa de consistência .....	34
2.4.4 Métodos de teste “Assentamento De Camada” .....	36
2.4.5 Teste de extrudabilidade e construtibilidade.....	38
2.4.6 Métodos para caracterização no estado endurecido - Resistência à flexão, compressão e de adesão entre camadas .....	39
2.5 Conforto térmico das edificações .....	40
2.5.1 Características térmicas .....	41
MATERIAIS E MÉTODOs .....	43
3.1 Materiais e métodos .....	45
3.1.1 Caracterização dos materiais de partida.....	45
3.1.2 Análise química (FRX).....	49

3.1.3 Análise microscópica (MEV).....	49
3.1.4 Estudos preliminares das formulações .....	51
3.1.5 Formulações e planejamento de experimentos .....	53
3.1.6 Análises estatísticas .....	55
3.1.7 Metodologia de mistura e moldagem dos espécimes fundidos.....	56
3.1.8 Metodologia de mistura dos espécimes impressos .....	57
3.1.9 Densidade de Massa no Estado Fresco e teor de ar incorporado .....	57
3.1.10 Squeeze-flow .....	60
3.1.11 Tensão de escoamento .....	63
3.1.12 Condições de impressão .....	63
3.1.13 Ensaio no estado endurecido .....	64
3.1.14 Absorção, porosidade e módulo de elasticidade .....	65
3.1.15 Propriedades térmicas com amostras fundidas.....	65
3.1.16 Resistência a tração na flexão, compressão .....	66
3.1.17 Modelagem dos resultados com base no planejamento experimental .....	67
3.2 Caracterização das composições fundidas.....	67
3.3 Caracterização de composições 3DCP .....	68
3.4 Simulação de atraso térmico de blocos impressos.....	70
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>72</b>
<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>72</b>
4.1 Caracterização das composições formuladas .....	72
4.1.1 Densidade aparente no estado fresco e teor de ar incorporado .....	73
4.1.2 Trabalhabilidade .....	76
4.1.3 Reometria por fluxo na compressão .....	78
4.1.4 Reometria por fluxo na compressão – Tensão de escoamento.....	82
4.1.5 Reometria por fluxo na compressão – Viscosidade .....	85
4.2 Propriedades no estado endurecido .....	87
4.2.1 Absorção, porosidade e módulo de elasticidade .....	88
4.2.2 Resistência mecânica à tração na flexão.....	90
4.2.3 Resistência mecânica à compressão.....	91
4.2.4 Caracterização térmica das amostras.....	93
4.2.5 Avaliação estatística dos resultados das propriedades térmicas .....	99
4.2.6 Simulação do atraso térmico com os blocos impressos.....	103
4.3 Comparação das propriedades mecânicas e físicas de amostras fundidas e impressas.....	105
4.3.1 Comparação das propriedades mecânicas de amostras fundidas e impressas.....	108
<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>111</b>
<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>113</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>114</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de construções .....	12
Figura 2 - Exemplo de tecnologia de impressão de concreto: uma bomba de concreto bombeando concreto para uma cabeça de impressão robótica.....	13
Figura 3 - Sinais de pronunciada infiltração local de água (destacada) nas interfaces da camada .....	14
Figura 4 - (a) Esquema do dispositivo; (b) Geração de núcleo duro pela RSA; (c) Equilíbrio do sistema e (d) modelagem DEM da extrusão de argamassas.....	13
Figura 5 - O fluxograma de produção da LECA.....	15
Figura 6 – a) Diferentes tamanhos de LECA; b) Furos interconectados e cavidades cheias de ar de diferentes tamanhos.....	16
Figura 7 - O comportamento de fluidez idealizado para um material de impressão cimentício é representado graficamente em termos de evolução de fluidez.....	21
Figura 8 - material tixotrópico solução/gel .....	22
Figura 9 - Filamentos extrudados da mistura R40 em diferentes tempos de descanso .....	23
Figura 10 - a) colapso das camadas em função da altura e b) colapso por deformação excessiva. ....	24
Figura 11- Diferentes padrões de falha e análise de capacidade de construção do 3DPC.....	25
Figura 12 - Regiões investigadas ao microscópio: referência e interfaces cortadas .....	26
Figura 13 - Efeito do projeto de mistura na retenção de forma da largura do filamento extrudado .....	26
Figura 14 - a) Tipologia de fluxo de extrusão de pasta cerâmica: fluxo de cisalhamento e convergente para comprimento $L_1$ ; b) geometria do teste de compressão e c) início do teste para amostra de argila .....	28
Figura 15 - Teste de compressão com materiais cimentícios divulgados no meio científico .....	29
Figura 16 - Exemplo de ajuste de curva.....	30
Figura 17 – Gráfico típico do ensaio de Squeeze-Flow controlado por taxa de deslocamento: Curva de deslocamento vs.Carga .....	31
Figura 18 - Falha típica observada em testes de compressão em concreto fresco. Uma amostra de $t = 15$ min mostra “barril” (esq), enquanto uma amostra de idade de $t = 90$ min mostra um plano distinto de falha de cisalhamento (direita). ....	33
Figura 19 - Ensaio recomendados com a mesa de fluxo .....	34
Figura 20- Relação entre fator de retenção de forma (SRF) e tensão de escoamento das misturas extrudáveis .....	35
Figura 21 - uma amostra de camada dupla impressa com intervalo de tempo zero, .....	37
Figura 22 - Resultados da impressão 3D assíncrona: a) o cabeçote de impressão é muito rápido, levando a camadas descontínuas; b) o cabeçote de impressão é muito lento, levando a camadas com saliências .....	38
Figura 23 - a) Representação da extração do espécime da parede de concreto impressa, b – d) configurações do teste de flexão; e - g) configurações do teste de compressão. ....	39
Figura 24 - Zoneamento bioclimático .....	40
Figura 25 - Condutividade térmica em elemento de vedação b) valores de condutividade.....	41
Figura 26 - Fluxograma da pesquisa .....	43
Figura 27- FICHA TÉCNICA DO PRODUTO (Argila expandida tipo laminada 2,5) Fonte: CINEXPAN.....	45
Figura 28-Distribuições de tamanho de partículas Peneiramento e análise a laser ( $d < 150 \mu\text{m}$ ).....	47

Figura 29-Microscopia eletrônica de varredura de agregados. a) Areia em x50; b) LECA em x50; c) partícula LECA i) a 500 x; d) Partícula LECA ii) a 2000 x. ....	50
Figura 30 - Fluxograma de definição da composição base.....	52
Figura 31 - a)Espalhamento, b) extrusão com pistola, c)impressão da mistura R100 e d) detalhe da pistola usada na extrusão .....	53
Figura 32 - Design Composto Central k = 2 fatores.....	54
Figura 33 - homogeneização dos materiais secos e mistura para alimentar impressora ....	57
Figura 34 - Configuração experimental do teste de vazão (a) antes da remoção do molde (b) a dispersão do material após deixar a mesa cair 25 vezes. ....	60
Figura 35 - Ilustração do ensaio de compressão no estado fresco .....	60
Figura 36 - Preparação da amostra para ensaio de Squeeze flow .....	61
Figura 37- a) prisma impresso; b) esquema do ensaio de atraso térmico; c) ilustração dos espécimes extraídos e d) representação do ensaio de compressão .....	64
Figura 38 - Orientações de camada impressas em 3D para os testes físicos e mecânicos	65
Figura 39-analisador de propriedades térmicas KD2 Pro com o sensor de agulha dupla ...	66
Figura 40 - Configuração do ensaio de flexão: a-b) carregamento perpendicular e paralelo as camadas; c) rompimento entre camadas no ensaio .....	67
Figura 41 - Esquema do teste de atraso térmico .....	70
Figura 42-Ensaio de extrudabilidade com pistola de grauteamento: a) R100, b)N2 .....	73
Figura 43-Superfície de resposta para: a) Densidade no estado fresco e b) Teor de ar incorporado .....	73
Figura 44 - Perda de trabalhabilidade das misturas por flow-table .....	77
Figura 45 - Curvas cargas x Deslocamento: a) Squeeze-flow aos 15 min; b)Squeeze-flow aos 60 m .....	79
Figura 46-Gráfico tensão de escoamento para deformação de 0,5 mm .....	82
Figura 47- Curvas de viscosidade ( $\eta B$ ) vs. taxa de deformação ( $\epsilon B$ ) testados aos 15 min (a) e 60 min (b).....	85
Figura 48 - Viscosidade em ordem crescente para as misturas .....	86
Figura 49 - Superfície de resposta para a) absorção; b) índice de vazios .....	88
Figura 50-Superfície de resposta para módulo de elasticidade (GPa).....	89
Figura 51 - Resistência à tração na flexão das composições 3DCP aos 7, 28 e 120 dias ..	90
Figura 52- Resistência à compressão das composições 3DCP aos 7, 28 e 120 dias.....	91
Figura 53 - Superfície de resposta obtidas com o KD2pro: a) e b) resistividade térmica 21 e 120 dias; c) e d) condutividade térmica 21 e 120 dias; e) e f) Capacidade calorífica 21 e 120 dias; .....	94
Figura 54 - Isolamento de cada componente do protótipo: construído com mistura de referência R0; b) construído com mistura N2 do planejamento experimental; b) construído com mistura N8 do planejamento experimental.....	104
Figura 55 - Comparação entre propriedades físicas a)massa específica, b) absorção e c) índice de vazios .....	106
Figura 56-Comparação entre as resistências à tração na flexão .....	108

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Levantamento das composições para 3DCP .....	12
Tabela 2 - Materiais com diferentes de tamanho de LECA.....	19
Tabela 3 - características da zona bioclimática 8 .....	41
Tabela 4- Propriedades físicas dos materiais .....	46
Tabela 5 - Distribuição de tamanhos de partículas (range 0.10-500 $\mu\text{m}$ ).....	47
Tabela 6 - Composição em termos de óxidos .....	49
Tabela 7- Níveis e fatores do programa experimental .....	54
Tabela 8 - Composição de misturas e propriedades no estado fresco .....	55
Tabela 9 - Composições e propriedades da mistura .....	72
Tabela 10 - Perda de trabalhabilidade ao longo do tempo .....	77
Tabela 11-Resumo das respostas modeladas no planejamento de experimentos .....	87
Tabela 12 - caracterização térmica até os 21 dias de idade e aos 120 dias. ....	93
Tabela 13 - Quadro de equações .....	99
Tabela 14-ANOVA das propriedades térmicas .....	100

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva é uma das técnicas modernas que estão surgindo na indústria da construção civil, caracterizando-se por ser rápida, de baixo custo e um processo de construção ecologicamente correto (ALKHALIDI; HATUQAY, 2020). Um modelo de manufatura aditiva é a impressão 3D em concreto (3DCP), técnica que produz peças camada por camada usando materiais cimentícios (ALCHAAR; AL-TAMIMI, 2021); e vem permitindo construir com maior flexibilidade, automação dos processos e de forma livre (sem uso fôrmas) em comparação com a construção convencional (em grande parte manual) (BAI *et al.*, 2021). Além disso, a 3DCP tem potencial para personalização em massa e fabricação remota e rápida de componentes estruturais e arquitetônicos complexos (KRISTOMBU BADUGE *et al.*, 2021). A possibilidade de construir estruturas de concreto sem forma é uma grande vantagem em termos de taxa de produção, liberdade arquitetônica e redução de custos; como exemplo, a cofragem representa 35-60 % dos custos totais das estruturas de concreto (PERROT; RANGEARD; PIERRE, 2016) .

As formulações para impressão 3D, chamadas normalmente de concreto, têm em comum os constituintes usados nas argamassas e concretos de alto desempenho, com exceção geralmente dos agregados graúdos. Assim, uma formulação para impressão costuma ter cimento de alta resistência inicial, areia, cargas minerais inertes, como filler calcário, pozolanas, fibras de polipropileno, modificadores de viscosidade (VMA) e baixas relações água/cimento ( $a/c$ ). Atrelado a essas características, o teor agregado sobre aglutinantes ( $a/b$ ) é baixo favorecendo formulações com teores próximos de areia e aglutinantes ou ainda, predominância de aglutinantes sobre a areia (HAMBACH; VOLKMER, 2017; MA; LI; WANG, 2018a; NERELLA; HEMPEL; MECHTCHERINE, 2019; PAUL *et al.*, 2018; SANJAYAN *et al.*, 2018; SOLTAN; LI, 2018; WENG *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2018a; ZHANG, Y. *et al.*, 2019). Essa emergente formulação ainda costuma usar fibras, mais comumente de polipropileno, para ajudar na extrusão e diminuir as fissuras de retração, devido ao alto teor de cimento usado nesse tipo de compósito, junto com sua grande área superficial exposta na deposição das camadas.

Essa tecnologia é caracterizada por apresentar altas resistência mecânica a compressão e baixos valores da relação  $a/b$ . Os pesquisadores vêm usando relações  $a/b$  na faixa de 0.6 a 1.7 (HAMBACH; VOLKMER, 2017; MA; LI; WANG, 2018a; NERELLA;

HEMPEL; MECHTCHERINE, 2019; PAUL *et al.*, 2018; SANJAYAN *et al.*, 2018; SOLTAN; LI, 2018; WENG *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2018a; ZHANG, Y. *et al.*, 2019). Por exemplo, Alchaar *et al.* (2021) usaram proporção de areia para aglutinante (a/b) de 0,71, para estudar a influência de climas quentes na impressão 3D de concreto, obtendo resistência à compressão da mistura de 47 MPa em cubos de controle aos 7 dias de idade. Portanto, os compósitos a base de cimento Portland são materiais resistentes desde a início do seu desenvolvimento, tomando o trabalho de Le *et al.* (2012b), que obteve resistências mínimas de 75 MPa aos 28 dias, como exemplo.

Dessa maneira, há o consenso de que alta resistência à compressão desses compósitos age como um fator de segurança, visto que as paredes e demais elementos construídos não têm a mesma resistência à compressão do material, em função da geometria da parede. Isso é visto no estudo de Daungwilailuk *et al.* (2021), que compararam as resistências à compressão da parede impressa com a resistência à compressão do material moldado e encontraram 12% de queda nessa propriedade.

Além das proporções dos materiais, outra preocupação consiste na retenção de forma e coesão da mistura que podem ser ajustados pelo tamanho de partícula dos agregados utilizados nos materiais e uso de VMA 3DCP. Foi bem estabelecido que a finura das partículas é essencial para promover uma boa fluidez e coesão, como acontece com as argilas. Nesse contexto, as pesquisas vêm utilizando tamanhos máximos de agregado com 1,2 mm (WENG *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2018b; ZHANG, Y. *et al.*, 2019) juntamente com materiais de preenchimento, como calcário, pó de quartzo e outros tipos de *fillers*, para fornecer partículas menores do que a faixa de 63  $\mu\text{m}$ . Nesse sentido, por exemplo, Sanjayan *et al.* (2019) estudaram areias menores que 0,5 mm, fora da faixa comercial e convencional de agregados miúdos, esse estudo ainda enfatiza o uso de VMA para melhorar as propriedades dos materiais extrudáveis à base de cimento. O VMA à base de celulose se destaca nas composições para 3DCP atribuindo coesão, aumentando sua viscosidade, impedindo a segregação durante o bombeamento e concedendo tixotropia à mistura (CHAVES FIGUEIREDO; ÇOPUROĞLU; SCHLANGEN, 2019).

Alkhalidi *et al.* (2021) investigaram o efeito das cavidades resultantes de diferentes configurações de impressão nas propriedades térmicas. O menor valor de transmitância térmica obtido neste estudo foi de 0,15 W/m<sup>2</sup>.K, resultado de uma configuração de parede e material de impressão distintos. No entanto, estudos adicionais sobre outras misturas e

materiais de enchimento precisam ser realizados para otimizar ainda mais o conforto térmico das edificações.

Nos últimos anos, o isolamento térmico dos edifícios tem atraído grande atenção, devido ao seu potencial de economia de energia a longo prazo (OMRANE; RABEHI, 2020). Visto que a energia necessária para aquecimento e resfriamento e o conforto térmico de edifícios são fortemente influenciados pelas propriedades termo-físicas dos materiais de construção (LATHA; DARSHANA; VENUGOPAL, 2015; OMRANE; RABEHI, 2020). Materiais de construção com alta porosidade contribuem para baixa condutividade térmica (KOKSAL; MUTLUAY; GENCEL, 2020a). Koksall et al. (2020b), Rashad (2018) e Kim et al. (2003) também afirmaram que o baixo peso unitário é importante para reduzir as cargas permanentes das estruturas. Além disso, existem algumas formas de produzir argamassas ou concretos com alta porosidade, como agentes incorporadores de ar e de espuma. Ademais, vários tipos de agregados leves podem ser usados em misturas à base de cimento para aumentar a porosidade. Compósitos à base de cimento leve foram amplamente fabricados com agregados como pedra-pomes (DEMIRBOĞA; GÜL, 2003), vermiculita expandida (KOKSAL; MUTLUAY; GENCEL, 2020b), perlita expandido (DEMIRBOĞA; GÜL, 2003; SENGUL *et al.*, 2011), argila expandida (RAHUL; SANTHANAM, 2020; SACHT, H.M.; ROSSIGNOLO; SANTOS, 2010), madeira (TAOUKIL *et al.*, 2013) e poliestireno expandido (EPS) (KOKSAL; MUTLUAY; GENCEL, 2020a). Devido à baixa condutividade térmica de agregados leves, muitos autores são unânimes no fato de que a incorporação de agregados leves em misturas cimentícias melhora consideravelmente suas propriedades de isolamento térmico (BOUMHAOUT *et al.*, 2017; KOKSAL; MUTLUAY; GENCEL, 2020; OMRANE; RABEHI, 2020; SIKORA *et al.*, 2017). Observa-se também, em diferentes pesquisas, que há uma redução no módulo de elasticidade das argamassas à base de agregados leves (GUPTA; CHAUDHARY; SHARMA, 2016; SENGUL *et al.*, 2011).

Tendo em vista a relevância dessa temática, faz-se importante compreender como os concretos de impressão 3D se comportam quanto à condutividade térmica. Pois o sistema de 3DCP é um sistema sem formas, composto por paredes de concreto que por possuírem agregados de origem silicosa apresentam alta capacidade calorífica. Contudo, até o presente momento, pouco foi pesquisado sobre as propriedades térmicas dos concretos para impressão 3D. A maioria dos estudos tem se concentrado na capacidade de impressão e sustentabilidade de sistemas cimentícios ecológicos, como utilização de agregados alternativos e argamassas ativadas por álcali, em detrimento do cimento convencional que

é responsável por elevados níveis de emissões globais de carbono (PANDA *et al.*, 2019), (HUANG *et al.*, 2007).

Dentre os estudos sobre utilização de agregados alternativos, destacam-se Ma *et al.* (2018b) pela formulação de compostos para impressão através da incorporação de rejeitos de cobre. Han *et al.* (2021) e Ding *et al.* (2020) que estudaram a possibilidade de usar agregado reciclado em vez de agregado natural para desenvolver concreto para impressão 3D. Embora a areia reciclada tivesse menor densidade, os resultados frisaram que a incorporação de areia reciclada diminui as propriedades mecânicas do concreto impresso em 3D. Bai *et al.* (2021) estudaram as influências no 3DCP usando como agregado a areia natural, areia reciclada e ceramista. A ceramista é reconhecida por suas propriedades de isolamento térmico, possui densidade de 1493 kg/m<sup>3</sup> na faixa de 2,3 mm a 4,0 mm e é fabricada usando sedimentos de rios e lodos de lagos. Porém, O estudo se concentrou nas influências dos três tipos de granulometria na capacidade de impressão e nas propriedades mecânicas, como também no efeito de intertravamento dos agregados na ligação interfacial entre as camadas.

Os materiais usados como agregados leves inclui materiais naturais e materiais processados ou sintéticos. Dentre eles, destaca-se o agregado leve de argila expandida (LECA) por suas propriedades únicas, como boa estabilidade química, baixa densidade aparente e condutividade térmica (RASHAD, 2018), sendo amplamente empregado no desenvolvimento de concreto leve desde longa data (SACHT, H.M.; ROSSIGNOLO; SANTOS, 2010), além da disponibilidade regional.

Como citado anteriormente, as composições pra 3DCP fazem uso de materiais reativos, e esses podem interferir nas propriedades térmicas dificultando a análise da influência da substituição de agregados porosos, por exemplo, como foi observado por Omrane, Rabehi (2020), os quais constataram que substituição de 20% de cimento por pozolana reduz a condutividade térmica 19% aos 120 dias, em comparação com a mistura de referência. Da mesma forma, Kim *et al.*, (2003) testaram pastas com substituição parcial do cimento por cinza volante e identificaram 14% de queda da condutividade térmica aos 28 dias de idade.

Nesse sentido, Sikora *et al.* (2017) estudaram a substituição total da areia de rio por resíduo de vidro menor que 2,0 mm em argamassas na proporção 1:3 em peso, a/c=0,5 e adição de sílica ativa de 3%. Dessa forma, observou-se que o coeficiente de condutividade térmica (k) diminuiu significativamente quando o resíduo de vidro (RV) estava presente, k

diminuiu de 1,8 para 0,8 (W/m.K). Esse decréscimo foi atribuído à menor condutividade térmica do resíduo de vidro (em comparação com a areia de rio) e a densidade mais baixa do RV, levando a uma redução tanto da densidade quanto da condutividade térmica das argamassas. De forma análoga, Sengul et al. (2011) produziram concreto leve com perlita expandida em substituição ao agregado natural de tamanho máximo de 4 mm e obtiveram redução do peso unitário de 2000 para 700 kg/m<sup>3</sup> juntamente com diminuição do coeficiente de condutividade de 0,6 para 0,13 (W/m.K). Os autores também afirmam que foi obtida uma forte relação entre a condutividade térmica e o peso unitário.

Por outro lado, Rahul, Santhanam (2020) examinaram a impressão das formulações de concreto feitas com LECA de tamanho máximo igual a 10 mm. A escolha de agregados leves reduz a densidade do material e proporciona maior resistência tanto a flambagem quanto ao colapso plástico que pode ocorrer durante a impressão 3D. Testes uniaxiais do concreto no estado fresco revelaram que sua resistência a compressão e o módulo de elasticidade foram maiores para a mistura com 30% de LECA em comparação com a mistura de controle. Isso se justifica pela maior desidratação durante a extrusão causada pelo agregado poroso (LECA), o que também melhora a capacidade de construção do material.

Em outro estudo, Alkhalidi (2020) investigou e desenvolveu unidades residenciais de baixo custo e eficiência energética que podem ser implantadas em todo o mundo por meio de um critério de escolha verde e sustentável. Configurações de parede distintas para impressão com diferentes materiais foram projetadas para reduzir os valores de transmitância (U) das paredes impressas em conformidade com os regulamentos de zona climática. Os resultados mostram que um equilíbrio entre as cavidades e o material impresso em 3D deve ser mantido para atingir os valores U desejados e o desempenho estrutural.

Recentemente, uma nova aplicação de compósitos leves para impressão 3D foi reportada por Lu *et al.* (2019), que relataram o uso de um material de impressão 3D baseado em spray. Para melhorar a resistência ao cisalhamento do spray induzida pela gravidade, a densidade do material deve ser reduzida, o que pode ser alcançado pela incorporação de agregados leves, agente incorporador de ar, entre outras soluções.

O design de misturas cimentícias leves adequadas para impressão 3D contribui para melhorar as propriedades térmicas dos materiais, além de aumentar a resistência ao colapso durante o processo de impressão (ANTUNES *et al.*, 2021; SIAMARDI, 2022a). Nesse cenário, a LECA é um agregado interessante, uma vez que está comercialmente disponível e apresenta alta resistência à compressão entre os agregados leves. A LECA é amplamente

utilizada na indústria da construção civil, e pode economizar até 50% em custos de aquecimento-resfriamento quando usado nos materiais de construção (OZGUVEN; GUNDUZ, 2012).

*Atualmente*, testes de compressão uniaxial também vêm sendo realizados para simular os incrementos de pressão em camadas na impressão 3D baseada em extrusão (MOEINI; HOSSEINPOOR; YAHIA, 2022a). As argamassas usadas para impressão 3D em larga escala apresentam rigidez excessiva, especialmente 15 a 20 minutos após a mistura, quando o tamanho e o número dos flocos formados se tornam muito altos para atender aos requisitos de capacidade de construção. Isso cria vários desafios para a medição dos parâmetros reológicos acima mencionados ao usar métodos de teste rotacionais e oscilatórios. Métodos com Teste de compressão, como o teste de compressão uniaxial, recentemente foram encontrados para quantificar efetivamente as propriedades frescas de materiais de impressão cimentícios (BOS *et al.*, 2021; CASAGRANDE *et al.*, 2020; MOEINI; HOSSEINPOOR; YAHIA, 2022a).

Nesse contexto, o presente trabalho relata um estudo experimental sobre o efeito da substituição do agregado fino natural (areia) por partículas de LECA menores que 1,2 mm nas propriedades físicas, mecânicas e térmicas das misturas cimentícias para 3DCP. O trabalho foi desenvolvido com base em um planejamento fatorial de  $2^2$  que considerou a razão de agregação sobre aglutinantes “a/b” e o percentual de substituição do agregado natural (areia) por LECA “%sub” como variáveis independentes. No estado fresco, as propriedades reológicas foram aferidas por meio do método *Squeeze-flow*. Assim, foi realizado um projeto experimental (DoE) com variáveis a/b e %sub para determinar as melhores misturas 3DCP para melhor desempenho térmico.

## 1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência do teor de substituição de areia natural por agregado leve de argila expandida (LECA) nas propriedades físicas, mecânicas e térmicas de misturas à base de cimento Portland para 3DCP.

## 1.2 Objetivos específicos

- Avaliação dos parâmetros reológicos de composições imprimíveis 3DCP, com substituição do agregado natural por agregado de argila expandida laminada com dimensão máxima de 1,2 mm;

- Avaliar estatisticamente os resultados obtidos, a partir de um planejamento de experimentos, das misturas com base em ensaios térmicos e físicos;
- Avaliar as diferenças das propriedades entre os espécimes moldados em fôrmas e impressos.

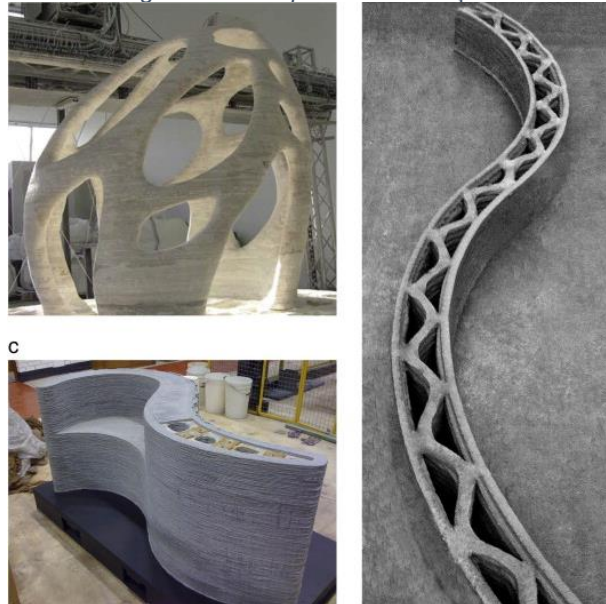
## CAPÍTULO 2

### REFERENCIAL TEÓRICO

#### 2.1 Impressão de concreto 3D (3DCP)

A impressão de concreto é um processo de construção inovador para a fabricação de componentes de concreto que emprega uma técnica de fabricação aditiva baseada em camadas, também chamada de construção de forma livre (MA; LI; WANG, 2018a). Esse método pode ser usado para construir elementos geométricos complexos sem formas, e assim tem uma vantagem única em relação aos métodos convencionais de construção (SANJAYAN, 2019, LE et al., 2012b).

*Figura 1 - Exemplos de construções*

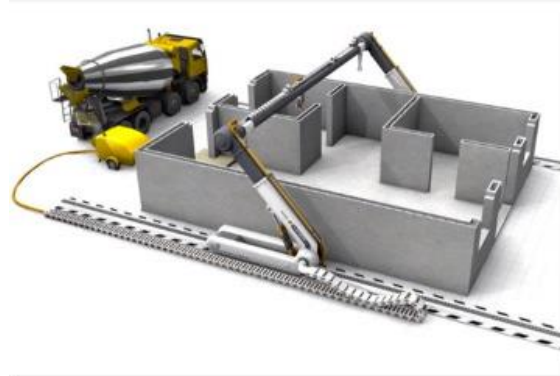


*Fonte: (LIM et al., 2012)*

Em 2005 as publicações já vinham apontando a necessidade da industrialização da construção civil, visto que o processo 3DCP demonstrou uma alta capacidade de reduzir custos, melhorar a qualidade e disponibilizar produtos complexos para a grande maioria das pessoas, visto que a industrialização não é realmente aplicada ao edifício como um todo. Como exemplo, se um carro fosse produzido da maneira como um prédio é entregue, pouquíssimas pessoas seriam capazes de possuí-lo; se um computador fosse produzido da maneira como um prédio é entregue, isso custaria uma fortuna (RICHARD, 2005). A Figura 2 ilustra a automação do canteiro de obras. Estudos anteriores mostraram que a construção

com tecnologia 3DP pode reduzir 30–60% dos resíduos de construção, 50–80% dos custos de mão de obra e 50–70% do tempo de produção (KATZER; SZATKIEWICZ, 2019; ZHANG, J. *et al.*, 2019).

Figura 2 - Exemplo de tecnologia de impressão de concreto: uma bomba de concreto bombeando concreto para uma cabeça de impressão robótica



Fonte: University of Southern California apud (NERELLA; MECHTCHERINE, 2018)

A armadura de aço é normalmente usada para resistir às tensões de tração e cisalhamento dentro do concreto e o concreto impresso não é exceção. Todavia, a inserção de armadura de aço em uma estrutura impressa em 3D é incompatível à velocidade, facilidade e liberdade de projeto prometida pelo paradigma de impressão 3D de forma livre. A necessidade de adição de armadura em grandes estruturas impressas em 3D limitou os benefícios, além de seu potencial, que o processo tem sido capaz de oferecer à indústria (KATZER; SZATKIEWICZ, 2019; SOLTAN; LI, 2018).

Le *et al.* (2012) resumiram o processo 3DCP da seguinte forma: os componentes são projetados como objetos volumétricos usando software de modelagem 3D. Eles são cortados em seguida e representados como uma série de camadas bidimensionais. Os dados são exportados para uma máquina de impressão camada por camada, a fim de imprimir componentes estruturais pela extrusão controlada de um material cimentício. Para tanto, o material fresco deve ser fluido o suficiente para que possa ser extrudado através de um bocal. Mas uma vez que a camada é extrudada, ela deve ter tensão de cisalhamento suficiente para resistir à deformação devido ao seu peso próprio e ao peso das camadas impressas acima dela (LE *et al.*, 2012b; RAHUL *et al.*, 2019).

Além disso, o material deve ser adequado para fornecer uma boa ligação entre as camadas (LE *et al.*, 2012b; NERELLA; HEMPEL; MECHTCHERINE, 2019; RAHUL *et al.*, 2019) evitando infiltração como as retratadas na Figura 3. A fraca resistência entre as

camadas impressas é uma das limitações desta tecnologia quando comparada com o concreto moldado/fundido (SANJAYAN *et al.*, 2018).

Figura 3 - Sinais de pronunciada infiltração local de água (destacada) nas interfaces da camada



Fonte: (NERELLA *et al.*, 2019)

A estrutura em camadas é suscetível de ser anisotrópica devido aos vazios que podem formar-se entre as camadas, que tendem a reduzir a capacidade estrutural (Figura 3). A ligação entre camadas influencia as propriedades endurecidas dos componentes de concreto. Portanto, uma alta resistência à compressão e à flexão, bem como à tração, são o principal alvo no desenvolvimento desse concreto. Além disso, uma baixa retração é essencial, pois os componentes de forma livre são construídos sem formas e isso pode acelerar a evaporação da água no concreto e resultar em rachaduras (LE *et al.*, 2012a).

### **2.1.1 Materiais componentes de misturas 3DCP**

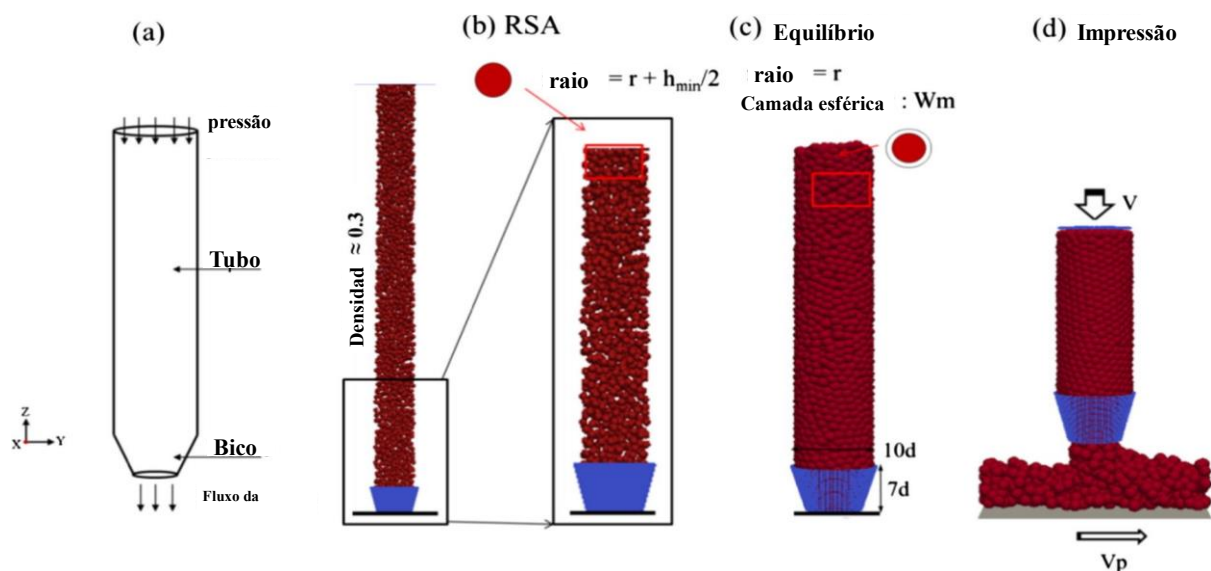
Trabalhos recentes usam misturas de ligantes feitos de cimento Portland de alta resistência inicial, sílica ativa, cinza volante (Tabela 1) e agregados miúdos e/ou graúdos. Os agregados miúdos são de tamanho menor que os agregados utilizados na maioria das argamassas convencionais. Nos campos da pesquisa, o tamanho máximo de partícula foi de 3 mm usado por Wolfs *et al.* (2018a) na forma de uma areia silicosa. As demais pesquisas usam partículas menores que 2 mm (KAZEMIAN *et al.*, 2017; KHALIL *et al.*, 2017; LE *et al.*, 2012b; NERELLA, Venkatesh Naidu; HEMPEL; MECHTCHERINE, 2019; PANDA; TAN, 2018b; SOLTAN; LI, 2018; WENG *et al.*, 2018).

Tabela 1- Levantamento das composições para 3DCP

TIPO	CP	CSS	OBS.	AREIA	A/C	SP%	VMA	FIBRA	D BICO	FONTE
argamassa	1	0,13cv + 0,19sa		1,5	0,375	0,94	0,5	0,66 carbono + 0,97 basalto	20 mm	(LIU <i>et al.</i> , 2021)
pasta	1			-	0,5	0-0,104				
pasta	0,98-0,9	0,02-0,1		-	0,5	0-0,104			10 mm	(KHALIL <i>et al.</i> , 2017)
argamassa	1			1.25	0.35	0.25				
argamassa	0.92	0.08		1.19	0.35	0.25				
argamassa	1			1.5	0.28	??			9 mm	(LIM <i>et al.</i> , 2012)
argamassa	40 % (70 CP. 20 cinza vol 10 silica ativa)	-		55 - 75%	0.28			1,2 kg fibra pvc (12mm)	9 mm	(LE <i>et al.</i> , 2012b)
argamassa	1 (70c+20cv+10s)			2.14	0.26	1%				
argamassa	45-72%	5-8% 23-55%		36-62% 1:(0,4-0,6)	0,26-0,43	0,3-0,8		2% fibra pvc (12mm)	8-13mm	(SOLTAN; LI, 2018)
argamassa	1	-	-	1.5	0.28	0.38			25mm	(SANJAYAN <i>et al.</i> , 2018)
argamassa	1	-	-	1.92	0,48-0,36	0-1,3			20 mm	3D Concrete Printing: Machine and Mix Design
argamassa	0.4	0,6 (65%cv+35%sa)		1.7	0.4	1		1,9% fibra (6mm) vidro	8 mm	(PAUL <i>et al.</i> , 2018)
argamassa	1	(nano argila e sf subst. Cim)		1	0.35	0.26			20 mm (c/vibrador)	(ZHANG <i>et al.</i> , 2018b)
argamassa	0,7	0,2cv +0,1s		1,2	0,27				8 x 30 mm	(MA; LI; WANG, 2018b)
concreto	1	0,25	0,56 LECA D<10 mm	1,3	0,4	0,08	-	Pp 1,8 kg/m³	30 x 30 mm	(RAHUL; SANTHANAM, 2020)
argamassa			1,5							(CHEN <i>et al.</i> , 2020)

A Figura 4 ilustra o dispositivo usado para estudar o bloqueio de agregados na extrusão da argamassa por El Cheikh *et al.* (2017), os quais apontam que a finura das partículas é imprescindível para promover uma boa fluidez e coesão, como acontece com as argilas extrudadas.

Figura 4 - (a) Esquema do dispositivo; (b) Geração de núcleo duro pela RSA; (c) Equilíbrio do sistema e (d) modelagem DEM da extrusão de argamassas.



Fonte: Adaptado de EL CHEIKH *et al.* (2017)

Nesse contexto, tamanhos máximos de 1.2 mm vêm sendo bastante usados junto com cargas minerais (filler calcário, pó de quartzo e outros inertes) para suprir as faixas menores que 63  $\mu\text{m}$  (WENG *et al.*, 2018; ZHANG, Y. *et al.*, 2018, 2019). Já pesquisadores como Sanjayan *et al.*, (2018) preferem usar areias fora da faixa comercial/convencional, selecionando areias menores que menor 0.5 mm.

Weng *et al* (2018) projetaram materiais de construção com propriedades reológicas adequadas para 3DCP usando a teoria de Fuller Thompson e o modelo de Marson-Percy como diretrizes para gradação de areia e otimização de fração de empacotamento, respectivamente. Os autores concluíram a partir de testes reológicos que misturas com gradações contínuas (39,23% de tamanho de areia menor que 0,15 mm, 10,14% de areia com 0,15–0,25 mm, 23,84% de areia com 0,25–0,6 mm e 26,80% de areia com 0,6–1,2 milímetros) apresentaram em comparação de outras as maiores tensões de escoamento e a menor viscosidade plástica. Durante o teste de impressão para capacidade de construção, elas podem atingir até 40 cm (40 camadas) sem deformação notável.

Le et al. (2012b) relataram que a capacidade de extrusão foi afetada significativamente pela combinação de tamanhos de partículas dos materiais constituintes. As misturas com relação areia/ligantes (a/b) maior que 2,3 eram difíceis de passar pelo sistema de bicos de bombeamento devido ao alto teor de agregado que causava a segregação de areia. Essas misturas, mesmo quando fluidificadas por um conteúdo adicional de água e superplastificante, ainda demonstraram segregação na tubulação e consequente bloqueio. Portanto, constataram que o teor de ligante de 25-30% nessas misturas foi insuficiente para criar uma capacidade de extrusão adequada para lidar com este processo de impressão. Por fim a pesquisa concluiu que a mistura com 1,5 de relação a/b passou nos critérios de extrudabilidade em função do conteúdo de ligante.

Lim et al. (2012) desenvolveram uma argamassa à base de cimento de alto desempenho para a impressão de concreto, que continha 54% de areia, 36% de compostos cimentícios reativos e 10% de água por massa. Os materiais cimentícios para impressão 3D precisam ter uma classificação suave de partículas para garantir um grau favorável de capacidade de extrusão e fluidez. A boa classificação dos materiais fornece uma estrutura de compostagem estável, maximizando assim o desempenho do esqueleto e da estabilização das partículas (MA; LI; WANG, 2018b).

### **2.1.2 Aditivos modificador de viscosidade (VMA)**

O uso de VMA é um fator chave no desenvolvimento de compósitos cimentícios imprimíveis. O ajuste da quantidade da mistura química, uma boa distribuição do tamanho de grão das partículas na matriz, e a proporção ótima entre água e sólido pode levar um material à viscosidade necessária para a impressão (CHAVES FIGUEIREDO; ÇOPUROĞLU; SCHLANGEN, 2019). Efeitos positivos também foram encontrados, tais como: evidência de cura interna, maior grau de hidratação e falta de produtos de hidratação indesejáveis.

Um dos VMA mais usados é constituído de hidroxipropilmetilcelulose (HPMC), que consiste em misturas geralmente compostas de longas cadeias orgânicas com ramificações -OH, detendo a água livre na mistura através da ponte intermolecular de hidrogênio. Figueiredo *et al.* (2019) desenvolveram compósitos cimentícios imprimíveis a partir de uma pasta de cimento de referência com uma relação água-cimento (a/c) de 0,3 (REF) e três níveis de VMA, 0,1, 0,3 e 1% da massa de cimento.

## 2.2 Agregado leve de argila expandida (LECA)

LECA (*lightweight expanded clay aggregate*) é o termo difundido nas publicações científicas para o agregado leve de argila expandida (AMERI *et al.*, 2019; KALHORI *et al.*, 2013; RAHUL; SANTHANAM, 2020; RASHAD, 2018). O LECA é produzido a partir de argila plástica especial com pouco ou muito pouco conteúdo de cal. A argila é seca, aquecida e queimada em fornos rotativos a 1100 – 1300 °C. LECA é um produto cerâmico poroso com uma estrutura uniforme de poros com formato redondo devido ao movimento circular do forno (Figura 6). O número abundante de cavidades pequenas e cheias de ar na LECA fornece características de leveza, isolamento térmico e sonoro (RASHAD, 2018).

Figura 5 - O fluxograma de produção da LECA



Fonte: Adaptado de <http://www.ftmmachinery.com>

A densidade das partículas geralmente diminui com o aumento do diâmetro do grão de saída. Além disso, agregados com diferentes densidades podem ser produzidos alterando o processo de produção. Eles são classificados de acordo com o tamanho ou densidade aparente (ARDAKANI; YAZDANI, 2014). Na Figura 6 são ilustradas as partículas de LECA.

Figura 6 – a) Diferentes tamanhos de LECA; b) Furos interconectados e cavidades cheias de ar de diferentes tamanhos



Fonte: ARDAKANI, YAZDANI, 2014

Um dos materiais com maior resistência à compressão entre os agregados leves são os agregados de argila expandida. Isso lhe confere uma posição significativa na indústria da construção. Até 20% podem ser economizados na armadura de aço, enquanto até 50% em despesas de aquecimento-resfriamento em edifícios contendo agregado de argila expandida (OZGUVEN; GUNDUZ, 2012).

Na maioria dos casos, LECA é marrom escuro ou avermelhado ou marrom-vermelho ou cinza. Cores amarelas ou pretas também estão disponíveis. Essas diferenças de cores podem estar associadas às variedades na composição química da LECA e ao seu método de fabricação. É uma substância inerte, não contém materiais nocivos, com pH neutro, não danifica a água, é impermeável à umidade, incombustível, não biodegradável, não se decompõe contra condições severas, fornece excelente isolamento térmico, possui boa resistência ao fogo e bom isolamento acústico (AYATI *et al.*, 2018). A literatura reporta densidade aparente entre 250 e 980 kg/m<sup>3</sup> (OZGUVEN; GUNDUZ, 2012; RASHAD, 2018).

A LECA pode ter tamanhos diferentes (de 0,1 a 25 mm), adequados para agregados miúdos e graúdos (Figura 7a). A leveza da LECA pode ser associada aos espaços aéreos multiseparados que existem dentro e na superfície dos agregados (Figura 7b). Esse material, semelhante aos outros tipos de agregados leves, tem um número maior de poros com diâmetros maiores que os agregados de maiores densidades, enquanto possui menos poros de diâmetros pequeno, em comparação aos agregados de densidade normal. Isso ocorre devido a LECA ser exposta a altas temperaturas durante seu processo de fabricação, o que acarreta a formação de grandes poros. Por outro lado, a presença de microporos é

resultado da recristalização, fazendo com haja um número limitado desses. A área da superfície interna é quase governada pelo conteúdo de poros de diâmetro menor (FUJIWARA, 2008; RASHAD, 2018) .

### **2.2.1 Porosidade e absorção de água**

Rashad (2018) explica que a absorção de água nas matrizes cimentícias devido à incorporação de LECA, depende principalmente do grau de porosidade e da densidade da casca externa do LECA.

Bogas et al. (2012) mencionaram que a absorção de argamassas contendo diferentes tipos de LECA era maior para agregados mais porosos e que possuíam maior porcentagem de partículas quebradas. Isso é relevante, visto que a argila expandida na faixa inferior de 4,75 mm é composta predominante por aglomerados não peletizados e pedaços de pellets quebrados, comercializada como argila expandida laminada.

Józwiak-Niedźwiedzka, (2005) encontraram porosidade no estado fresco de 4,34% maior da mistura de concreto, substituindo parcialmente a areia de peso normal por 33,33% de LECA pré-umedecido (tamanho 0–2 mm), em volume; enquanto a substituição parcial da areia com peso normal por 50% de LECA pré-umedecido levou a uma porosidade fresca 8,69% menor.

Quando o LECA é embebido em água, a água se move para os microporos e resulta em inchaço rápido devido à maior área de superfície absorvida. Durante a secagem, o conteúdo da água diminui e o encolhimento ocorre lentamente, pois a água ainda permanece nos microporos. Enquanto o progresso da secagem ocorre, a evaporação da água dos microporos resultam em cura interna da matriz cimentícia. A cura interna leva a água a ser transportada do LECA pré-umedecido para os poros de cimento, resultando em uma redução em sua dessecação, ocasionando retração da matriz cimentícia. Como a matriz LECA apresenta menor retração, a tendência de trincas é baixa em comparação com o agregado de densidade normal. A argamassa com LECA possui um módulo de elasticidade menor, levando a uma menor tendência à trincas devido ao menor esforço elástico induzido pela mesma tensão (RASHAD, 2018) .

Além do menor peso próprio nas estruturas, a adição de LECA é conhecida por proporcionar um aumento no isolamento térmico em função do teor de substituição. Esse comportamento é justificado pela baixa condutividade térmica da LECA em comparação com o agregado de densidade normal. Além disso, os poros interconectados nas partículas

de LECA ajudam a reduzir a condutividade térmica, pois o ar nos poros atua como bom material isolante. As propriedades de isolamento térmico da LECA usadas em uma construção podem melhorar o desempenho energético dos edifícios e contribuir para a redução do consumo de energia elétrica (BORGES; FLORES-COLEN; DE BRITO, 2018; LUCIO-MARTIN *et al.*, 2021; RASHAD, 2018; SACHT, H.M.; ROSSIGNOLO; SANTOS, 2010).

Teoricamente, as forças capilares da pasta de cimento são altas o suficiente para absorver a água dos grãos de agregados leves e transportá-la para as regiões mais secas da pasta de cimento, onde a reação com o cimento não hidratado pode avançar. Quanto menor a umidade relativa do ambiente, mais inclinado é o gradiente entre as camadas da superfície e as mais distantes. Devido à evaporação da água, esse gradiente aumenta e, na camada superficial, a umidade do agregado leve é transportada para a pasta de cimento mais rapidamente do que para o interior. Quando a água do agregado leve participa do processo de hidratação, a estrutura das camadas da superfície do concreto é mais densa, reduzindo o efeito da evaporação da água e o processo de difusão se torna mais lento (JOZWIAK-NIEDZWIEDZKA, 2005).

Nepomuceno *et al.* (2018) recomenda que devido à menor resistência ao esmagamento dos agregados leves, é necessário fornecer uma fase de argamassa reforçada, escolhendo cimento com maior classe de resistência à compressão.

A LECA sempre foi utilizada em concreto na forma de agregado graúdo e mais recentemente agregado miúdo. Nas últimas décadas, houve uma demanda por novas soluções de revestimento com maior eficiência térmica. Argamassas com melhor desempenho térmico são uma dessas soluções. O maior desafio no desenvolvimento dessas argamassas consiste em obter uma condutividade térmica mais baixa, mantendo um desempenho mecânico e de resistência à água adequado, com baixo impacto ambiental (BORGES; FLORES-COLEN; DE BRITO, 2018). A Tabela 2 retrata o uso de LECA em concretos e argamassas junto com a granulometria usada

Tabela 2 - Materiais com diferentes de tamanho de LECA

Fonte	Tipo	Tamanho partícula	Módulo de finura	Peso aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	absorção
(JOZWIAK-NIEDZWIEDZKA, 2005)	concreto	0-4 mm				
(NEPOMUCENO; PEREIRA-DE-OLIVEIRA; PEREIRA, 2018; NEPOMUCENO; SILVA, 2014)	Concreto estrutural	< 4.0 mm	5.06	970	420	26
(LOTFY; HOSSAIN; LACHEMI, 2014)	Concreto estrutural	< 4.75 mm		760	1.22	17.6
(MUÑOZ-RUIPEREZ <i>et al.</i> , 2016)	Concreto estrutural	2 - 4 mm		358	-	26.2
(BORGES; FLORES-COLEN; DE BRITO, 2018)	argamassa	2mm		431		

### 2.3 Propriedades dos materiais 3DCP

Estudos mostraram que as propriedades mais críticas no estado fresco desse processo de impressão são a capacidade de extrusão e capacidade de construção, ou chamadas extrudabilidade e construtibilidade, respectivamente. Essas propriedades juntamente com a ligação intercamada são dependentes da trabalhabilidade. A trabalhabilidade pode ser equiparada à fluidez, uma métrica usada frequentemente para avaliar indiretamente a reologia de materiais cimentícios recém-misturados (SOLTAN; LI, 2018).

Tanto a capacidade de bombeamento quanto a capacidade de construção estão intimamente relacionadas ao desempenho reológico dos materiais, ou seja, tensão de escoamento estático/dinâmico e viscosidade plástica. A tensão de escoamento estática é a tensão de cisalhamento mínima necessária para iniciar o escoamento e a tensão dinâmica de escoamento é a tensão de cisalhamento crítica abaixo da qual não se mantém o escoamento. A viscosidade plástica é a resistência de um fluido a fluir quando o fluido está fluindo. Todas essas propriedades reológicas são atribuídas à força entre partículas (WENG *et al.*, 2018).

A tensão de escoamento é a tensão na qual um fluido pseudoplástico começa a fluir. Em outras palavras, é a tensão em que a estrutura sólida é rompida, e os materiais deixam de se comportar como um sólido rígido e apresentam comportamento viscoso. Esta

tensão é o resultado de forças de atração entre as moléculas ou partículas sólidas em suspensão, que forma uma estrutura sólida rígida (NICOLINI *et al.*, 2021a).

A tensão de escoamento é o parâmetro mais importante para o projeto de mistura. Uma tensão de escoamento alta do material fresco é essencial para evitar a deformação excessiva das camadas extrudadas. Por outro lado, se a tensão de escoamento e a viscosidade plástica se tornarem muito altas, de modo que excedam a capacidade da bomba, a extrusão do material torna-se difícil. Portanto, existe uma faixa ótima de tensão de escoamento na qual o material é tanto extrudável quanto edificável.(LE *et al.*, 2012b; LIM *et al.*, 2012; (RAHUL *et al.*, 2019).

Além disso, a tensão de escoamento do concreto extrudado aumenta com o tempo. Esse aumento deve-se a dois motivos: as mudanças físicas reversíveis na estrutura devido à tixotropia e mudanças estruturais irreversíveis devido à hidratação do cimento. Esse aumento na tensão de produção permite que mais camadas sejam depositadas ao longo do tempo (RAHUL *et al.*, 2019).

### **2.3.1 Extrudabilidade**

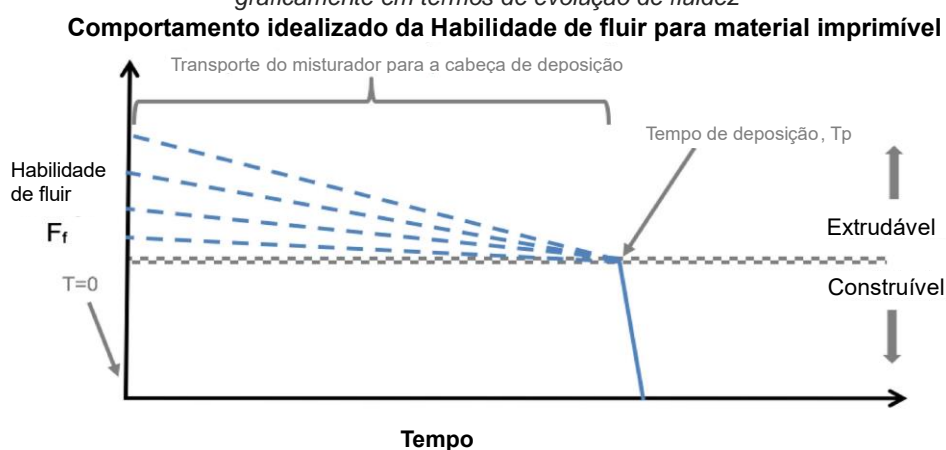
A extrudabilidade pode ser definida como a capacidade do concreto de passar através dos pequenos tubos e bicos na cabeça de impressão. É principalmente influenciado pela trabalhabilidade (consistência) das proporções de concreto e mistura (relação a/b e a/c). Uma boa extrudabilidade foi alcançada aplicando os princípios de concreto autoadensável e concreto projetado ao projeto de mistura. Uma vez que o concreto fresco atinja os critérios de extrudabilidade, ele pode desenhar filamentos auto compactáveis com seção transversal definida (LE *et al.*, 2012b).

### **2.3.2 Reologia e comportamento de materiais extrudados**

Do ponto de vista reológico, o material deve ser líquido e com baixa viscosidade, enquanto estiver dentro da bomba e do bocal, mas, uma vez extrudado, deve passar por uma transição para um comportamento sólido com tensão suficiente para resistir à deformação. Uma vez extrudada, a alta tensão de escoamento (que deve ser maior que a tensão devido ao peso próprio) permite que o material resista à deformação (mantendo a geometria fixada pela matriz) e impeça o fluxo no material (RAHUL *et al.*, 2019; TOUTOU; ROUSSEL; LANOS, 2005) .

A capacidade de retenção de forma está ligada ao parâmetro de coesão ( $C$ ) ou o valor de rendimento de plástico ( $K$ ), dependendo do comportamento do material. As argamassas firmes de cimento usadas no processo de extrusão podem ser descritas por dois tipos diferentes de comportamentos plástico: o corpo plástico perfeito, seguindo o critério de Von Mises e o endurecimento por tensão plástica ou comportamento plástico de fricção segundo o critério de Drucker-Prager (TOUTOU; ROUSSEL; LANOS, 2005). Um comportamento idealizado de um material cimentício “imprimível” é resumido em termos de fluidez ao longo do tempo, ou “evolução da fluidez”, na Figura 7.

Figura 7 - O comportamento de fluidez idealizado para um material de impressão cimentício é representado graficamente em termos de evolução de fluidez



Fonte: (SOLTAN; LI, 2018)

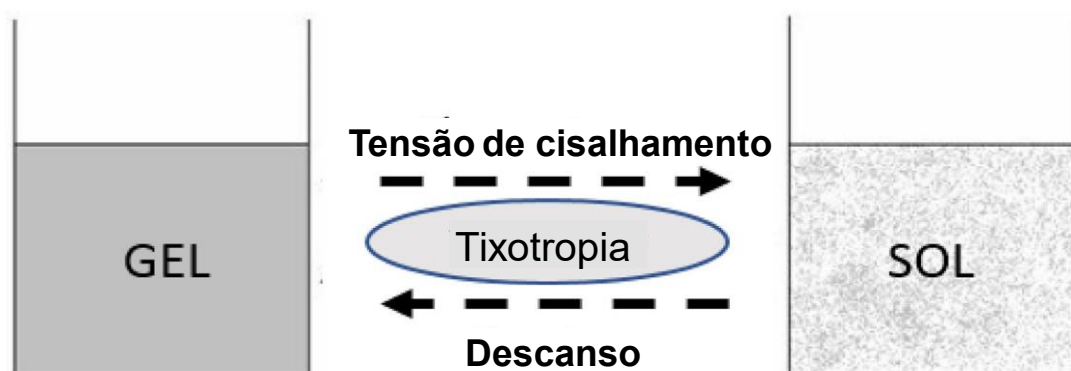
Entre o tempo em que o material é completamente misturado,  $t = 0$ , e o tempo que o material é impresso,  $t = T$ , o material deve ser “passível de extrusão”, o que corresponde a uma ampla faixa de valores de fluidez acima de um determinado valor crítico, mas não tão fluida a ponto de permitir a segregação de constituintes. No momento em que o material é depositado pela cabeça de impressão, ele precisa ser tanto extrudável quanto imediatamente edificável, correspondendo à outra faixa de valores de fluidez, abaixo daquele valor crítico determinado. A mistura precisa primeiro manter sua forma quando extrudado de uma maneira previsível e, quando as camadas subsequentes são depositadas sobre ele, ser capaz de suportar esses pesos respectivos sem deformação excessiva. O material ideal deve ser fluido antes da deposição, tanto extrudável quanto edificável no momento da deposição, e endurecer rapidamente após a deposição (SOLTAN; LI, 2018).

Na prática, a perda mínima de trabalhabilidade, durante a deposição, pode ser extrapolada para também requerer uma baixa diminuição na fluidez entre o fim da mistura e o final da deposição. Essa evolução da fluidez “endurecer sob comando” é atípica e

desafiadora para materiais cimentícios típicos. O comportamento reológico tixotrópico pode, teoricamente, ser explorado para gerar este comportamento de evolução da fluidez, no qual, o endurecimento é desacoplado, pelo menos temporariamente, a partir do tempo após a mistura (METSÄ-KORTELAINE *et al.*, 2014).

Materiais tixotrópicos (Figura 8) podem ser descritos como tendo uma viscosidade reduzida (maior fluidez) quando uma tensão de cisalhamento, tal como a agitação, é aplicada em comparação com o estado não perturbado. A viscosidade é recuperada em um material tixotrópico quando a tensão de cisalhamento aplicada é removida, em um processo chamado de reconstrução. Em um sistema de impressão de concreto 3D, as tensões de cisalhamento são aplicadas no processo de bombeamento. Agitação adicional pode ser realizada conforme necessário na alimentação do material no sistema (SOLTAN, LI, 2018).

Figura 8 - material tixotrópico solução/gel

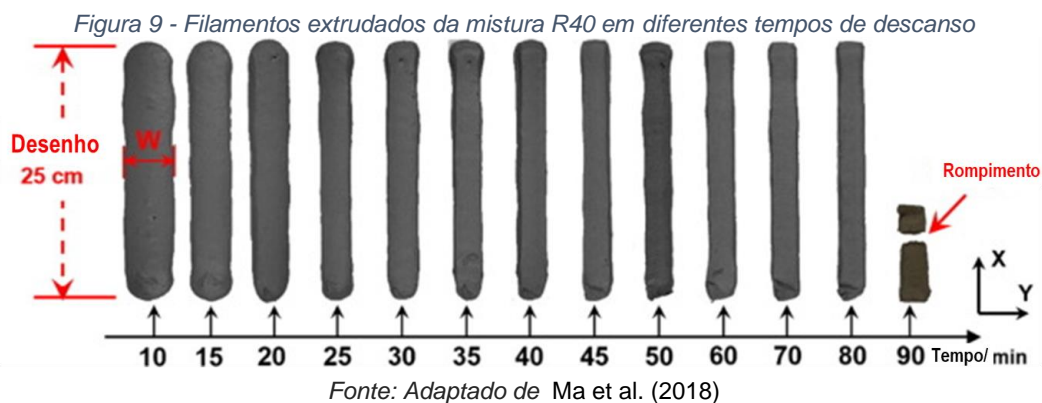


Fonte: Adaptado de (PANDA; UNLUER; TAN, 2018)

Os materiais tixotrópicos convertem-se numa solução na aplicação de tensão de cisalhamento, enquanto voltam a um estado de gel (semi-sólido) após a remoção da tensão. Essa floculação em repouso e desfloculação sob comportamento de fluxo desempenha um papel importante em aplicações de impressão de concreto (PANDA; UNLUER; TAN, 2018).

### 2.3.3 Tempo de abertura

Tempo de abertura é definido como o período em que a trabalhabilidade é consistente dentro de certa tolerância aceitável para impressão 3D. Esse é o intervalo de tempo, durante o qual o material é realmente “imprimível” (SOLTAN; LI, 2018). Le *et al* (2012) definiram tempo de abertura como o período em que a trabalhabilidade do concreto fresco está em um nível que mantinha a extrudabilidade. Ma *et al.* (2018a) ilustraram a perda de trabalhabilidade ao longo tempo, conforme mostrado na Figura 9.

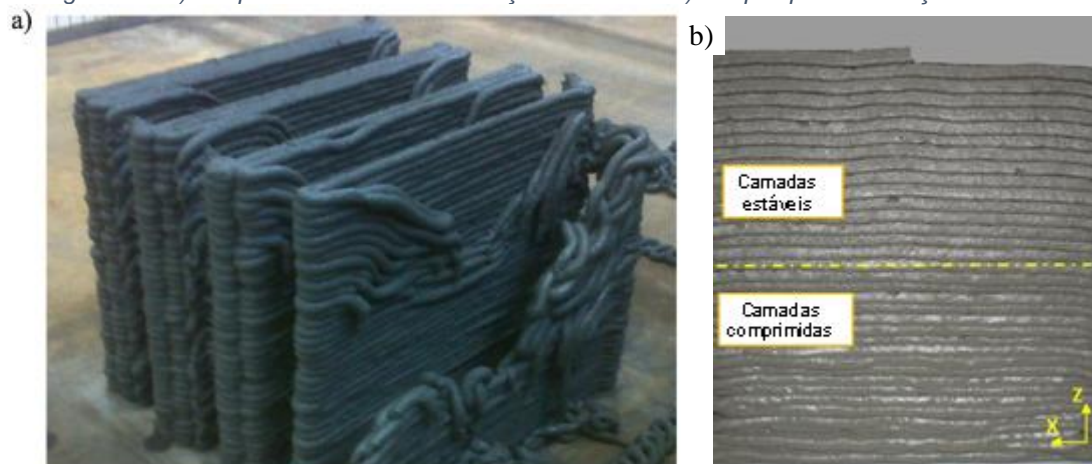


Le *et al.* (2012) estipularam o final do tempo de abertura quando a resistência ao cisalhamento aumenta 0,3 kPa da resistência ao cisalhamento inicial do concreto. O aumento na resistência ao cisalhamento, isto é, diminuição na trabalhabilidade, coincidiu com a crescente dificuldade de imprimir em boa qualidade. As medidas foram feitas a cada 15 min, utilizando a palheta de cisalhamento para determinar o tempo de abertura. Testes preliminares mostraram que amostras frescas de concreto geralmente tinham maior resistência ao cisalhamento se não fossem agitadas antes do teste, resultado devido à tixotropia.

### 2.3.4 Construtibilidade

Define-se como a capacidade de uma camada impressa de manter a sua forma, quando submetido a três tipos de deformações oriundas do processo 3DCP: peso próprio, peso das seguintes camadas que serão impressas acima dela e a pressão de extrusão (BUSWELL *et al.*, 2018; KAZEMIAN *et al.*, 2017b; LE *et al.*, 2012b; MA; LI; WANG, 2018a). Além disso, os filamentos inferiores devem se unir aos superiores para construir componentes monolíticos. Assim, essa composição 3DCP requer uma capacidade de construção relacionada à capacidade de imprimir um determinado número de camadas ou altura (LE *et al.*, 2012b). A Figura 10 ilustra falhas comuns no processo de impressão 3D de materiais cimentícios.

Figura 10 - a) colapso das camadas em função da altura e b) colapso por deformação excessiva.



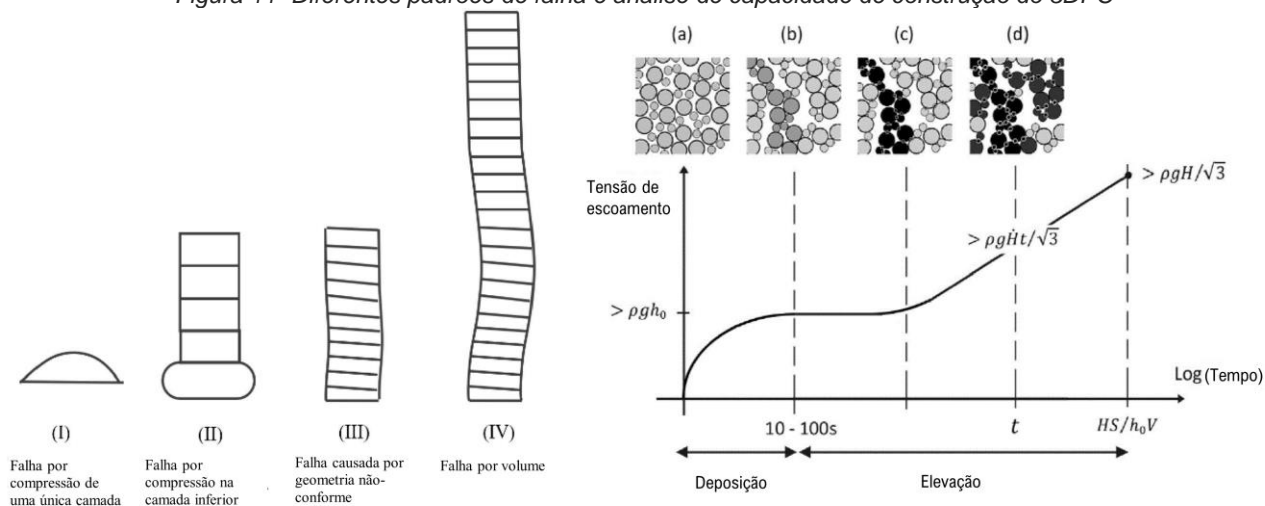
Fonte: Adaptado de: a) Buswell et al. (2018); b) Ma et al. (2018)

Segundo Kazemian et al. (2017), a ausência de adequada construtibilidade para um certo número de camadas/altura origina a instabilidade do componente monolítico impresso, levando assim ao colapso de corpo mole (Figura 10a) e colapso por deformação excessiva das camadas inferiores (Figura 10b). Isso destaca a importância dos testes laboratoriais da estabilidade da forma do concreto de impressão durante a fase de projeto da mistura.

Por outro lado, um longo tempo aberto estende a capacidade de extrusão e ajuda a ligação inter-camadas, mas pode ser prejudicial para o aspecto de deformação da camada de construtibilidade. Assim, as duas principais propriedades de capacidade de extrusão e construtibilidade são sustentadas pelo conhecimento das propriedades, independentes de processo de trabalhabilidade e tempo aberto (LE *et al.*, 2012b). A Figura 11 ilustra os padrões de colapso de corpo mole e o ganho de tensão de escoamento ao longo do tempo para 3DCP.

Extrudabilidade e capacidade de construção são fatores concorrentes, pois a alta trabalhabilidade promove a extrudabilidade, enquanto a baixa trabalhabilidade promove a capacidade de construção. Além disso, a baixa trabalhabilidade pode afetar negativamente a ligação entre camadas, e uma fluidez excessivamente alta pode, em alguns casos, causar segregação de constituintes. Esses atributos-chave - extrudabilidade, capacidade de construção, ligação entre camadas e prevenção de segregação - devem ser adequadamente balanceados para permitir a capacidade de impressão (LE *et al.*, 2012b; SOLTAN; LI, 2018).

Figura 11- Diferentes padrões de falha e análise de capacidade de construção do 3DPC



(a) Diferentes padrões de falha

(b) Análise de construtibilidade

Fonte: Adaptado de HOU et al. (2021)

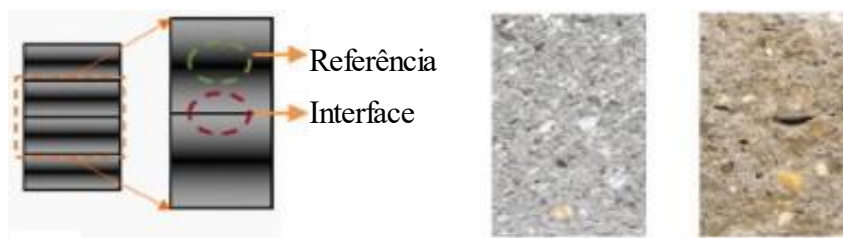
A Figura 11-a ilustra o risco de falha por compressão na camada inferior quando a tensão de compressão é maior do que a tensão de escoamento, enquanto a Figura 11b mostra o processo desse modo de falha. Materiais rígidos com um rápido crescimento do módulo de elasticidade são recomendados para 3DPC. Quanto aos fatores de colapso/falha, o volume é dominante em caso de falha quando o componente de impressão é uma estrutura delgada. Pode-se esperar que a falha de compressão ocorra quando o número de camadas é pequeno, enquanto a falha de volume ocorre quando o número de camadas aumenta (HOU *et al.*, 2021).

### 2.3.5 Propriedades no estado endurecido

Um dos principais desafios no processo de impressão 3D baseado em extrusão é a fraca resistência entre camadas do concreto impresso, pois, falhas potenciais podem ser criadas entre camadas extrudadas, que induzem a concentração de tensão (LE *et al.*, 2012a). A Figura 12 ilustra a formação de vazios que ocorrem entre as interfaces das camadas.

Devido à configuração em camadas, inerente dos elementos impressos em 3D, as interfaces camada a camada são inevitáveis. Em muitos casos, elas são os elos mais fracos de toda a estrutura (NERELLA; HEMPEL; MECHTCHERINE, 2019).

Figura 12 - Regiões investigadas ao microscópio: referência e interfaces cortadas



Fonte: Adaptado de Nerella et al. (2019)

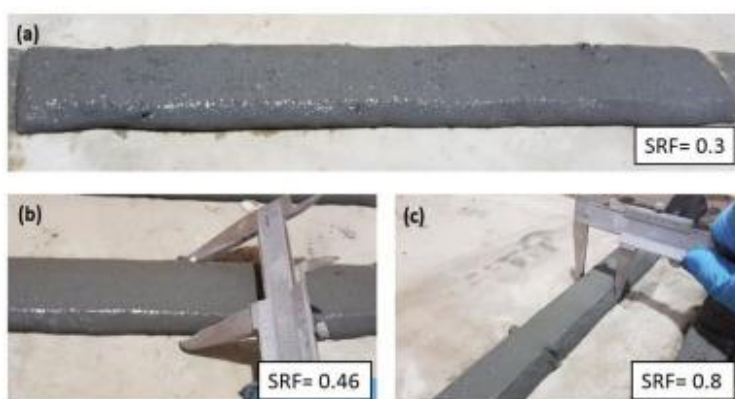
Sanjayan *et al.* (2019) identificaram o teor de umidade da região intercamada como um dos principais fatores que afetam a adesão entre camadas. Um nível de umidade mais alto na superfície de cada camada levou a uma maior resistência de adesão, apesar dos maiores intervalos de tempo de deposição.

### 2.3.6 Proporções de misturas 3DCP

O concreto para impressão pode ser caracterizado por alto teor de pó, ausência de agregado graúdo, maior fração de pasta e uso de VMA. Proporções de mistura de impressão bem-sucedidas podem ser usadas como ponto de partida (KAZEMIAN *et al.*, 2017; LE *et al.*, 2012b; MECHTCHERINE, Viktor *et al.*, 2019). Na Tabela 1, foram apresentadas algumas composições para 3DCP extraídas da literatura.

Após projetar uma mistura inicial, atender aos requisitos de qualidade de impressão é a primeira etapa do processo de avaliação e modificação da mistura iterativa proposta, conforme mostra a Figura 13 (PANDA; UNLUER; TAN, 2018).

Figura 13 - Efeito do projeto de mistura na retenção de forma da largura do filamento extrudado



Fonte: (PANDA; UNLUER; TAN, 2018)

Três requisitos são propostos com relação à qualidade da impressão: qualidade da superfície, arestas quadradas, conformidade e consistência da dimensão. Todos esses três requisitos devem ser atendidos por uma mistura com qualidade de impressão aceitável (KAZEMIAN *et al.*, 2017b).

Os testes de extrudabilidade são usados para encontrar as misturas com proporções ótimas para a impressão de concreto. A mistura de referência publicada por Le *et al.* (2012) apresentou a proporção 60:40 de areia : aglomerante, compreendendo 70% de cimento, 20% de cinza volante e 10% de sílica ativa. Agregado com tamanho máximo de 2 mm e 1,2 kg/m<sup>3</sup> de microfibras de polipropileno foram utilizados.

Le *et al.* (2012) relataram que o padrão da trabalhabilidade na extrudabilidade pode ser controlada pela resistência ao cisalhamento na faixa de 0,3–0,9 kPa, sendo que a mistura ótima apresentou 0,55 kPa (controlada pela dosagem de superplastificante). Abaixo de 0,3 kPa, o concreto fresco estava muito úmido e a segregação ocorreu no trecho tubulação-sistema de bocal da bomba. Além disso, os filamentos de concreto extrudados se deformavam e apresentavam seções transversais instáveis. Acima de 0,9 kPa, o concreto fresco era muito rígido para impressão e não possuíam extrudabilidade adequada. Os filamentos de concreto eram expulsos do bocal fraturando-se e a mistura não pôde ser impressa continuamente.

O objetivo do controle de impressão é garantir que cada camada impressa tenha a capacidade de reter sua forma original e sustentar as camadas subsequentes logo após a extrusão, e ainda assim ficar suficientemente viscosa para unir as camadas adjacentes evitando a formação de vazios separados (MA; LI; WANG, 2018b).

## **2.4 Métodos de ensaio para caracterizar 3DCP**

Nesse tópico será relatado os métodos disseminados pelos trabalhos científicos e o embasamento teórico que os sustenta.

### **2.4.1 Métodos para caracterização no estado fresco - Reometria por Squeeze-flow**

Engmann *et al.* (2005) reportaram a importância no uso do fluxo de compressão como um método de reometria, destacando que como o fluxo de compressão é um fluxo espacialmente não homogêneo e transitório, a conversão de dados experimentais em funções reológicas fundamentais do material não é um exercício trivial. Seu trabalho

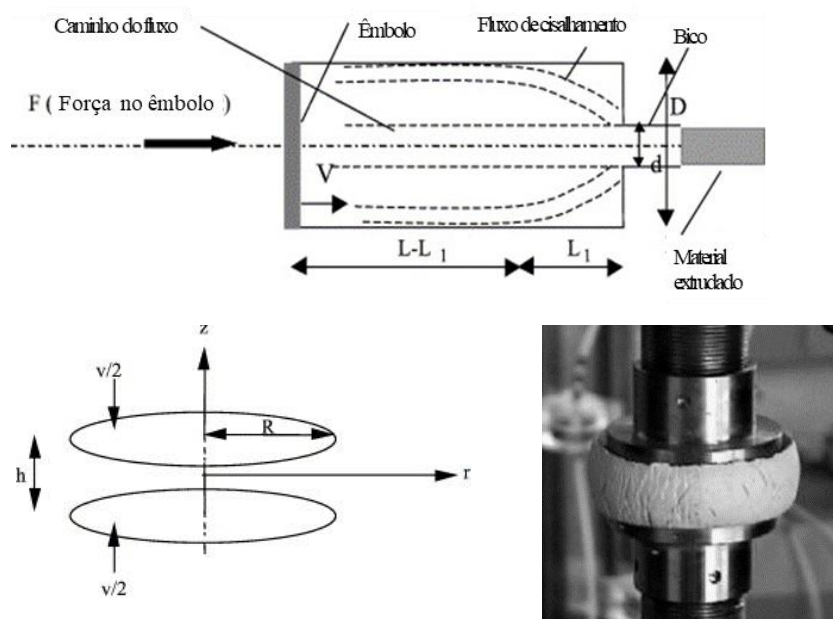
contribuiu para estabelecer o squeeze flow como um método confiável e versátil para caracterização reológica.

Moeini *et al.* (2022c), por sua vez relatou Testes de compressão uniaxial também foram realizados para simular os incrementos de pressão em camadas na impressão 3D baseada em extrusão. o método de ensaio de compressão uniaxial permitiu estudar a influência da pressão de extrusão (a pressão induzida pela deposição das camadas impressas em 3D) na construtibilidade das camadas depositadas.

Os testes de compressão são frequentemente usados na prática como uma técnica direta para determinar as propriedades de fluxo de suspensões altamente concentradas, como polímeros fundidos e pastas de cerâmica. A maioria desses materiais se comporta como fluidos altamente viscosos ou quase plásticos. Devido à sua fração de alto volume sólido, pastas granulares, como pastas de cimento firmes e argamassas firmes, mostram um comportamento de atrito que as torna altamente sensíveis à drenagem de fluidos em velocidades de fluxo baixas, mas em gradientes de alta pressão (ROUSSEL, N.; LANOS; MÉLINGE, 2003; TOUTOU; ROUSSEL; LANOS, 2005).

A Figura 14 mostra que o teste de compressão foi utilizado como uma ferramenta de identificação de comportamento reológico de materiais à base de cimento, a fim de avaliar a capacidade de extrusão (TOUTOU; ROUSSEL; LANOS, 2005).

Figura 14 - a) Tipologia de fluxo de extrusão de pasta cerâmica: fluxo de cisalhamento e convergente para comprimento  $L_1$ ; b) geometria do teste de compressão e c) início do teste para amostra de argila



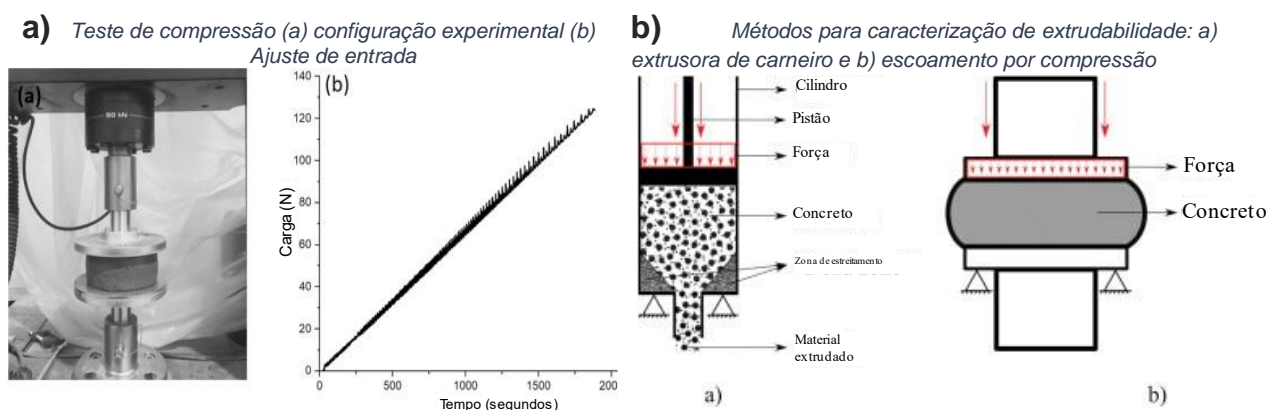
Fonte: Adaptado de Toutou et al. (2005)

A reometria rotacional é capaz de superar as limitações dos métodos tradicionais de ponto único (ex flow table), avaliando concretos e argamassas sob uma faixa considerável de taxas de cisalhamento geradas pela variação da velocidade de rotação do impulsor ou do recipiente da amostra. No entanto, foram relatados problemas em relação ao deslizamento na parede durante a avaliação de argamassas de baixa trabalhabilidade no equipamento (CARDOSO, F. A. et al., 2014)

Os reômetros rotacionais avaliam o comportamento das argamassas em diferentes taxas de cisalhamento, geralmente controlando a taxa e registrando a tensão de cisalhamento resultante. Entretanto, as limitações nos níveis de torque máximo (tensão de cisalhamento), que restringem a faixa de consistência que os poucos equipamentos disponíveis no mercado internacional são capazes de medir, aliadas ao alto custo desses produtos, fazem que os reômetros rotacionais para argamassas sejam utilizados apenas em laboratórios de universidades e centros de pesquisa (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2010b).

Nesse contexto, o teste do fluxo de compressão, isto é, a compressão de uma amostra cilíndrica entre placas paralelas é uma técnica para avaliar o comportamento do fluxo de materiais de construção. Sua alteração na geometria durante a redução de folga torna o método particularmente promissor, pois cria condições de fluxo semelhantes às envolvidas no processamento e aplicação de pastas e argamassas (CARDOSO, F. A. et al., 2014). Na Figura 15 é ilustrado alguns trabalhos no campo da impressão 3D que fizeram uso desse método adaptado (compressão axial no estado fresco) para aferir as propriedades reológicas.

Figura 15 - Teste de compressão com materiais cimentícios divulgados no meio científico



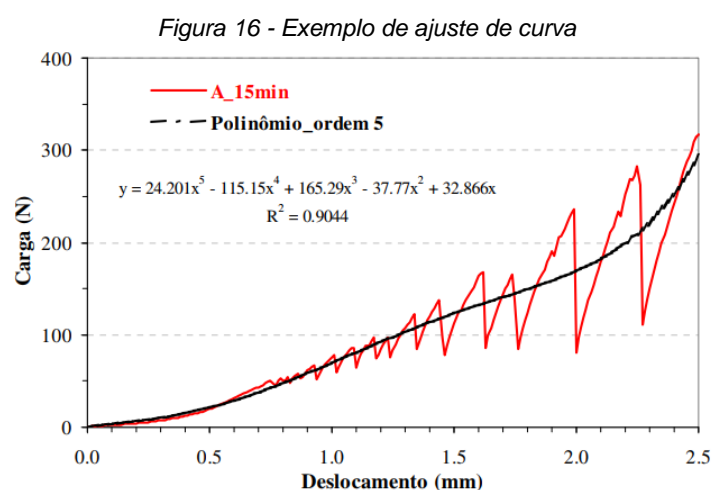
Fonte: Adaptado de Panda et al. (2018)

Fonte: Nerella et al. (2019)

O fluxo radial causado por uma força de compressão ou deslocamento ocorre por cisalhamento e/ou extensão biaxial (ou alongamento) do material, dependendo da configuração geométrica (a probabilidade de cisalhamento aumenta com a relação diâmetro/altura da amostra) e nas condições de contorno nas interfaces material-placa. Nesse caso, para uma condição antiderrapante, ocorre um cisalhamento puro, mas, inversamente, para um deslizamento perfeito (sem atrito), apenas o fluxo extensional ocorre. Na prática, os dois tipos geralmente acontecem, mas, dependendo da configuração experimental (d/h e rugosidade da placa) e das características de lubrificação do material, um ou outro pode ser predominante.(CARDOSO, F. A. et al., 2014; KONIGSBERG et al., 2013).

#### 2.4.1.1 Reometria por Squeeze-flow NBR 15839

O ensaio de reometria por *squeeze-flow* pode ser realizado com controle por força ou deslocamento. No primeiro caso uma determinada força é aplicada ao material e a deformação resultante é registrada, enquanto no segundo caso, o material é submetido a um deslocamento efetuado com velocidade constante e a força é medida (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2010b). Neste processo algumas argamassas, geralmente com níveis de consistência intermediários, fluem e depois param, sendo que quando param de fluir a carga sobe e quando voltam a escoar a carga cai. Esse fenômeno está relacionado ao atrito entre as placas e a argamassa e, também, aos mecanismos internos de deformação e fluxo do material. A linha vermelha do gráfico ilustrado na Figura 16 exemplifica esse comportamento.



Fonte: (CARDOSO, Fábio Alonso; PILEGGI; JOHN, 2010a)

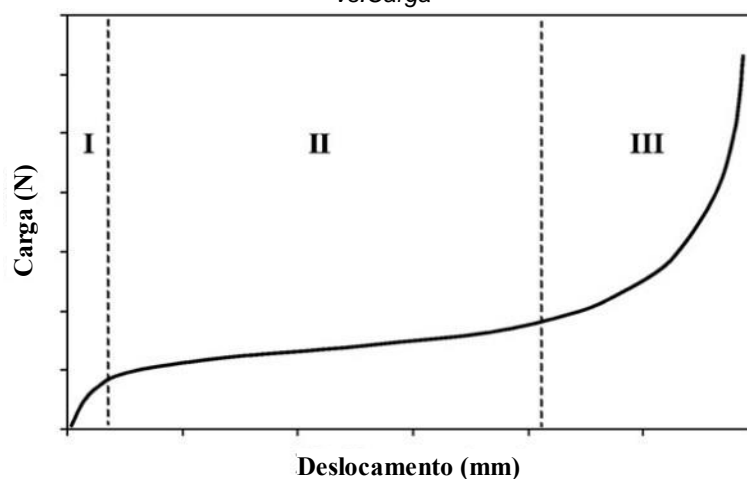
Velocidades acima de 0,1 mm/s, na faixa entre 1 e 3 mm/s, são interessantes para avaliar o material sob uma condição diferente de sollicitação. A limitação nesse caso fica por conta da capacidade do equipamento utilizado (ABNT, 2010); (CARDOSO, Fábio Alonso; PILEGGI; JOHN, 2010a).

Quando o atrito entre as placas e a argamassa é maior do que o atrito interno da argamassa, essa sofre cisalhamento interno para acomodar a redução da altura, porém sem espalhamento radial significativo. Por outro lado, quando o atrito interno é maior do que o atrito entre a massa e as placas, a argamassa espalha-se radialmente em extensão significativa, sendo facilmente perceptível ao observador. A ocorrência repetitiva desses fenômenos resulta na oscilação de carga exemplificada na Figura 16 para uma argamassa de revestimento industrializada.

A ocorrência dessas oscilações (Figura 16) por si só já é uma informação que o teste fornece sobre o comportamento do material sendo avaliado. As oscilações sugerem a ocorrência de altos níveis de cisalhamento interno. Entretanto, para facilitar a utilização dos dados, visando à comparação com outros resultados e à observação do perfil médio da curva, é necessário o tratamento dos dados a fim de se obter uma curva isenta de oscilações.

O perfil típico obtido de um ensaio de *squeeze-flow* com controle por deslocamento expresso na forma de carga vs. deslocamento apresenta 3 regiões bem definidas conforme demonstrado na Figura 17.

Figura 17 – Gráfico típico do ensaio de Squeeze-Flow controlado por taxa de deslocamento: Curva de deslocamento vs. Carga



Fonte: (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2010a)

O perfil da Figura 17 mostra três estágios principais: I - pequena tensão - é caracterizado por um comportamento elástico; II - tensão moderada - refere-se à deformação plástica ou fluxo viscoso, em que o material pode se deformar consideravelmente com pouco aumento da força aplicada; III - geralmente associada à grandes deformações – a força necessária para comprimir o material aumenta substancialmente, o que é conhecido como estágio de endurecimento da deformação (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009b; ROMANO *et al.*, 2012).

No primeiro estágio, em pequenas deformações, o material comporta-se como um sólido, apresentando deformação elástica em termos práticos, com a máxima espessura de camada que pode ser aplicada. No estágio seguinte (II), em deslocamentos intermediários, a compressão resulta em deformação radial, alongacional e de cisalhamento superando as forças que mantinham o material sob comportamento elástico e, assim, ele flui por deformação plástica e/ou viscosa dependendo das suas características. Nesta etapa o material é capaz de sofrer grandes deformações sem aumento significativo da força necessária para o deslocamento, que é um comportamento que favorece a produtividade na aplicação de argamassas. Já no terceiro estágio, em grandes deformações, ocorre um aumento expressivo (exponencial) da carga necessária para prosseguir a deformação do material. A aproximação das partículas ou de outros constituintes de um sistema submetido a grandes deformações gera forças restritivas ao fluxo devido à maior interação por embricamento ou entrelaçamento (no caso de fibras) das unidades (CARDOSO, Fábio A.; JOHN; PILEGGI, 2009).

A velocidade do ensaio interfere no comportamento do material. Quanto menor a velocidade maior a tendência à segregação, pois a pasta mais fluida tem tempo suficiente para migrar radialmente através da estrutura tridimensional formada pelos agregados, dessa forma a concentração de sólidos na região central é elevada e as cargas resultantes também. No final do teste de compressão "lenta", o centro da amostra é mais seco em comparação com o obtido no teste "rápido" (FUJII-YAMAGATA *et al.*, 2019; TOUTOU; ROUSSEL; LANOS, 2005).

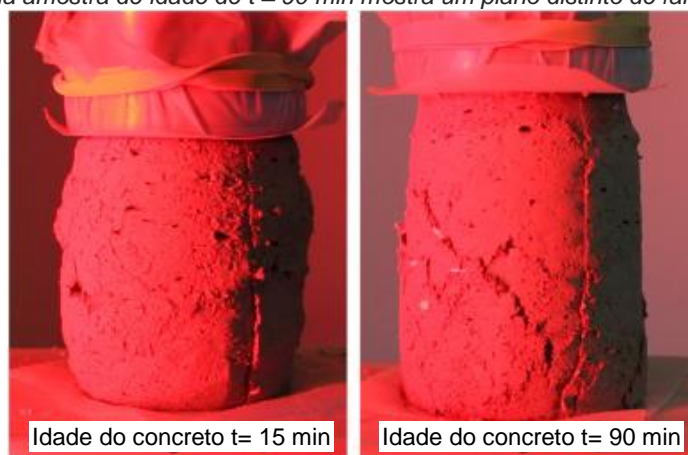
O teste "rápido" consiste no ensaio em que as amostras são solicitadas em altas velocidades, nessa situação a pasta não tem tempo para migrar grandes distâncias e o sistema comporta-se como um fluido homogêneo, necessitando menores cargas para ser deformado. Para uma velocidade de compressão "alta", o material permanece homogêneo durante o teste. O ensaio permite identificar a tensão de escoamento, fator de coesão e de atrito. Esses parâmetros estão diretamente ligados a condições adequadas de extrusão.

Dessa forma, as tensões de escoamento e os fatores de atrito não devem induzir alta pressão de extrusão que pode exceder a capacidade da extrusora. Por outro lado, é necessário um valor de rendimento de material suficiente para que os produtos extrudados mantenham a forma fixada pela geometria da matriz (FUJII-YAMAGATA *et al.*, 2019; TOUTOU; ROUSSEL; LANOS, 2005).

### 2.4.2 Comportamento mecânico de concreto fresco

A resistência no estado fresco permite que o concreto carregue seu próprio peso imediatamente após a mistura ou compactação. Esse comportamento é atribuído à combinação do atrito e da coesão entre partículas (WOLFS; BOS; SALET, 2018b). O ensaio ilustrado na Figura 18 é análogo ao teste de compressão uniaxial não confinado realizado em solos, e foi realizado até 50% de deformação vertical, com a diferença que o teste com o concreto fresco é executado rapidamente para eliminar a influência do acúmulo tixotrópico.

Figura 18 - Falha típica observada em testes de compressão em concreto fresco. Uma amostra de  $t = 15$  min mostra "barril" (esq), enquanto uma amostra de idade de  $t = 90$  min mostra um plano distinto de falha de cisalhamento (direita).

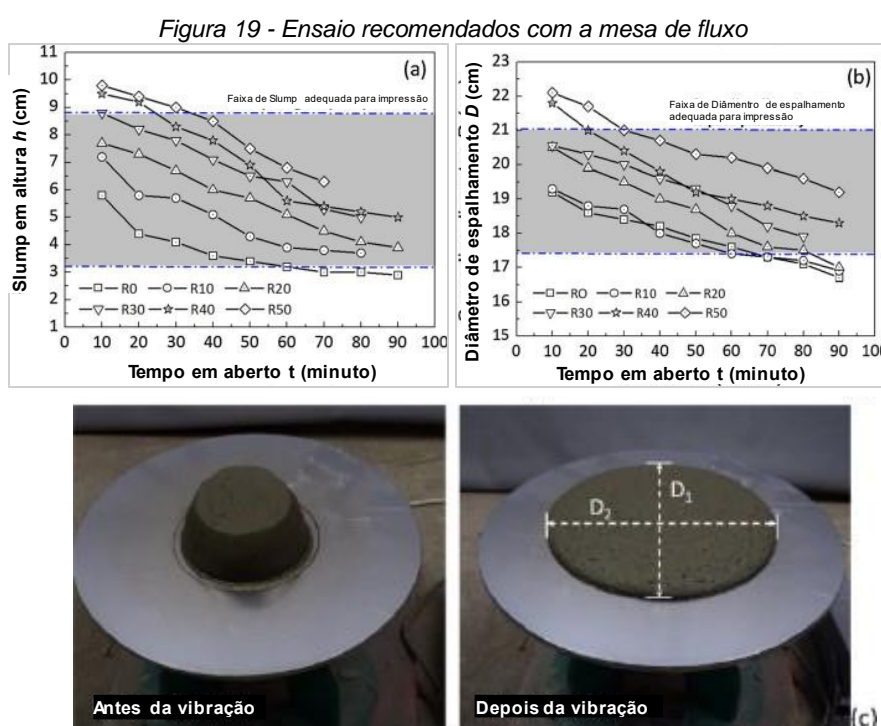


Fonte: (WOLFS; BOS; SALET, 2018b)

Wolfs *et al.* (2018b) descreve o comportamento ilustrado na Figura 18 após o teste realizado a uma taxa de 30mm/min em espécimes cilíndricos (70x140mm) devido à rigidez relativamente baixa dos corpos de prova de idade precoce que se expandem significativamente na direção lateral à medida que a deformação vertical aumenta. Um plano de falha distinto não é formado e os espécimes falham por abaulamento.

### 2.4.3 Trabalhabilidade com ensaio da mesa de consistência

A fluidez é um parâmetro da trabalhabilidade usada nos materiais a base de cimento Portland. Na área da impressão 3D, o controle de fluidez permite garantir o transporte suave da pasta fresca do sistema de armazenamento para o bocal. A medição da fluidez pode ser alcançada realizando uma série de experimentos, incluindo o teste de queda, o teste do funil V e teste da mesa de fluxo (Figura 21). Ma et al. (2018) afirma que tais testes são preferíveis devido sua simplicidade e resultados imediato. Na Figura 21a-b), são plotados os gráficos para *slump* e diâmetro de espalhamento de materiais cimentícios com diferentes proporções de substituição de materiais de acordo com o tempo em aberto obtidos por Ma et al. (2018b). Tal metodologia foi reproduzida por Tay et al. (2019), (Sanjayan et al., (2018), entre outros pesquisadores.



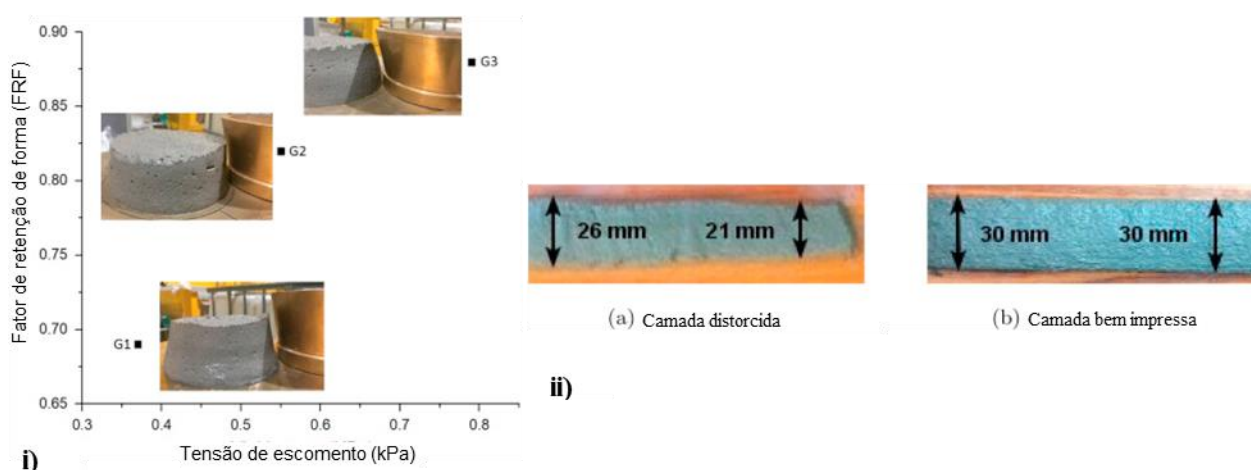
Fonte: (MA, LI, et al., 2018b)

O teste de *flow-table* é um método frequentemente usado para avaliar intuitivamente a trabalhabilidade de materiais cimentícios imprimíveis em 3D baseados em extrusão, que pode ser caracterizado pelo abatimento e diâmetro de fluxo do material (LU et al., 2019). O teste de mini-slump é preferível em laboratórios e em campo principalmente devido à sua simplicidade e resultados imediatos e vem sendo amplamente usado na caracterização reológica indireta dos materiais 3DCP (MA; LI; WANG, 2018a; WENG et al., 2018). Este

método simples e padronizado vem sendo utilizado para determinar a capacidade de impressão das misturas cimentícias antes da impressão 3D (TAY; QIAN; TAN, 2019).

Sanjayan et al. (2018) padronizou o diâmetro de espalhamento da mistura fresca em 182 mm após 25 quedas da mesa de fluxo. Também foi observado que antes de deixar cair a mesa de fluxo, o diâmetro do espalhamento era de apenas 100 mm, igual ao diâmetro do fundo do cone de fluxo. Panda e Tan (2018) ainda correlacionaram essa retenção de forma após remover o cone com a tensão de escoamento das misturas extrudáveis (Figura 20). Isso significa que a mistura fresca teve uma mistura de queda zero.

Figura 20- Relação entre fator de retenção de forma (SRF) e tensão de escoamento das misturas extrudáveis



Fonte: Adaptado de Panda, Tan (2018a)

Para a investigação da perda de trabalhabilidade ao longo do tempo de pega do cimento, Tay et al. (2019) utilizaram o teste flow table em tempos determinados (10, 30, 50, 70 e 90 minutos após o contato do cimento). Após o ensaio da mesa de consistência, o material era vertido na cuba e homogeneizado por 30 segundos na velocidade rápida. Em tempos de 28, 48, 68 e 88 minutos a mistura é agitada por 1 minuto em velocidade baixa e moldada para realizar o ensaio nos tempos estabelecidos anteriormente. A comparação da evolução da fluidez determina a perda de trabalhabilidade com a agitação contínua conforme ilustrado na Figura 21a-b). Embora a tixotropia não seja medida diretamente por meio da histerese nesse estudo, a perda de trabalhabilidade é usada como um indicador da tixotropia de “ciclo único” na escala de tempo curto em que um material cimentício seria impresso (SOLTAN; LI, 2018).

Tay et al. (2019) reportaram que as misturas com um slump entre 4 e 8 mm e um slump-flow (espalhamento) entre 150 e 190 mm proporcionam uma superfície lisa e alta capacidade de construção. E assim concluíram que a região imprimível do material pode

ser definida de acordo com os valores de queda e fluxo de queda. Com este método simples e padronizado, a capacidade de impressão das misturas pode ser determinada antes da impressão 3D.

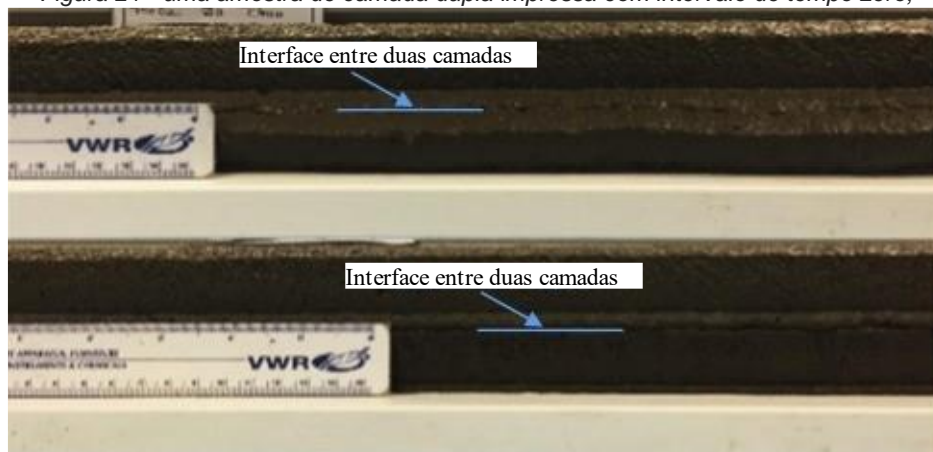
Papachristoforou et al. (2018) avaliou a trabalhabilidade do concreto fresco usado como material para manufatura aditiva com quatro testes diferentes: flow table, reômetro ICAR, Vicat e um experimental aplicado em laboratório medindo o consumo de energia elétrica do motor que gira o parafuso da extrusora. Medindo uma ampla gama de misturas produzidas com diferentes agregados (calcário, areia de rio, combinação de ambos) e ligantes (cimento, cinza volante, escória de alto forno), imprimindo-os com um sistema de impressão com extrusora de parafuso e definindo critérios de impressão, a gama de printabilidade foi obtido. O teste de flow table foi mais consistente em relação aos demais métodos utilizados. A faixa de printabilidade foi encontrada entre 18 e 24 cm (valores de espalhamento). Por outro lado, Liu et al. (2022) investigaram a relação entre a gradação do vidro reciclado e o desempenho do concreto impresso em 3D. Antes da impressão, as misturas frescas eram submetidas ao teste de flow table de acordo com ASTM C230-20 como forma de avaliar a fluidez da argamassa imprimível em 3D no estágio fresco. Os diâmetros de espalhamento variaram de 160 a 168 mm.

Lu et al. (2019) desenvolveram um material cimentício com cenosferas de cinzas volantes e agente incorporador de ar foram introduzidos para melhorar a precisão dimensional da impressão 3D à base de spray. Esses materiais apresentaram 7 mm a 27 mm de slump e slump-flow de 160 a 240 mm. Por sua vez, Ma et al. (2018) mediram a fluidez de um material cimentício para impressão com rejeitos de cobre encontrando que a região imprimível foi apresentada por materiais com 3 a 9 mm de slump e 174 mm a 210 mm de slump-flow.

#### **2.4.4 Métodos de teste “Assentamento De Camada”**

O teste de "assentamento da camada" foi desenvolvido para permitir a avaliação quantitativa da estabilidade da forma. Nesse teste, Figura 21, duas camadas de concreto foram impressas uma sobre a outra com um intervalo de tempo específico, enquanto isso, uma câmera registra várias imagens antes e após a deposição da amostra ao lado de uma régua, e estas imagens eram posteriormente processadas por um software (*Image J*) para analisar e medir o estabelecimento da camada (KAZEMIAN et al., 2017b).

Figura 21 - uma amostra de camada dupla impressa com intervalo de tempo zero,



Fonte: (KAZEMIAN et al., 2017b)

A tensão de escoamento do concreto fresco é o principal parâmetro que determina a estabilidade da forma antes do início de pega. A tensão de escoamento aumenta ao longo do tempo na ausência de agitação e de tensão de cisalhamento (PERROT, 2016). Isto é devido à nucleação de CSH entre os grãos de cimento em seu ponto de contato (ROUSSEL, N. et al., 2012).

Vários pesquisadores relataram um aumento linear na tensão de escoamento durante o período dormente (JOSSERAND; COUSSY; DE LARRARD, 2006; MECHTCHERINE, V. et al., 2020; PERROT; RANGEARD; PIERRE, 2016), o que sugere a possibilidade de um aumento linear correspondente da estabilidade da forma com o tempo. Outra consideração importante para um estudo fundamental da estabilidade da forma é a tixotropia, definida como acúmulo e quebra da estrutura 3D interna da pasta cimentícia. Esse fenômeno ocorre devido à floculação ou coagulação e dispersão de partículas de cimento que, por sua vez, são resultantes de forças interpartículas e conexões químicas.

Nerella *et al.* (2019) usou o teste de assentamento de camada para avaliar a qualidade do processo de impressão como um todo. Na Figura 22, é mostrado os resultados de uma impressão 3D assíncrona, onde o cabeçote de impressão trabalha muito rápido ou muito lento. O fator de atrito aparente pode ser responsável pela aparição de falhas nos extrudados que saem da matriz, devido à alternância dos fluxos de aderência e deslizamento (TOUTOU *et al.*, 2005).

Figura 22 - Resultados da impressão 3D assíncrona: a) o cabeçote de impressão é muito rápido, levando a camadas descontínuas; b) o cabeçote de impressão é muito lento, levando a camadas com saliências



Fonte: Adaptado de (NERELLA, V. N. et al., 2019)

O acúmulo e a quebra da estrutura interna causam aumento e redução na viscosidade da pasta fresca, respectivamente. Considerando o processo 3DCP, no qual a mistura cimentícia sofre considerável esforço de cisalhamento e agitação antes de ser depositada como uma camada, essas alterações na estrutura interna e a consequente influência na estabilidade da forma precisa ser consideradas (KAZEMIAN *et al.*, 2017b).

#### 2.4.5 Teste de extrudabilidade e construtibilidade

Como definido no item 2.3.1, a extrudabilidade é definida como a capacidade de extrusão contínua através do bocal da impressora com a conformidade dimensional necessária para formar camadas com boa qualidade de impressão. Por boa qualidade de impressão, entende-se que os elementos extrudados estão livres de defeitos, tais como vazios e descontinuidade (Figura 22). A qualidade de impressão em linha foi avaliada por observação visual. Para realizar o teste, Rahul *et al.* (2019) fizeram uma camada única de 30 cm de comprimento utilizando a impressora de bancada de teste. As dimensões da camada extrudada foram medidas a cada 10 cm ao longo do comprimento da linha impressa. O teste foi qualificado como “ok” se: (i) as medições feitas em todos esses locais fossem confirmadas com as dimensões do bico retangular dentro de uma tolerância de 0,5 mm e, (ii) a linha impressa estava completamente livre de defeitos de superfície tais como vazios e descontinuidade.

Le *et al.* (2012) e Rahul *et al.* (2019), usaram o teste de construtibilidade para definir os limites máximos e mínimos de superplastificante. Como exemplo, não houve deformação da camada inferior no teste de construtibilidade para a dosagem de superplastificante de 0,10%. No entanto, ao aumentar para 0,11%, houve uma compressão de 2 mm da camada inferior. Com uma dose de superplastificante mais baixa, a tensão de escoamento e a

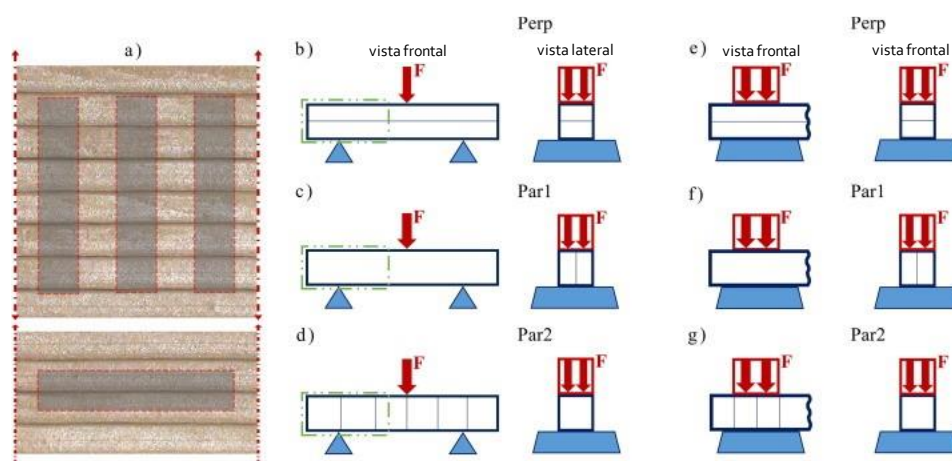
viscosidade era muito alta para permitir a extrudabilidade, enquanto em uma dose superplastificante mais alta, a tensão de escoamento era muito baixa e a mistura não tinha a força de cisalhamento necessária para a capacidade de construção (RAHUL *et al.*, 2019).

O estado em que a microestrutura não é perturbada corresponde à tensão de escoamento estático, que é superior à tensão de escoamento dinâmico. A tensão dinâmica de escoamento é descrita como a força necessária para sustentar o fluxo, enquanto a tensão estática de escoamento é a força necessária para iniciar o fluxo. Observa-se que a tixotropia é a origem da discrepância entre tensão de escoamento estático e dinâmico (WENG *et al.*, 2018).

#### 2.4.6 Métodos para caracterização no estado endurecido - Resistência à flexão, compressão e de adesão entre camadas

Nerella *et al.* (2019) avaliou a resistência de concreto impresso em 3D usando corpos de provas serrados de uma amostra impressa (Figura 23a), assim como Wolfs *et al.* 2019.

Figura 23 - a) Representação da extração do espécime da parede de concreto impressa, b – d) configurações do teste de flexão; e - g) configurações do teste de compressão.



Fonte: Adaptado de Nerella et al. (2019)

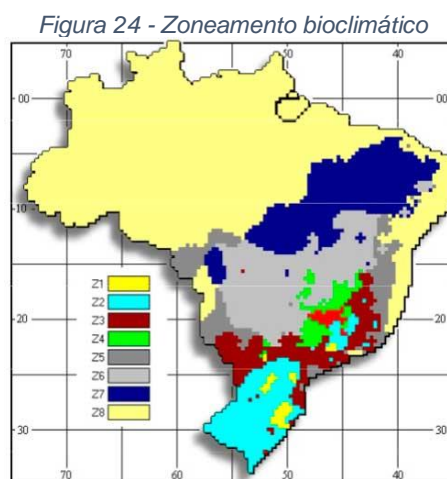
As Figura 23b-d representam as configurações de teste de flexão. As linhas azuis dentro dos espécimes indicam as interfaces das camadas. As inserções verdes tracejadas indicam metades de prisma usadas para testes de compressão (Figuras 15e-g). A adesão entre camadas, foi indiretamente determinada a partir do ensaio de tração na flexão, com aplicação de carga paralela às camadas conforme Figura 23d.

A resistência entre camadas depende da aderência entre camadas extrudadas, que é uma função do intervalo de tempo de impressão entre camadas, referido como tempo de

atraso. Existe uma necessidade de otimizar o tempo de atraso, que por um lado deve ser longo o suficiente para que as camadas impressas possam ganhar uma resistência no estado fresco adequada para suportar as camadas superiores, sem deformação significativa ou colapso. Por outro lado, o tempo de atraso deve ser curto o suficiente para garantir uma força de adesão adequada entre as camadas impressas e fornecer uma taxa de construção economicamente viável (SANJAYAN *et al.*, 2018). Nerella *et al.* (2018) mediu a resistência de adesão indiretamente no ensaio de flexão perpendicular as camadas conforme esquema “Par2” da Figura 13g).

## 2.5 Conforto térmico das edificações

De acordo com Lamberts *et al.* (2014), o conforto térmico é definido por uma sensação humana, subjetiva, que depende de fatores físicos, fisiológicos e psicológicos. As edificações residenciais devem apresentar características que atendam ao desempenho térmico, considerando-se a região bioclimática definida pela norma ABNT NBR 15220 (2015), através do zoneamento ilustrado na Figura 24, que traz oito zonas distintas e seus respectivos percentuais em relação à área total do território brasileiro (ABNT NBR 15575, 2013).



Fonte: <http://projeteee.mma.gov.br/>

O estado do RN contém as regiões Z7 e Z8 sendo que a região Z8 corresponde a cobertura de 53,7% do território. Para esta condição bioclimática é recomendado que os tipos de vedações externas, tanto parede quanto cobertura, sejam do tipo leve refletora (ABNT NBR 15220-2, 2015). Na Tabela 3 são descritas as típicas da zona 8.

Tabela 3 - características da zona bioclimática 8

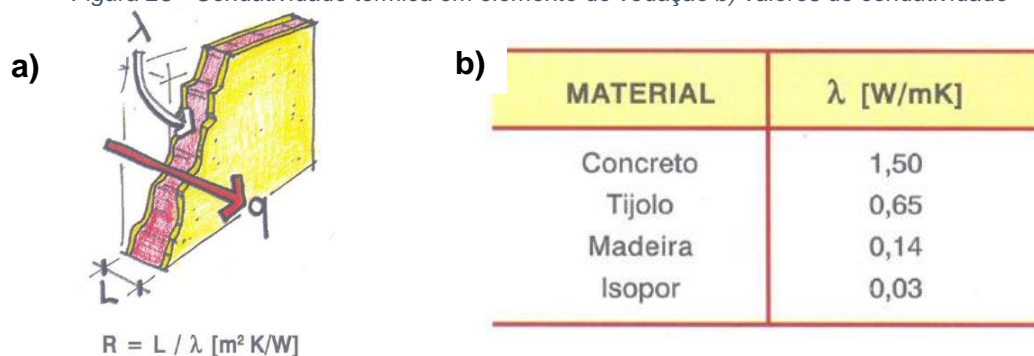
Características de típica cidade dentro da Z8	Dados de dias típicos de verão em Natal	Dados de dias típicos de inverno em Natal
Temperatura máxima do dia °C	32,1	26,9
Amplitude diária de temperatura °C	8	7,8
Radiação solar (Wh/m <sup>2</sup> )	6274	5925
Temperatura mínima do dia °C	24,1	19,1

Para a zona climática mais severa temos que Temperatura máxima no verão é 32.1°C com 8° C de amplitude diária e a radiação solar corresponde 6274 Wh/m<sup>2</sup>. (ABNT, 2013).

### 2.5.1 Características térmicas

Define-se como condutividade térmica ( $\lambda$ ), o fluxo de calor que atravessa uma unidade de espessura do material, quando entre duas faces planas e paralelas se estabelece uma diferença unitária de temperatura (Figura 25a) (LAMBERTS, 2013).

Figura 25 - Condutividade térmica em elemento de vedação b) valores de condutividade



Fonte: Lamberts (2012)

Na Figura 25b são mostrados valores de condutividade térmica para alguns materiais de construção. Oposto a condutividade térmica, existe a propriedade resistividade térmica (R) que representa a dificuldade de um material de conduzir calor e é dependente da espessura do material e da sua condutividade térmica.

Saleh et al. (2021) relatam que a condutividade térmica é um fator que influencia na transferência de calor entre as paredes e os telhados dos edifícios. Assim, os isolantes térmicos são um meio essencial que contribui para reduzir a transferência de calor e reduzir aspectos da energia operacional dos dispositivos utilizados para fins de aquecimento e

refrigeração coisa significativa e necessária. Sabe-se que é essencial isolar os edifícios para reduzir a carga térmica e reduzir o uso de dispositivos de aquecimento e resfriamento devido ao alto custo do combustível e da energia elétrica utilizada para este fim; além de reduzir as emissões de dióxido de carbono, CO<sub>2</sub> e outros gases que causam o aquecimento global e aumentam a poluição ambiental.

A difusidade térmica ( $D$ ) representa a velocidade com que o calor se difunde por meio de um material. Quanto mais baixo for o seu valor, mais tempo o calor leva para passar por um material. Assim, a capacidade de isolamento de um material depende, não apenas do valor de  $\lambda$ , mas também da velocidade de transferência de calor, que representa a própria difusividade térmica ( $D$ ) (TAOUKIL *et al.*, 2013).

A NBR 15220 (ABNT, 2015) descreve transmitância térmica de paredes externas ( $T$ ) como a propriedade que representa a capacidade dos materiais de conduzir maior ou menor quantidade de energia por unidade de área e de diferença de temperatura, estando relacionada à permissão da passagem de energia, espessura do componente e condutividade térmica dos materiais constituintes. Enquanto a propriedade capacidade térmica ( $C$ ) traduz a quantidade de energia necessária para variar em 1 °C a temperatura de um ambiente e consiste no produto da capacidade calorífica volumétrica ( $C_v$ ) pela espessura ( $e$ ) do material avaliado ou o produto entre essa espessura ( $e$ ), o calor específico ( $c$ ) e densidade de massa aparente ( $\rho$ ).

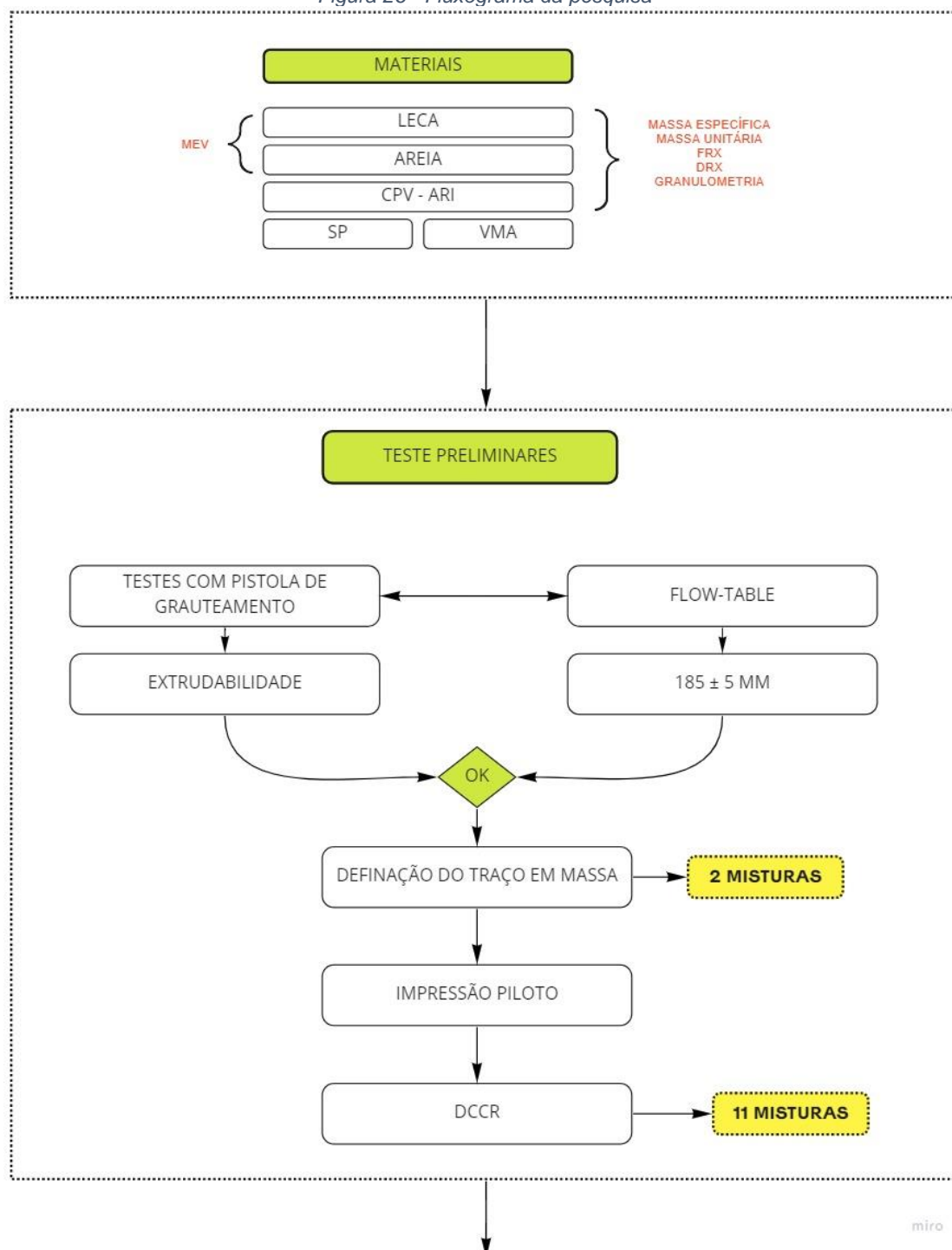
O uso de concreto com baixo coeficiente de condutividade térmica e alta capacidade calorífica é uma boa opção na construção de residências, instalações residenciais e industriais e a substituição de parte do cimento por sílica impacta nas propriedades térmicas e ambiental (SALEH *et al.*, 2021).

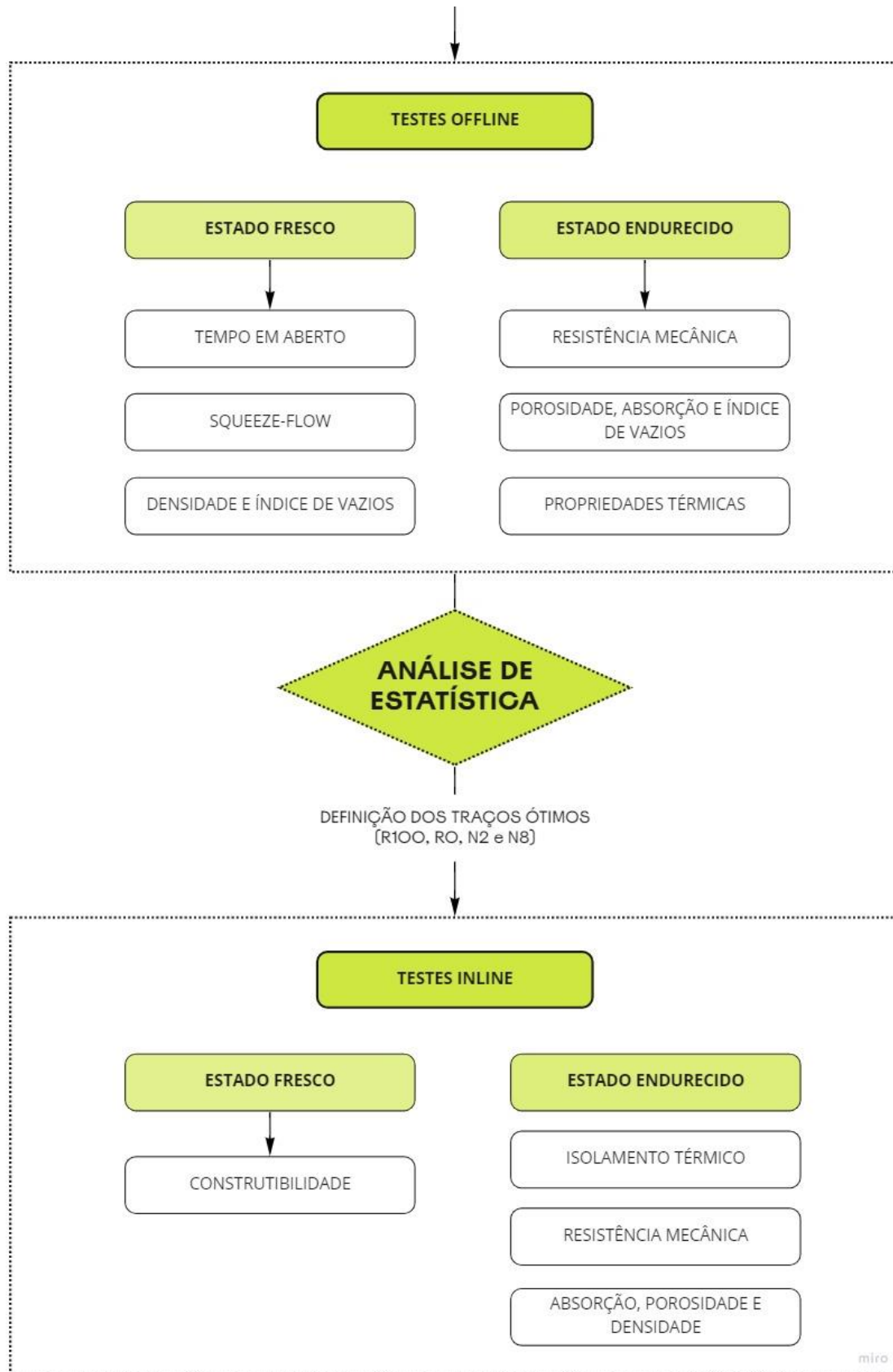
## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo tratará sobre os materiais utilizados, sua caracterização e metodologia de experimentos. A Figura 26 ilustra o fluxograma da pesquisa.

Figura 26 - Fluxograma da pesquisa





### 3.1 Materiais e métodos

Nesta pesquisa foram produzidos compósitos para impressão 3D contendo cimento Portland ARI (CP), areia lavada de rio (AREIA), agregado de argila expandida leve (LECA), da marca CINEXPAN, VMA a base de celulose BQMIL e aditivo superplastificante (à base de éter policarboxílico) BASF. Esta seção abordará os métodos para caracterização dos materiais, procedimentos para formular as misturas e as técnicas para avaliação das misturas no estado fresco e no estado endurecido realizado.

#### 3.1.1 Caracterização dos materiais de partida

Os agregados utilizados foram submetidos aos ensaios de granulometria pela norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). O agregado refratário LECA foi adquirida como argila expandida tipo laminada 2,5mm, da marca CINEXPAN, outras informações químicas e físicas se encontram na ficha técnica do produto, ilustrada na Figura 27. O agregado natural foi adquirido como areia média e para a utilização na composição 3DCP, aplicou-se a fração passante na peneira 1,2 mm, o procedimento de peneiramento também foi realizado para a LECA.

Figura 27- FICHA TÉCNICA DO PRODUTO (Argila expandida tipo laminada 2,5) Fonte: CINEXPAN

PROPRIEDADES QUÍMICAS		PROPRIEDADES FÍSICAS	
Silício (em SiO <sub>2</sub> )	63,19%	Densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> )	750 ± 10%
Alumínio (em Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	18,02%	Massa Específica (g/dm <sup>3</sup> )	1,40
Ferro (em Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	7,63%	Classes granulométricas (mm)	0 - 2,5
Titânio (em TiO <sub>2</sub> )	0,92%	Resistência mecânica	2,3 MPa ou 23,5 Kgf/ cm <sup>2</sup>
Cálcio (em CaO)	0,64%	Condutividade Térmica	0,10 a 0,16 W/(m.K)
Magnésio (em MgO)	3,26%	Isolamento acústico	média 44 dB
Sódio (em Na <sub>2</sub> O)	0,61%		
Potássio (em K <sub>2</sub> O)	4,91%		
Óxido de Fósforo (em P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,20%		
Óxido de Manganês (em MnO)	0,08%		
Óxido de Bário (em BaO)	0,09%		
Perda ao fogo	0,20%		

\*Material quimicamente inerte

A areia e LECA foram submetidas a ensaio de absorção de água (Tabela 4) determinada após 24h de imersão em água. A porosidade foi calculada para a LECA conforme metodologia de Nepomuceno *et al.* (2018).

Tabela 4- Propriedades físicas dos materiais

Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )		Método/ Norma
<b>LECA</b>	897	NBR NM 45, (ABNT, 2006).
<b>SAND</b>	1550	NBR NM 45, (ABNT, 2006).
<b>CP</b>	1440	NBR NM 45, (ABNT, 2006).
<b>Massa específica real (kg/m<sup>3</sup>)</b>		
<b>LECA</b>	2001	NBR 16916 (ABNT, 2021)
<b>SAND</b>	2590	NBR 16916 (ABNT, 2021)
<b>CP</b>	3120	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
	<b>Absorção de água(%)</b>	<b>Porosidade(%)</b>
<b>LECA</b>	30.2	24.5
<b>SAND</b>	0.9	-
		<b>Nepomuceno et al. (2018).</b>

A partir da tabela 4, observa-se que densidade aparente da LECA é de 897 kg/m<sup>3</sup> versus 1550 kg/m<sup>3</sup> da areia e 1440 kg/m<sup>3</sup> do cimento. Os valores de massa específica são 2001 kg/m<sup>3</sup>, 2590 kg/m<sup>3</sup> e 3120 kg/m<sup>3</sup> para a LECA, areia e cimento, respectivamente. Esses valores serão usados para calcular a densidade teórica da composição e estipular o valor de ar incorporado da mistura fresca.

Após o peneiramento a LECA não se adequa mais como agregado leve, por apresentar densidade superior a 2001 kg/m<sup>3</sup>, no entanto as composições formuladas irão ter propriedades térmicas otimizadas e menor peso específico quando comparado as misturas com agregados convencionais.

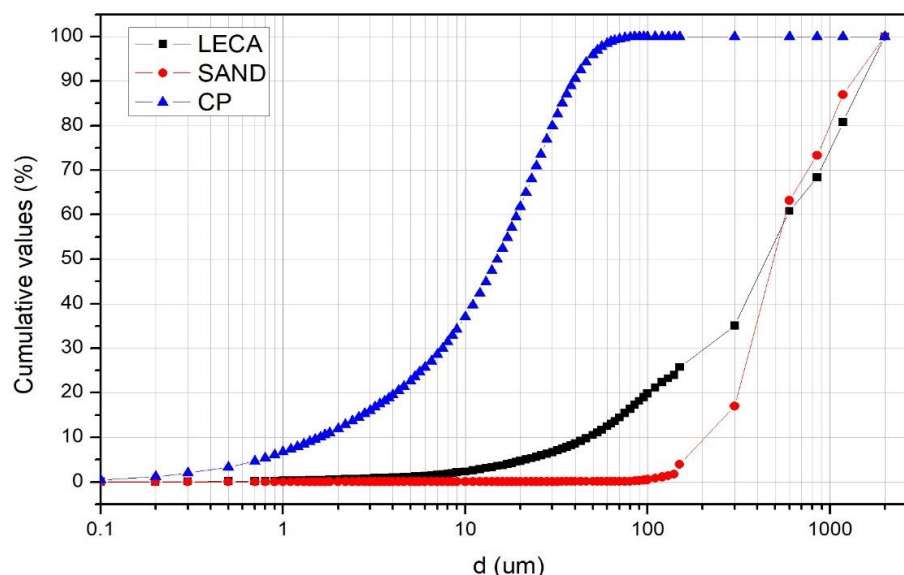
A porosidade da LECA foi de 24,5%, e sua taxa de absorção de água em 24 horas de 30,2% por massa seca. A porosidade da areia foi nula e a absorção de água menos de 1%. Os finos da LECA (< 75 µm) foram submetidas ao teste de atividade pozolânica com cal, de acordo com a norma NBR 5751 (ABNT, 2012). Todavia, o material não apresentou reatividade suficiente para ser considerado pozolânico.

### 3.1.1.1 Distribuição do tamanho das partículas

As distribuições de tamanho de partículas dos agregados finos, na faixa de 150 a 2000 µm, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2005), são mostradas na Figura 28. O cimento Portland (CP) e as frações dos agregados miúdos menores que 150 µm foram submetidos à análise de difração a laser, e se encontram plotados na Figura 28. Os

resultados das análises de tamanho de partículas são resumidos na Tabela 5, juntamente com propriedades físicas selecionadas dos agregados e cimento Portland.

Figura 28-Distribuições de tamanho de partículas Peneiramento e análise a laser ( $d < 150 \mu\text{m}$ ).



Inferese-se do gráfico ilustrado na Figura 28 na faixa de  $600 \mu\text{m}$  a  $2000 \mu\text{m}$ , que os perfis dos agregados têm uma inclinação semelhante. Além dessa faixa ( $<600 \mu\text{m}$ ), a curva da LECA fica mais suave, indicando uma distribuição contínua do tamanho das partículas. A curva de areia inclina-se mais verticalmente até  $100 \mu\text{m}$  quando se torna constante devido à ausência de partículas menores que  $75 \mu\text{m}$ . Por outro lado, as partículas da argila expandida têm pouco mais de 15% de partículas menores que  $75 \mu\text{m}$ . Portanto, pode-se observar que as curvas do CP e da LECA são mais suaves que as da areia, que tem uma distribuição concentrada em torno de partículas na faixa de  $300$  a  $1200 \mu\text{m}$ . De acordo com a Figura 28, a fração inferior a  $150 \mu\text{m}$  para areia e LECA representa 4% e 25%, respectivamente, do volume desses materiais.

Tabela 5 - Distribuição de tamanhos de partículas (range  $0.10$ - $500 \mu\text{m}$ )

Granulometria a laser				
	Tamanho ( $\mu\text{m}$ )			
	D10	D50	D90	Média
<b>LECA</b>	11.0	62.6	131.8	67.7
<b>SAND</b>	92.5	140.8	205.8	144.4
<b>CP</b>	1.6	15.0	39.3	18.2

Embora a LECA não atenda aos requisitos da norma NBR 7211 (ABNT, 2005) para agregados finos utilizados em concreto, as misturas para impressão 3D exigem uma quantidade maior de finos do que outros materiais de construção, como argamassas e concretos. A LECA é mais fina que a areia e possui uma área de superfície específica maior, proporcionando uma distribuição espacial mais homogênea de partículas do que areia para o mesmo volume de substituição. Esse efeito promove um caminho mais tortuoso para as ondas de calor, à medida que a substituição da areia pela LECA aumenta (REMESAR *et al.*, 2020a). Por outro lado, a maior quantidade de finos da LECA pode gerar um efeito de enchimento na matriz cimentada e alterar a capacidade de trabalho da mistura, uma vez que 15% do material é  $\leq 75 \mu\text{m}$ .

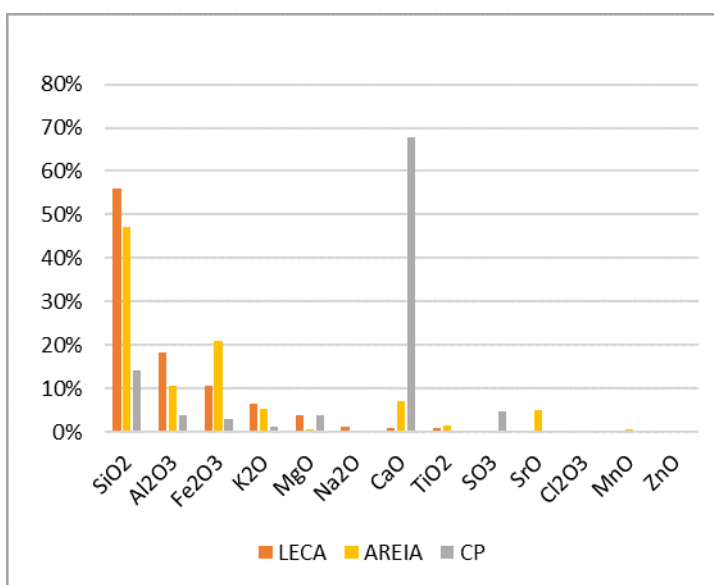
A absorção de LECA foi 30,5%, valor maior do que é tipicamente observado neste material na literatura, e é devido ao menor tamanho de partícula e maior superfície específica das partículas deste material na faixa granulométrica de agregado miúdo (diâmetro  $< 5\text{mm}$ ) (REMESAR *et al.*, 2020). Com isso a água tem mais acesso aos poros internos que não estão disponíveis em faixas granulométricas maiores. Nepomuceno *et al.*, (2014) encontrou LEÇA com absorção de água de 26%, enquanto o agregado natural (areia) apresentou absorção menor que 1%. Finalmente, o cimento Portland tem um diâmetro médio de  $18 \mu\text{m}$  e uma curva muito contínua, contribuindo com o empacotamento da mistura.

### 3.1.2 Análise química (FRX)

A análise química FRX foi desenvolvida por fluorescência de raios X utilizando o espectrômetro por fluorescência de raios X do tipo EDX-720, Shimadzu, em uma atmosfera a vácuo e desenvolvido o método semiquantitativo para a determinação dos elementos em termos de óxidos.

Tabela 6 - Composição em termos de óxidos

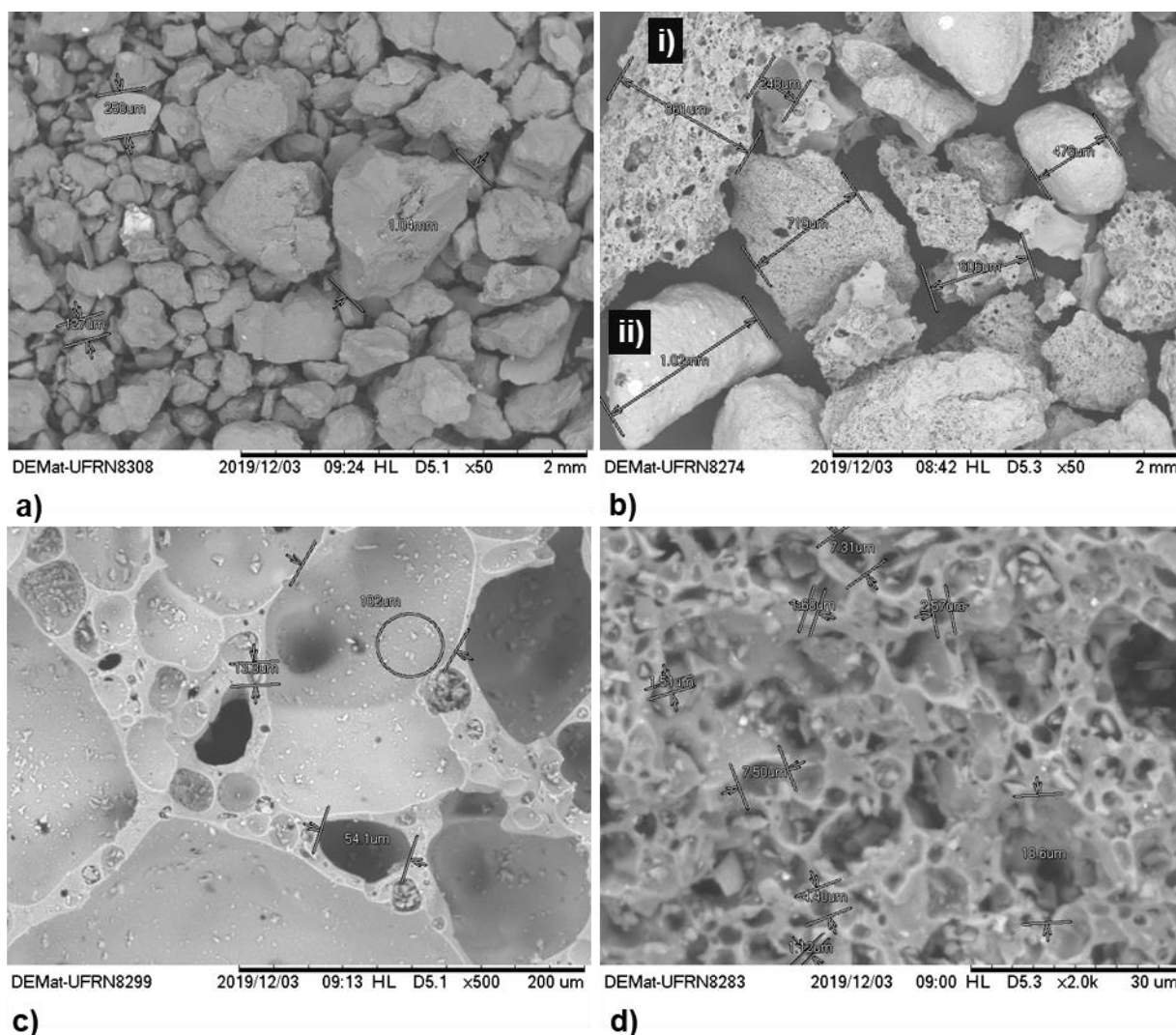
	LECA	AREIA	CP
<b>Fórmula</b>	<b>Concentração</b>		
<b>SiO<sub>2</sub></b>	56,07%	47,11%	14,24%
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	18,39%	10,61%	3,75%
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	10,65%	20,92%	2,91%
<b>K<sub>2</sub>O</b>	6,60%	5,35%	1,35%
<b>MgO</b>	3,80%	0,69%	3,90%
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	1,30%	0,00%	0,50%
<b>CaO</b>	1,09%	7,14%	67,69%
<b>TiO<sub>2</sub></b>	1,00%	1,42%	0,20%
<b>SO<sub>3</sub></b>	0,50%	0,12%	4,90%
<b>Cl<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,31%	0,00%	0,21%
<b>MnO</b>	0,08%	0,58%	0,08%
<b>ZnO</b>	0,07%	0,30%	0,02%
<b>NiO</b>	0,07%	0,00%	0,00%
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,06%	0,00%	0,02%
<b>ZrO<sub>2</sub></b>	0,04%	0,00%	0,01%
<b>CuO</b>	0,02%	0,00%	0,00%
<b>SrO</b>	0,01%	5,05%	0,03%



### 3.1.3 Análise microscópica (MEV)

A análise microscópica foi realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), as micrografias foram obtidas em microscópio de bancada da marca Hitachi modelo TM-3000, com magnificação de até 5000x operando em aceleração de voltagem de 15 kV com filamento de tungstênio em uma atmosfera à vácuo. As amostras consistiam em grãos que não receberam recobrimento de material condutor e foram aderidos em porta amostra metálicos por meio de uma fina fita de carbono, as análises foram realizadas com ampliação de 50 a 2000x e estão ilustradas na Figura 29.

Figura 29-Microscopia eletrônica de varredura de agregados. a) Areia em x50; b) LECA em x50; c) partícula LECA i) a 500 x; d) Partícula LECA ii) a 2000 x.



Imagens de microscopia eletrônica de varredura dos agregados são mostradas na Figura 29. Partículas típicas de areia possuem forma equidimensional com superfícies lisas e ausência de finos na superfície (Figura 29 a). Por outro lado, as partículas LECA têm superfície porosa (Figura 29b-i) e superfície regular como pode ser visto na Figura 29b- ii).

A 500x de ampliação (Figura 29c), percebe-se sulcos sobre as partículas de LECA, no entanto, estes sulcos são geralmente fechados e não afetam a permeabilidade. A ampliação sobre a partícula adjacente (ii) apresenta uma superfície impermeável, mas pulverulenta, como mostrado na Figura 29d. Com base na observação das micrografias de LECA, percebe-se uma distribuição superficial de poros uniforme, conforme (Remesar et al., 2020a). Isso faz com que o calor flua através dos agregados de tamanho menor. Portanto, a melhoria da distribuição espacial dos poros permite reduzir a condutividade

térmica. Várias partículas de LECA alongadas com largura entre 476 e 900  $\mu\text{m}$  podem ser vistas na Figura 29b). Em suma, existem dois tipos de contorno das partículas de LECA, um poroso e muito irregular e outro em mais liso e pulverulento. As partículas com o segundo tipo de contorno exibem uma superfície com várias ranhuras formadas pela ruptura entre os poros, e variaram de 1,12  $\mu\text{m}$  a 102  $\mu\text{m}$  (Figura 29d). Já a superfície predominantemente sulcada (Figura 29c) é importante para o concreto impresso em 3D porque aumenta a ancoragem nas interfaces do agregado e não absorve água, ao contrário de poros abertos e/ou vazios presentes neste tipo de superfície. O tamanho máximo dos poros também influencia a resistência mecânica, o ideal é que as partículas de LECA apresentem poros pequenos e bem distribuídos. Ao comprimir o concreto, os poros menores diminuem a concentração de tensão dentro do agregado, como afirma (REMESAR et al., 2020) com base nos resultados da tomografia computadorizada realizada com composições de LECA e cinza volante.

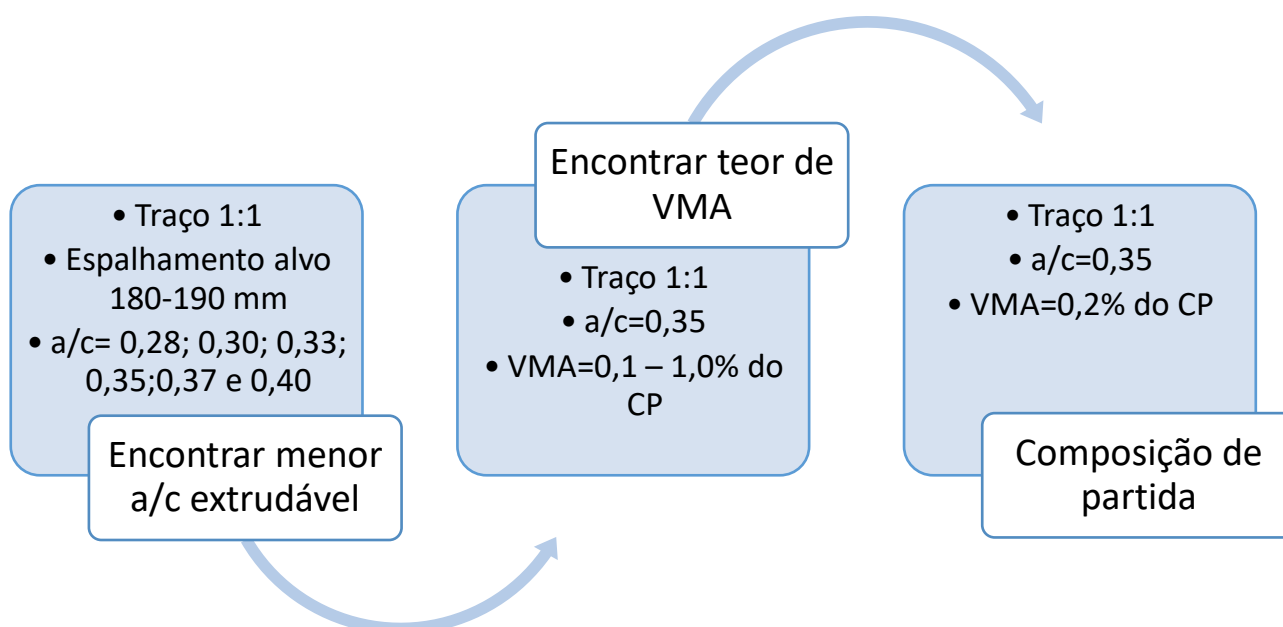
Bogas et al. (2012) mencionaram que a absorção de argamassas contendo diferentes tipos de LECA era maior para agregados mais porosos e que possuíam maior porcentagem de partículas quebradas. Isso é relevante, visto que a argila expandida na faixa inferior de 4,75 mm é composta predominantemente por aglomerados não peletizados e pedaços de pellets quebrados, comercializada como argila expandida laminada.

### **3.1.4 Estudos preliminares das formulações**

Com base na Tabela 1 buscou-se definir uma mistura de referência para servir de base ao planejamento de experimentos. Como relatado na revisão, altos teores de finos e altas relações a/b favorecem a coesão e extrudabilidade de materiais cimentícios, com isso o traço 1:1 foi definido como proporção de partida, a fim de combater a queda de resistência do compósito cimentício, visto que essa propriedade é inversamente proporcional a taxa de substituição de agregado convencional por agregado cerâmico, junto com relações a/c de 0,28 a 0,40 e teores de VMA de 0,1 a 1,0% (XU et al. 2022).

Tais valores foram escolhidos com o objetivo de encontrar uma formulação com espalhamento na faixa de 180 mm - 190 mm com 30 quedas na mesa de consistência em 30 segundos, baseado na metodologia utilizada por (SANJAYAN et al. 2018). Na Figura 30 é ilustrado o fluxograma de testes realizados a mesa de consistência e uma pistola de grauteamento ilustrada na Figura 31.

Figura 30 - Fluxograma de definição da composição base



A condição almejada era encontrar uma mistura de referência (R0) que apresentasse extrudabilidade com uma pistola de grauteamento e dispensasse o uso de aditivo superplastificante. Então a partir da mistura de referência, a composição seria modificada com alteração da relação  $a/b$  e teor de substituição do agregado areia pela argila expandida. O diâmetro de espalhamento das 11 misturas mais duas misturas de referência foram controladas com uso de superplastificante para se manter na faixa de  $185\text{mm} \pm 5\text{mm}$ .

O teste de mesa de fluxo é um método frequentemente usado para avaliar intuitivamente a trabalhabilidade de materiais cimentícios imprimíveis em 3D baseados em extrusão, que pode ser caracterizado pelo abatimento e diâmetro de fluxo do material (LU *et al.*, 2019). O teste de slump-flow é preferível em laboratórios e em campo principalmente devido à sua simplicidade e resultados imediatos e vem sendo amplamente usado na caracterização reológica dos materiais 3DCP (Ma *et al.* 2018; Weng *et al.*, 2018). Este método simples e padronizado vem sendo utilizado para determinar a capacidade de impressão das misturas antes da impressão 3D (TAY; QIAN; TAN, 2019).

Figura 31 - a)Espalhamento, b) extrusão com pistola, c)impressão da mistura R100 e d) detalhe da pistola usada na extrusão



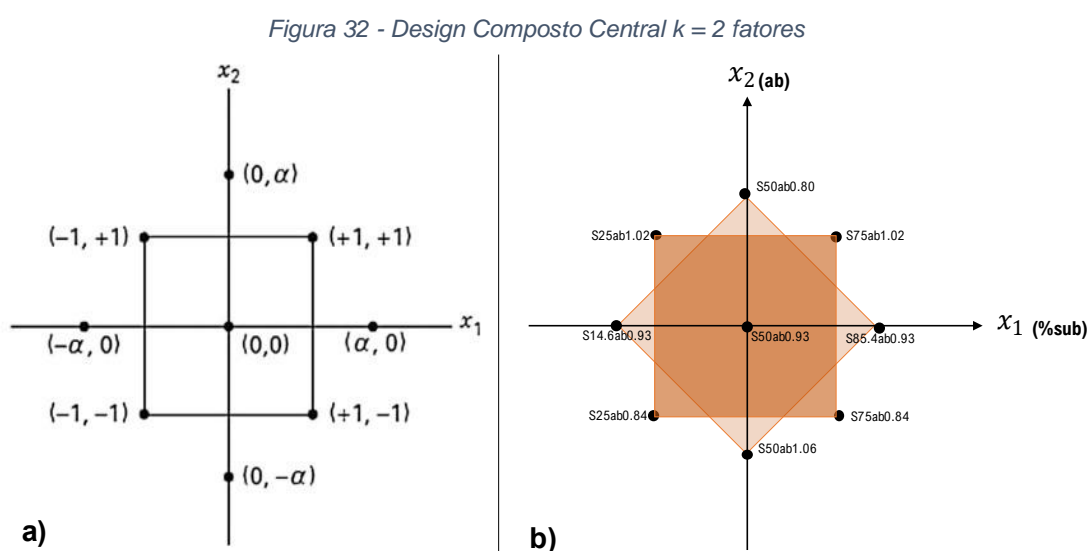
Tomando como referência os espalhamentos publicados por Ma et al. (2018), Lu et al. (2019), Papachristoforou et al. (2018) e Tay et al. (2019) , o range adequado para essa pesquisa foi considerado na faixa de 180-190 mm. Portanto, as misturas de referência foram submetidas a impressão para certificar se o range de 185mm ( $\pm 5$ mm), encontrado em laboratório com o teste da pistola de grauteamento tinha construtibilidade satisfatória. Na Figura 31-c) é ilustrado o espécime de 45cm impresso com a composição R100. Desta forma misturas com menos de 175 mm foram consideradas inadequadas para extrusão e misturas com mais de 192 mm apresentaram deformação excessiva das camadas devido a fluidez.

### 3.1.5 Formulações e planejamento de experimentos

Os valores de partida das formulações do compósito para impressão foram baseados numa revisão da composição dos materiais extrudáveis a bases de cimento Portland e consiste num planejamento de experimentos do tipo *Design Composto Central* (DCC)  $2^n$ , com  $n=2$  fatores ( $x_1, x_2$ ), Para um DCC fatorial completo cada fator experimental de

interesse tem 5 níveis codificados ( $-\alpha$ ,  $-1$ ,  $0$ ,  $+1$ ,  $+\alpha$ ), correspondendo a dois pontos axiais ( $-\alpha, +\alpha$ ), dois pontos fatoriais ( $-1, +1$ ) e um ponto central ( $0$ ), vide Figura 32 a). No DCC, os dados de resposta medidos experimentalmente são analisados para desenvolver um modelo quadrático capaz de prever uma resposta ( $y$  DCC) quando fornecidos com valores dos fatores de interesse (SARILAK *et al.*, 2020).

Os fatores experimentais de interesse deste estudo ( $x_1$ ,  $x_2$ ) são “a/b” (relação agregado miúdo sobre ligantes) e “%sub” (substituição da areia por LECA feita em volume). A Tabela 7 e Figura 32 apresentam os fatores juntamente com níveis experimentais reais e codificados. Os percentuais de substituição 14,6% e 85,4% vêm do planejamento DCCR e correspondem aos níveis axiais  $-1,414$  e  $+1,414$ . As relações de agregado miúdo sobre ligantes (“a/b”) em peso foram de 0,80, 0,84, 0,93, 1,02 e 1,06. Em cada proporção de “a/b”, a substituição da areia pela LECA foi feita em volume devido à diferença de densidades, com base no volume original do agregado de referência em cada proporção.



Fonte: adaptado (ZHANG; YUE, 2018)

Tabela 7- Níveis e fatores do programa experimental

Fatores experimentais		Níveis				
Nome	Variável/Descrição	-1.414	-1	0	1	+1.414
%sub	x1 -percentual de substituição da areia por LECA em volume	14.6%	25%	50%	75%	85.4%
a/b	x2- relação agregado sobre ligantes de referência	0.80	0.84	0.93	1.02	1.06

A combinação dos níveis experimentais num planejamento composto central rotacionado (DCCR) gerou um conjunto de 11 misturas, no qual, 3 são pontos centrais,

além de mais 2 misturas de referência contendo 0% e 100% de substituição de areia por LECA (Tabela 8), totalizando 13 misturas. Com vistas a obter uma matriz cimentícia e resistência à compressão semelhantes as composições analisadas foram formuladas com a mesma relação água/cimento (a/c) igual a 0,35. O teor de plastificante foi dosado com base na fixação do espalhamento ( $185 \pm 5$  mm) da mistura através do Teste da mesa de fluxo (*flow table*), conforme (ZHANG, Y. *et al.*, 2019), descrito no tópico de Métodos.

Tabela 8 - Composição de misturas e propriedades no estado fresco

N°	Mix	Traço em volume					Traço em massa					Estado fresco		
		CP	Agregado				CP	Agregado				a/c=0,35	Consumo CP	Spread
Código	CP	SAND	LECA	%Sub	a/b	CP	SAND	LECA	a/secos	%Sub	a/b	(kg/m <sup>3</sup> )	(mm)	
N1	S25ab0.84	1.00	0.63	0.21	25.0	0.84	1.00	0.68	0.13	0.19	16.2	0.81	1004	185.0
N2	S75ab0.84	1.00	0.21	0.63	75.0	0.84	1.00	0.23	0.39	0.22	63.5	0.62	1050	183.9
N3	S25ab1.02	1.00	0.77	0.26	25.0	1.02	1.00	0.83	0.16	0.18	16.2	0.98	936	183.0
N4	S75ab1.02	1.00	0.26	0.77	75.0	1.02	1.00	0.28	0.48	0.20	63.5	0.75	985	184.0
N5	S50ab0.80	1.00	0.40	0.40	50.0	0.80	1.00	0.43	0.25	0.21	36.7	0.68	1041	184.6
N6	S50ab1.06	1.00	0.53	0.53	50.0	1.06	1.00	0.57	0.33	0.18	36.7	0.90	947	182.4
N7	S14.6ab0.93	1.00	0.79	0.14	14.6	0.93	1.00	0.85	0.08	0.18	9.0	0.94	959	185.0
N8	S85.4ab0.93	1.00	0.14	0.79	85.4	0.93	1.00	0.15	0.49	0.21	77.1	0.64	1027	183.9
N9	S50ab0.93	1.00	0.46	0.46	50.0	0.93	1.00	0.50	0.29	0.20	36.7	0.79	992	182.8
N10	S50ab0.93	1.00	0.46	0.46	50.0	0.93	1.00	0.50	0.29	0.20	36.7	0.79	992	183.0
N11	S50ab0.93	1.00	0.46	0.46	50.0	0.93	1.00	0.50	0.29	0.20	36.7	0.79	992	181.9
R0	S0ab0.93	1.00	0.93	0.00	0.0	0.93	1.00	1.00	0.00	0.18	0.0	1.00	946	186.3
R100	S100ab0.93	1.00	0.00	0.93	100.0	0.93	1.00	0.00	0.58	0.22	100.0	0.58	1041	185.1

A Tabela 8 traz os traços em massa e volume, juntamente com os valores de slump e espalhamento encontrados. O fator água/cimento (a/c) foi padronizado em 0,35 para todas as misturas. A definição do traço no planejamento partiu de uma proporção em massa 1:1, e posteriormente foi transformado para traço em volume, de modo a manter o mesmo volume de partículas em face da diferença de densidade dos agregados (RAHUL *et al.*, 2019). Ainda da Tabela 8, temos a relação água sobre secos (a/secos) que traduz a proporção de água em função da massa dos materiais secos (aglomerantes e agregados).

### 3.1.6 Análises estatísticas

Os resultados foram avaliados em um programa de estatística tomando como base os seguintes conceitos. A ANOVA (análise de variância) foi considerada ao nível de significância de 5% ( $\delta$ ) e teve como hipótese nula (H) a equivalência dos tratamentos. Na

ANOVA o valor P (probabilidade P) abaixo do nível de significância (0,05) implica rejeitar H<sub>0</sub> (pelo menos uma média difere das demais), aceitando-se de outra forma (média equivalente). Se os fatores de interação por ANOVA para alguma das propriedades avaliadas foram considerados significativos, então serão adotados os gráficos de interação entre os fatores. O teste de Tukey foi utilizado para avaliar a significância dos fatores (isoladamente). Foram utilizados gráficos de superfície de resposta que traduzem a equação obtida com os fatores significativos. (TEIXEIRA *et al.*, 2019).

### **3.1.7 Metodologia de mistura e moldagem dos espécimes fundidos**

Para produção das compósitos foi utilizado um misturador com capacidade de 5 litros seguindo procedimento baseado na norma NBR 13279 (ABNT, 2005). O processo de mistura consistiu nas seguintes etapas: 1) homogeneização dos materiais secos (cimento, areia, LECA e celulose) por 2 minutos; 2) introdução de  $\frac{3}{4}$  da mistura de água com o superplastificante previamente diluído na mesma durante um minuto e meio na velocidade baixa; 3) mistura por mais dois minutos na velocidade alta; 4) as paredes da cuba foram raspadas e recebeu o restante do líquido, por fim o material foi misturado em velocidade alta por 4 min, visando diminuir a quantidade de água absorvida pela argila expandida.

A investigação dos resultados de *slump* e espalhamento obtido no aparato *Flow table* foram usados para padronizar a capacidade de construção das misturas. As misturas quando não eram submetidas imediatamente a ensaio no estado fresco eram despejadas em moldes prismáticos de 40 x 40 x 160 mm e compactadas com haste compactadora e mesa de adensamento manual. Os corpos-de-prova foram desmoldados 24 horas após a moldagem e deixados em câmara úmida a 95% de umidade relativa e 20 ° C até a idade de ensaio. Tal moldagem tem a intenção de comparar dados, baseado na metodologia de estudos semelhantes (DAUNGWILAILUK; PHEINSUSOM; PANSUK, 2021; NERELLA; HEMPEL; MECHTCHERINE, 2019). Como exemplo, Liu *et al.* (2021) compararam o efeito das fibras de carbono e basalto na resistência dos espécimes impressos e moldados. E relataram que a resistência a tração na flexão dos espécimes reforçados fibra impressos são de 6-25% menores do que dos espécimes fundidos. Tal comparação permite quantificar o decréscimo no desempenho mecânico e físico devido aos vazios intercamadas inerentes do processo de impressão 3D.

### **3.1.8 Metodologia de mistura dos espécimes impressos**

Devido às limitações de equipamentos, foi necessário realizar dois tipos de mistura além de dois tipos de conformação das peças. O material usado na impressora foi misturado diferente do material fundido em virtude da quantidade de material necessário para a fabricação do bloco, cerca de 20 litros, não permitir o uso de várias argamassadas menores. A mistura foi feita com um batedor de argamassa/gesso/tinta modelo R6219B3S-DP com velocidade de 180 a 750 rpm em recipiente de 30 litros Figura 33. A homogeneização dos secos foi feita em um misturador de secos tipo Y, e os demais procedimentos foram semelhantes ao do item 3.2.5.

*Figura 33 - homogeneização dos materiais secos e mistura para alimentar impressora*



### **3.1.9 Densidade de Massa no Estado Fresco e teor de ar incorporado**

Os ensaios de densidade de massa e teor de ar incorporado foram feitos com as composições fundidas, nos primeiros minutos após o decorrer de 10 minutos de mistura dos materiais na argamassadeira normatizada. Utilizou-se recipiente rígido, cilíndrico, de material não absorvente, com capacidade aproximada de 400 cm<sup>3</sup>. O procedimento experimental para o desenvolvimento deste ensaio está descrito na norma NBR 13278 (ABNT, 2005). Imediatamente após o preparo da composição, foi introduzido porções da mistura no recipiente cilíndrico calibrado de modo a formar três camadas de alturas aproximadamente iguais. Em cada camada, foi aplicado 20 golpes ao longo do perímetro do recipiente. Após a execução e golpeamento de cada camada, foi efetuado três quedas do recipiente com altura aproximada de 3 cm. Após a pesagem das massas necessárias, a densidade de massa pode ser calculada pela Equação 1.

Equação 1 - Densidade de massa

$$d = \frac{m_c - m_v}{v_r} \quad (1)$$

- $m_c$  é a massa do recipiente cilíndrico contendo a argamassa de ensaio, em gramas;
- $m_v$  é a massa do recipiente cilíndrico vazio, em gramas;
- $v_r$  é o volume do recipiente cilíndrico, em centímetros cúbicos.

Após essa etapa, com auxílio de planilha de dados, pode-se calcular o teor de ar incorporado de cada composição pela Equação 2 e com auxílio da Equação 3.

Equação 2 - teor de ar incorporado

$$A = 100 \left( 1 - \frac{d}{d_t} \right) \quad (2)$$

Onde:

- $d$  é o valor da densidade de massa da argamassa, em gramas por centímetro cúbico, conforme equação 1;
- $d_t$  é o valor da densidade de massa teórica da argamassa, em gramas por centímetro cúbico, sem vazios.

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{\gamma_i}} \quad (3)$$

$m_i$  é a massa seca de cada componente da argamassa, mais a massa da água;  
 $\gamma_i$  é a massa específica de cada componente da argamassa.

Essa metodologia também denominada Método Gravimétrico (ASTM C138), determina o volume de ar comparando o peso unitário medido do concreto e o peso unitário teórico. A diferença percentual entre estes dois é atribuída ao teor de ar na mistura. O peso unitário medido é encontrado enchendo e consolidando concreto dentro de uma tigela de volume conhecido. A massa é determinada e depois dividida pelo volume conhecido da tigela para obter o peso unitário medido. O peso unitário teórico é encontrado registrando a massa e gravidades específicas de todos os ingredientes e, em seguida, calculando o volume teórico. A massa medida dividida pelo volume teórico dará uma estimativa do peso unitário. Uma correção deve ser feita para o teor de umidade real dos agregados em comparação com o que é assumido no projeto da mistura. O Método Gravimétrico é uma ferramenta laboratorial útil para avaliar o volume de ar no concreto (TUNSTALL; LEY; SCHERER, 2021).

### 3.1.9.1 Procedimento: Trabalhabilidade com ensaio da mesa de consistência

A trabalhabilidade do material 3DCP foi avaliada pelo slump com molde troncocônico (125x80x65mm) que precede a medição do índice de consistência da argamassa utilizando a mesa de consistência (NBR 13276, 2016), e pelo espalhamento (em mm) do material resultante da aplicação de 30 quedas em 30 segundos padronizadas.

O estudo de Soltan, Li, os pesquisadores utilizaram o teste de flow table para medir o que ele chamou de “o fator de fluidez” das composições cimentícias ao longo do tempo (após a mistura ser interrompida) para gerar uma curva de "evolução da fluidez" , fornecendo um método conveniente para descrever a mudança na trabalhabilidade ao longo dos intervalos de tempo relevantes para a impressão 3D. O range utilizado foi 0 a 90 min com medições a cada 20 minutos (SOLTAN; LI, 2018; SOLTANZADEH *et al.* 2018).

Neste trabalho, a trabalhabilidade é avaliada quantitativamente através do teste da mesa de queda, fornecendo um método conveniente de avaliar a mudança na trabalhabilidade ao longo de intervalos de tempo relevantes para materiais de concreto de impressão 3D, e a simplicidade deste método de avaliar a capacidade de bombeamento e extrusão de alta tixotropia Impressão 3D de materiais de concreto ao longo do tempo (ZHANG, Y. *et al.*, 2019)

O procedimento de teste de slump começa preenchendo um terço do molde com argamassa e posterior aplicação de 15 golpes uniformemente distribuído sobre a seção transversal da argamassa. Em seguida mais um terço e adicionado, recebendo 10 golpes e por último, é adicionado argamassa até a borda do molde sendo compactado com 5 golpes. O excesso de material é removido desenhando a borda com uma espátula em um movimento de serra. Posteriormente, o molde é removido e a diferença na altura é registrada como o valor de slump (Figura 34a). A Figura 34 mostra a configuração do teste de slump e slump flow, conforme a especificação da norma NBR 13276 (ABNT, 2016). Após a remoção do molde, a mesa de fluxo recebe 30 golpes e o diâmetro do compósito é registrado como a média de três medições do diâmetro. Os valores de slump e slump-flow da mistura de referência será estabelecido e as demais misturas serão dosadas com aditivo SP para manterem a faixa de espalhamento.

Os valores de slump e slump-flow para as diferentes misturas serão mapeados para determinar o intervalo em que o material se encontra na região adequada para impressão. O mapeamento dos valores para as diferentes misturas ao longo de 0, 30, 50, 70 e min

serão úteis para compreender a influência das substituições no comportamento do material ao longo do tempo.

*Figura 34 - Configuração experimental do teste de vazão (a) antes da remoção do molde (b) a dispersão do material após deixar a mesa cair 25 vezes.*



A seguir, baseado na metodologia de (MOEINI; HOSSEINPOOR; YAHIA, 2022a), um ensaio de compressão uniaxial foi desenvolvido para quantificar as propriedades frescas das argamassas.

### **3.1.10 Squeeze-flow**

A reometria dos materiais foi realizada conforme norma NBR 15839 (ABNT, 2015). Foram ensaiadas uma amostra de cada mistura com configuração geométrica de *10 mm de altura e 101 mm de diâmetro*. O ensaio consiste na compressão de uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas (Figura 35).

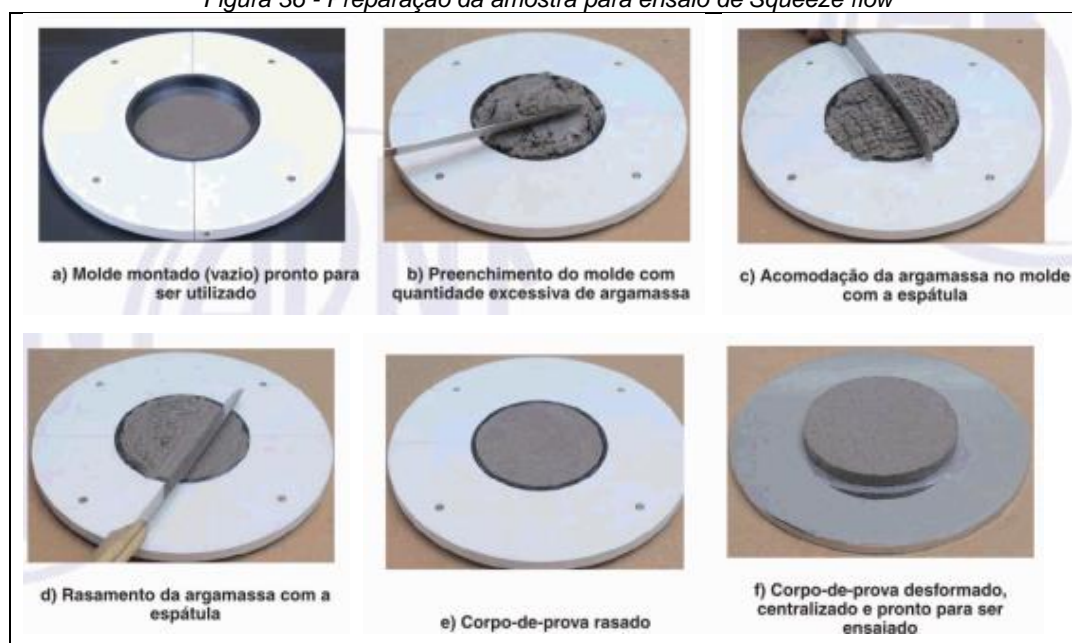
*Figura 35 - Ilustração do ensaio de compressão no estado fresco*





Amostras do mesmo lote são fundidas imediatamente após a mistura (Figura 36). Após a fundição a densidade aparente e o teor de ar devem ser determinados pelo método gravimétrico descrito na norma brasileira NBR 13278 (ABNT, 2005).

Figura 36 - Preparação da amostra para ensaio de Squeeze flow



Fonte: NBR 15839 (ABNT, 2015)

Os testes de fluxo de compressão foram realizados, 15 e 60 minutos após a mistura, em uma máquina de teste universal (Shimadzu 5569) usando uma célula de carga de 300 kN. As ferramentas superior e inferior utilizadas nos testes foram chapas de aço polido com 100 mm e 200 mm de diâmetro, respectivamente (Figura 30). O programa de deslocamento consistiu em comprimir a amostra a velocidade de 0,1 mm/s até um deslocamento máximo de 7,5 mm ou até a carga máxima de 1kN.

As amostras de 100 de diâmetro e 10mm de altura foram ensaiadas 15 e 60 minutos após a mistura com velocidade de 0,1mm/s e deslocamento máximo de 8,0mm NBR 15839 (ABNT, 2010), o deslocamento máximo de 9mm não foi atingido pois a maior parte das misturas atingiam cargas próximas de 1000N rapidamente (estágio III), e apresentam

rigidez superior quando comparada com as argamassas de revestimento objeto da norma NBR 15839. A redução do deslocamento máximo não altera o estudo pois foi possível obter o comportamento dos materiais durante os 3 estágios de deformação.

Em alguns casos, como citado por Nicolini *et al.* (2021), a transição entre os estágios I e II não foi clara em algumas amostras, comprometendo a determinação da tensão de escoamento. Nesses casos, um método alternativo é calcular a tensão de escoamento dividindo a carga em um deslocamento específico pela área da placa superior. Aqui, a tensão de escoamento assumida para comparação foi a tensão (carga/área da placa superior) em 0,5 mm de deslocamento, conforme usado por Cardoso *et al.* (2009b).

### 3.1.10.1 Viscosidade

Para a análise das misturas para impressão 3D, a viscosidade foi estimada de acordo com a metodologia descrita conforme metodologia de Cardoso *et al.* (2014) e Nicolini *et al.* (2021). Como a condição de contorno foi definida como uma interface de deslizamento perfeito devido ao uso de placas metálicas lisas, foi assumido um modelo extensional biaxial (CARDOSO, F.A. *et al.*, 2014; TOUTOU; ROUSSEL; LANOS, 2005). A taxa de deformação extensional biaxial ou taxa de deformação ( $\varepsilon_B$ ) foi tomada como igual a metade da taxa de deformação vertical de Hencky ( $\varepsilon_H$ ) como mostrado na equação (1) (NICOLINI *et al.*, 2021a).

$$\varepsilon_B = \frac{\varepsilon_H}{2} = \frac{v}{2h} \quad (1)$$

Onde:  $h$  é a altura instantânea da amostra, e  $v$  é a velocidade de deslocamento da placa superior.

A viscosidade ( $\eta_B$ ) é obtido dividindo-se a tensão ( $\sigma_B$ ), que é a carga de Compressão dividida pela área da placa superior, pela taxa de deformação, conforme mostrado na Eq. (2) (CARDOSO, F.A. *et al.*, 2014; NICOLINI *et al.*, 2021a)

$$\eta_B = \frac{\sigma_B}{\varepsilon_B} = 2L \left( \frac{(h_0 - vt)}{v\pi R^2} \right) \quad (2)$$

onde  $L$  é a carga,  $h_0$  é a altura inicial e  $R$  é o raio da amostra.

### 3.1.11 Tensão de escoamento

Segundo Engmann *et al.* (2005), a tensão de escoamento pode ser determinada pela extrapolação das curvas de carga vs. deslocamento. A transição entre os dois estágios é definida com base na interseção das extrapolações lineares dos estágios I e II, e a tensão de escoamento é calculada dividindo a carga de compressão neste ponto pela área da placa superior.

É possível realizar a determinação indireta da tensão de escoamento pela extrapolação das curvas carga versus deslocamento. Nos ensaios de squeeze-flow, a tensão de escoamento pode ser considerada como o ponto onde ocorre a transição do estágio de deformação elástica linear (Estágio I) para o estágio de escoamento viscoso (Estágio II) na curva carga x deslocamento. A tensão de escoamento é calculada dividindo a carga de compressão pela área da placa superior (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009a; ENGMANN; SERVAIS; BURBIDGE, 2005). Na impossibilidade de se distinguir a transição do Estágio I para o II, Cardoso *et al.* (2014) e Nicolini *et al.* (2021) reportam um método alternativo, que consiste em calcular a tensão de escoamento dividindo a carga em um deslocamento específico pela área da placa superior. A tensão de escoamento assumida para comparação foi a tensão (carga/área da placa superior) a 0,5 mm de deslocamento.

### 3.1.12 Condições de impressão

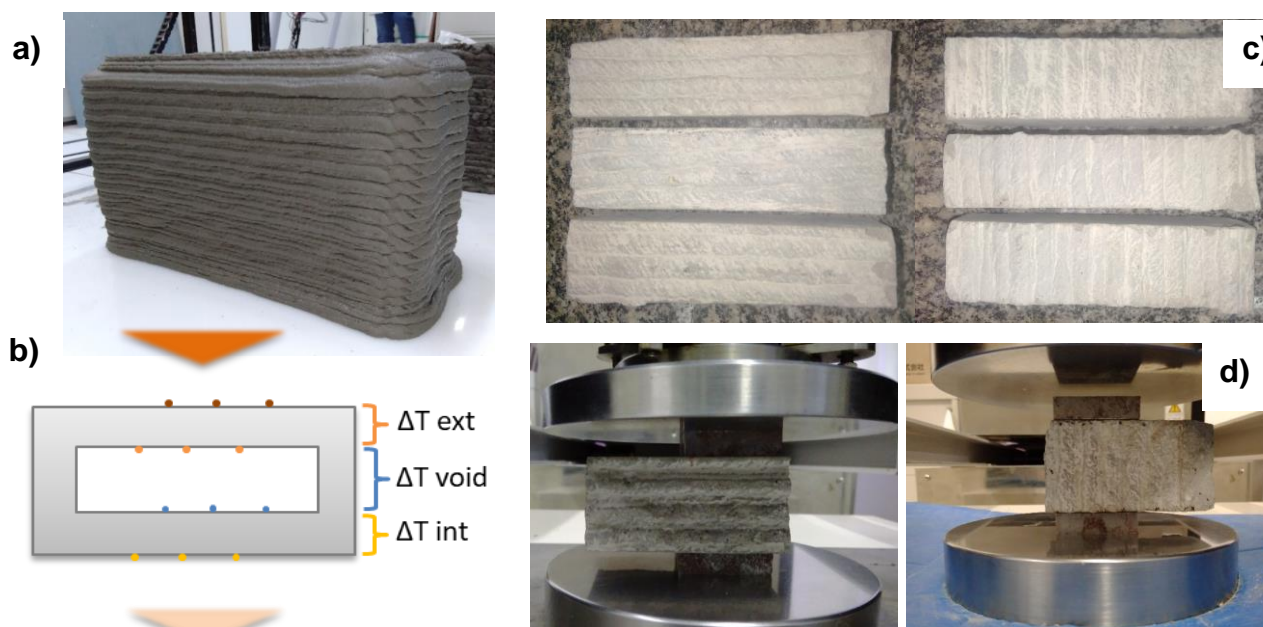
A impressão das amostras foi auxiliada pela instalação de uma impressora 3DCP em parceria com a empresa 3D Home Construction. Para bombear o material foi utilizado um motor de 5 Cv de potência acoplado a um inversor de frequência que levava o material por uma mangueira plástica de 19 mm de diâmetro até a cabeça de impressão. A impressora tipo pórtico tinha área de impressão de 100 cm x 100 cm por 50 cm de altura e movimento dos eixos nas 3 direções era controlado por motores de passo e um software de impressão que depositava o material a uma taxa de 60 mm/s.

### 3.1.13 Ensaios no estado endurecido

O primeiro lote de amostras, contendo 11 composições (N1 a N11) + duas de referência (R0 e R100) consistiam em amostras fundidas (moldadas) que foram fabricadas e testadas, para fins de referência. Elas foram moldadas em prismas de argamassa padrão de 40 x 40 x 160 mm e considerados direcionalmente independentes (WOLFS; BOS; SALET, 2019). Para medir as propriedades físicas e mecânicas do compósito moldado e impresso foi usado a norma NBR 13279 (ABNT, 2005) como referência para moldar e romper os corpos de prova do primeiro lote.

O segundo lote de amostras consistia em composições escolhidas com base na análise estatística dos resultados obtidos para as 13 composições do primeiro lote. Tais composições foram então impressas em formato de bloco, medindo de 380 x 150 x 160 mm, e posteriormente serradas de modo a obter espécimes de 40 x 40 x 160 mm seguindo a metodologia de trabalhos anteriores (NERELLA; HEMPEL; MECHTCHERINE, 2019; WOLFS; BOS; SALET, 2019). Na Figura 37-a) está ilustrado um bloco obtido.

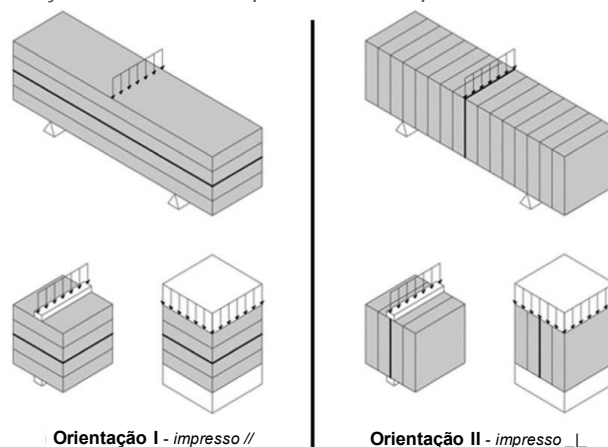
Figura 37- a) prisma impresso; b) esquema do ensaio de atraso térmico; c) ilustração dos espécimes extraídos e d) representação do ensaio de compressão



Essas amostras foram impressas com um tempo de intervalo entre camadas de 17,7 s, ou seja, todas as amostras foram impressas em um processo contínuo, sendo esse o tempo necessário para deposição dos 1060mm de perímetro de cada camada. Os corpos de prova impressos foram considerados direcionalmente dependentes, sendo avaliados

com relação ao efeito da direção do carregamento em relação à orientação da camada. As duas orientações, mutuamente perpendiculares relacionadas ao processo de impressão, foram nomeadas como *impresso //* e *impresso \_L*, conforme Figura 38.

Figura 38 - Orientações de camada impressas em 3D para os testes físicos e mecânicos



Fonte: Adaptado (WOLFS; BOS; SALET, 2019).

### 3.1.14 Absorção, porosidade e módulo de elasticidade

Conforme a NBR 9778 (ABNT, 2012), os testes de absorção de água e índice de vazios foram realizados para as amostras moldadas e para as amostras extraídas de um bloco impresso. Foram ensaiados três corpos de prova para cada mistura aos 28 dias de idade. O procedimento de teste inclui a secagem em estufa das amostras a 105 °C por 72 h para medir o peso seco; submergir as amostras em água por 72 h e fervê-las por 4 h para obtenção do peso saturado; e subsequentemente pesagem hidrostática das amostras (MENDES *et al.*, 2020a). A medição do módulo de elasticidade ocorreu aos 100 dias apenas para os espécimes moldados. Todos os ensaios foram feitos na condição seca (estufa à 100° por 24h).

### 3.1.15 Propriedades térmicas com amostras fundidas

Um analisador de propriedades térmicas KD2 Pro com o sensor de agulha dupla foi usado para medir condutividade térmica (K), resistividade(R), capacidade calorífica específica volumétrica (C) e difusividade (D) das amostras fundidas, apenas. Foram moldados três corpos de prova de 2,5 x 5,0 cm para realização das análises. Antes das datas previstas para o ensaio os corpos de provas eram secos em estufa a 100° por 24h, de modo a reduzir ao máximo o teor de água livre de todos os corpos de prova, uma vez

que o teor de umidade influencia fortemente a condutividade térmica, sem interferir na estrutura dos poros das argamassas.

Figura 39-analisador de propriedades térmicas KD2 Pro com o sensor de agulha dupla



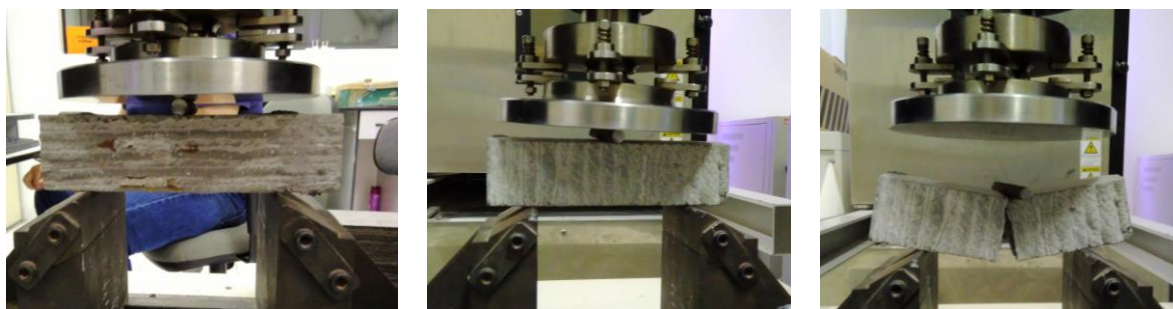
As propriedades térmicas foram modeladas em função das variáveis independentes, “a/b” e “%sub”. O modelo matemático incluiu apenas fatores com nível de significância de  $\geq 95\%$  (valor  $p \leq 0,05$ ) (ZHANG; YUE, 2018). Após observar o comportamento das misturas, as superfícies de resposta foram avaliadas para escolher as misturas ideais em termos de propriedades térmicas que proporcionam baixos valores de condutividade térmica, calor específico e difusividade. Assim, duas misturas ótimas N2 (S75ab0,84) e N8 (S85,4 ab0,93), e mais uma mistura de referência (S0ab0,93) foram selecionadas para serem impressas e ter suas propriedades em comparação com as dos espécimes fundidos.

### **3.1.16 Resistência a tração na flexão, compressão**

Juntamente com as amostras fundidas, as amostras impressas foram submetidas a testes de tração na flexão (3 pontos), ilustrado na Figura 40, e compressão, em duas orientações relacionadas ao processo de impressão, I, II ( Figura 38), obtidos após extração de amostras medindo 40x40x160 mm de um bloco impresso.

A resistência à tração na flexão e à compressão das composições foi determinada para o primeiro lote nas idades de 7 e 28 e 120 dias, enquanto para o os espécimes do segundo lote (impressos), o ensaio foi realizado apenas aos 28 dias. Na Figura 40 é ilustrado a adaptação para o teste de flexão em virtude de falta de horizontalidade entre superfícies serradas.

Figura 40 - Configuração do ensaio de flexão: a-b) carregamento perpendicular e paralelo as camadas; c) rompimento entre camadas no ensaio



Os espécimes extraídos do bloco foram testados na direção paralela e perpendicular as camadas em função da anisotropia que esta conformação proporcionar ao corpo de prova. Os ensaios foram realizados conforme procedimento da norma NBR 13279 (ABNT, 2005). Para o ensaio de flexão foi usado carregamento constante a uma taxa de 50 N/s e 500 N/s para os espécimes testados em compressão uniaxial. a Figura 40c ilustra o modo de ruptura da aplicação de carregamento paralelo a direção das camadas, usado para determinar a resistência de adesão indiretamente.

### **3.1.17 Modelagem dos resultados com base no planejamento experimentais**

Para fornecer novas informações neste assunto, este trabalho visa fornecer modelos matemáticos para calcular as propriedades térmica em função da temperatura com base nos resultados experimentais obtidos. Onze composições de concreto para impressão 3d foram testadas usando cimento Portland e substituição gradual de agregado natural por leve. As fórmulas para as propriedades foram obtidas através de um planejamento composto central e estão descritas abaixo.

Após observar o comportamento das misturas, foi avaliado os modelos de regressão a fim de se definir as melhores misturas. Para isso é avaliado o coeficiente de correlação das respostas que demonstram excelente correspondência com o modelo, onde se pode considerar que pelo menos 95% dos valores medidos podem ser contabilizados com os modelos propostos (LOTFY; HOSSAIN; LACHEMI, 2014).

## **3.2 Caracterização das composições fundidas**

As misturas foram moldadas em moldes prismáticos de 40 x 40 x 160 mm e compactadas com haste em mesa de densificação manual. Os corpos-de-prova foram desmoldados após 24 horas e deixados em câmara úmida com umidade relativa de 95% e

20 ° C até a idade de teste. Para medir a resistência mecânica dos compósitos moldados e impressos, a norma NBR 13279 (ABNT, 2005) foi utilizada como referência para moldagem e ruptura dos corpos-de-prova. Foram realizados ensaios para medir a massa específica aparente e real, absorção de água, índice de vazios, módulo de elasticidade, resistência à compressão e tração na flexão.

Os testes de absorção de água e índice de vazios foram realizados de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005), equivalente à ASTM C642, com amostras adaptadas. O procedimento de teste inclui a secagem em estufa das amostras a 105 ° C por 72 h para medir seu peso seco; submergir as amostras em água por 72 h e fervê-las por 5 h para obter o peso saturado; e, subsequentemente, pesagem hidrostática das amostras (SIAMARDI, 2022a). Os ensaios de módulo de elasticidade e térmicos foram realizados em ambiente seco (estufa a 105 ° C por 24h).

Corpos de prova de 25 x 50 mm foram moldados para realização das análises térmicas. Um analisador térmico KD2 Pro com sensor de agulha dupla foi usado para medir a condutividade térmica (K), resistividade (R), capacidade volumétrica específica de calor (C) e difusividade (D). Antes do teste, os corpos-de-prova foram secos em estufa a 105 ° C por 24 horas, uma vez que a umidade influencia diretamente na condutividade térmica do material.

As propriedades térmicas foram modeladas em função das variáveis independentes, “a / b” e “% sub”. O modelo matemático incluiu apenas fatores com nível de significância  $\geq 95\%$  ( $p\text{-valor} \leq 0,05$ ) (MENDES *et al.*, 2020a). Após observar o comportamento das misturas, as superfícies de resposta foram avaliadas para escolher as misturas ótimas em termos de propriedades térmicas que proporcionam baixos valores de condutividade térmica, calor específico e difusividade. Assim, duas misturas ideais N2 (S75ab0,84) e N8 (S85,4ab0,93), e mais uma mistura de referência (S0ab0,93) foram selecionadas para serem impressas e para têm suas propriedades comparadas com as dos corpos de prova fundidos.

### 3.3 Caracterização de composições 3DCP

Os ensaios físicos e mecânicos foram realizados em amostras fundidas e posteriormente em amostras impressas (40 x 40 x 160 mm) obtidas pelo corte de um bloco impresso 3D vazado medindo 380 x 150 x 160 mm e possuindo 40 mm de espessura (Fig. 3). A impressão foi realizada com motor de 5 HP acoplado a inversor de frequência para

transportar o material por meio de uma mangueira plástica de 19 mm de diâmetro até o cabeçote de impressão. A configuração tinha uma área de impressão de 1000 x 1000 mm por 500 mm de altura. O movimento dos eixos em 3 direções era controlado por motores de passo. Um software de impressão controlava a deposição do material a uma taxa de 60 mm/s. As propriedades no estado endurecido refletem o controle dos parâmetros de impressão 3D. Por esse motivo, corpos-de-prova moldados e impressos foram testados para avaliar as alterações nas propriedades causadas por diferentes processamentos. Foram realizados ensaios para medir a massa específica aparente e real, absorção de água, índice de vazios, resistência à compressão e tração na flexão.

Os ensaios mecânicos foram realizados em corpos de prova moldados conforme a NBR 13281 (ABNT, 2005) e em corpos de prova cortados de um bloco impresso (Figura 3) para comparar a diferença de resistência. Os espécimes foram testados em dois casos diferentes seguindo a metodologia de ], ou seja, carregamento perpendicular à deposição de camadas, rotulado como “\_|\_”, e carregamento paralelo às interfaces, rotulado como “//”. Os espécimes “\_|\_” foram removidos ao longo do perímetro do bloco de teste, que consistia em 16 camadas, cada uma com 1 cm de espessura. Os espécimes // foram removidos de diferentes alturas do bloco. Cada amostra tinha 4 camadas de altura. Nesta configuração, os // espécimes foram cortados horizontalmente ao longo das camadas, enquanto as amostras “\_|\_” foram extraídas verticalmente, através das camadas. As dimensões das amostras de prismas cortados por serra eram 40 x 40 x 160 mm. O comprimento dos corpos de prova para os ensaios de flexão foi de 100 mm. Os testes de resistência à compressão foram realizados em metades de amostras prismáticas resultantes de amostras testadas nos testes de flexão.

Testes mecânicos foram realizados em espécimes moldados conforme a NBR 13281 (ABNT, 2005) e em espécimes que foram cortados a partir de bloco impresso; veja a Figura 23 e Figura 19, com vistas a comparar a diferença de resistência. Os corpos de prova foram testados em dois casos diferentes seguindo a metodologia de Nerella (NERELLA; HEMPEL; MECHTCHERINE, 2019): a) carregamento perpendicular, abreviação \_|\_ , para o plano de interface de camada e b) paralelamente a interfaces, abreviação //.

Nesta pesquisa, os espécimes para \_|\_ foram retirados das ao logo do perímetro do bloco protótipo, tal bloco era composto de 18 camada com 1 cm cada. Enquanto espécimes // foram retirados de diferentes alturas da parede do bloco protótipo, ficando cada espécime, com altura de 4 camadas. camadas; nessa configuração //, os espécimes foram cortados

horizontalmente "ao longo das camadas" enquanto para os casos \_|\_ foram extraídos verticalmente, "através das camadas".

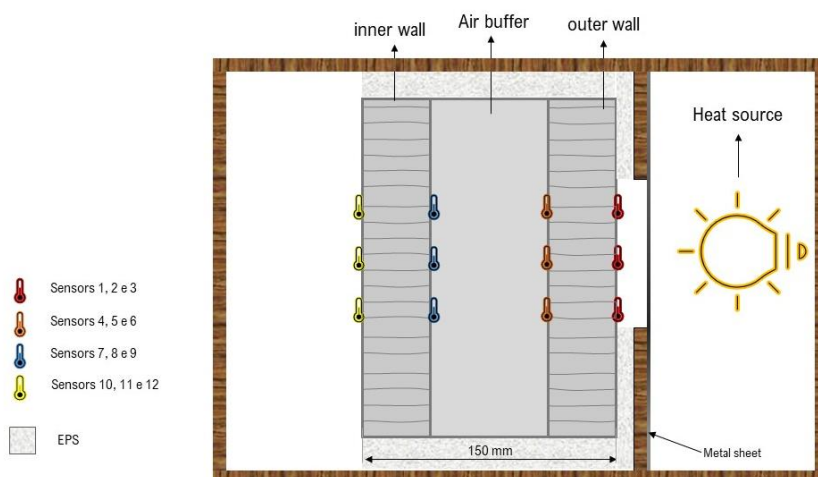
As resistências à compressão e à flexão foram medidas de acordo com a norma NBR 13281 (ABNT, 2005). as dimensões das amostras de prisma de corte de serra foram de 160 mm x 40 mm x 40 mm. A extensão dos espécimes para os testes de flexão foi de 100 mm. Testes de compressão foram realizados nas metades de prisma resultantes de amostras testadas nos testes de flexão.

### 3.4 Simulação de atraso térmico de blocos impressos

Para simular o atraso térmico fornecido ao sistema de vedação pelas misturas N2, N8 e R0, blocos de 40 mm de espessura medindo 380 x 150 x 160 mm foram impressos a 60 mm / s na impressora 3D de concreto (Figura 37). Após cura de 28 dias, os blocos foram secos em estufa industrial por 24h a 100 ° C e a transmitância térmica foi determinada pela adaptação do método da caixa quente protegida da NBR 6488, calculada pela NBR 15220-2 (ABNT 2005). Para a interpretação dos resultados, foram plotados os valores de isolamento de cada elemento do componente.

Os testes de atraso térmico consistiram em expor as amostras de blocos ilustradas na Figura 41 a uma fonte de calor de 250 W por 3 horas. A amostra é oca e consiste em três elementos perpendiculares à fonte de calor, ou seja, uma parede externa e uma interna, ambas com 40 mm de espessura e uma câmara de ar com 70 mm de espessura. Um conjunto de termopares foi acoplado às amostras para medir a temperatura em diferentes pontos das paredes interna e externa.

Figura 41 - Esquema do teste de atraso térmico



A diferença de temperatura entre as faces externa e interna foi traçada e identificada como “block (bloco)” nas Figura 54a-d, uma vez que resultam do efeito de isolamento geral da amostra. O efeito de isolamento individual de cada constituinte da amostra (parede interna, parede externa e buffer de ar entre as paredes) foi avaliado comparando as diferenças de leitura entre os grupos de termopares 1-3 e 4-6 (outter wall - parede externa), 4-6 e 7-9 (air buffer – câmara de ar ) e 7-9 e 10-12 (inner wall - parede interna).

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 4.1 Caracterização das composições formuladas

As propriedades indicativas de comportamento reológico no estado fresco foram sistematicamente manipuladas com uso de SP e VMA para permitir a capacidade de impressão (SOLTAN; LI, 2018). A Tabela 9 resume as composições e propriedades medidas no estado fresco das 11 misturas + duas misturas de referência (R0 - S0ab0,93 e R100 - S100ab0,93). Alguns dados serão usados pra sustentar as discussões adiante, por exemplo, relação água/secos (a/secos), densidade e teor de ar incorporado na microestrutura fresca. Na Figura 42, é ilustrado o teste de extrusão realizado após o ensaio de *flow table*.

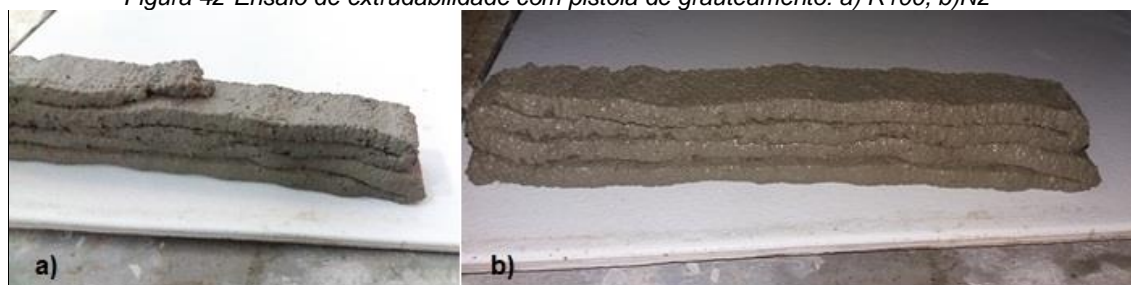
Tabela 9 - Composições e propriedades da mistura

N° (Código)	Traço em volume	Traço em massa (w/c=0,35)	a/secos	Densidade	Ar incorp.	Slump	Espalhament o
	(CP : AREIA : LECA)	(CP : AREIA : LECA : VMA : SP (%))		(Kg/m³)	(vol.%)	(mm)	(mm)
N1 (S25ab0,84)	(1,00 : 0,63 : 0,21)	(1,00 : 0,68 : 0,13 : 0,002 : 0,11)	0,194	1975	8,6	13	185
N2 (S75ab0,84)	(1,00 : 0,21 : 0,63)	(1,00 : 0,23 : 0,39 : 0,002 : 0,30)	0,217	1781	13,6	20	183,9
N3 (S25a1,02)	(1,00 : 0,77 : 0,26)	(1,00 : 0,83 : 0,16 : 0,002 : 0,16)	0,176	2000	8,4	15	183
N4 (S75ab1,02)	(1,00 : 0,26 : 0,77)	(1,00 : 0,28 : 0,48 : 0,002 : 0,48)	0,199	1895	8,3	24	184
N5 (S50ab0,80)	(1,00 : 0,40 : 0,40)	(1,00 : 0,43 : 0,25 : 0,002 : 0,13)	0,209	1891	10,4	16,5	184,6
N6 (S50ab1,06)	(1,00 : 0,53 : 0,53)	(1,00 : 0,57 : 0,33 : 0,002 : 0,40)	0,184	1927	9,5	20	182,4
N7 (S14,6ab0,93)	(1,00 : 0,79 : 0,14)	(1,00 : 0,85 : 0,08 : 0,002 : 0,07)	0,181	2011	8,3	13,2	185
N8 (S85,4ab0,93)	(1,00 : 0,14 : 0,79)	(1,00 : 0,15 : 0,49 : 0,002 : 0,38)	0,213	1816	10,9	20,5	183,9
N9 (S50ab0,93)	(1,00 : 0,46 : 0,46)	(1,00 : 0,50 : 0,29 : 0,002 : 0,23)	0,196	1931	8,9	19	182,8
N10 (S50ab0,93)	(1,00 : 0,46 : 0,46)	(1,00 : 0,50 : 0,29 : 0,002 : 0,23)	0,196	1918	9,5	18	183
N11 (S50ab0,93)	(1,00 : 0,46 : 0,46)	(1,00 : 0,50 : 0,29 : 0,002 : 0,23)	0,196	1920	9,4	16,5	181,9
R0 (S0ab0,93)	(1,00 : 0,93 : 0,00)	(1,00 : 1,00 : 0,00 : 0,002 : 0,00)	0,175	2034	8,5	12,1	186,3
R100 (S100ab0,93)	(1,00 : 0,00 : 0,93)	(1,00 : 0,00 : 0,58 : 0,002 : 0,45)	0,221	1771	11,7	21,5	185,1

As misturas foram dosadas com aditivo superplastificante (SP) variando entre 0,00% até 0,48% da massa do CP, de forma a manter o espalhamento na faixa de  $185 \pm 3$  mm na mesa de fluxo. Tais valores são considerados baixos em virtude das composições terem teores de aglutinantes próximos aos de agregados. Os diferentes proporcionamentos do SP para manter a faixa de espalhamento justificam os valores distintos de slump encontrados (12,1 a 24 mm), visto que esse material diminui a viscosidade da mistura, o que justifica o aumento do slump conforme se substituía o agregado convencional por LECA. Dessa maneira, percebeu-se que os valores de queda variaram em 50%, embora o

espalhamento tenha sido controlado dentro de uma faixa com variação de 2%. Esses resultados devem-se ao consumo de SP em maior ou menor quantidade nas diferentes composições, o que ocasionou a perda momentânea das pontes de hidrogênio que são responsáveis pela maior viscosidade da água (P. KUMAR MEHTA, 2006). Assim, as composições com maiores teores de substituição apresentam maior slump devido à diminuição da viscosidade ocasionada pelo SP.

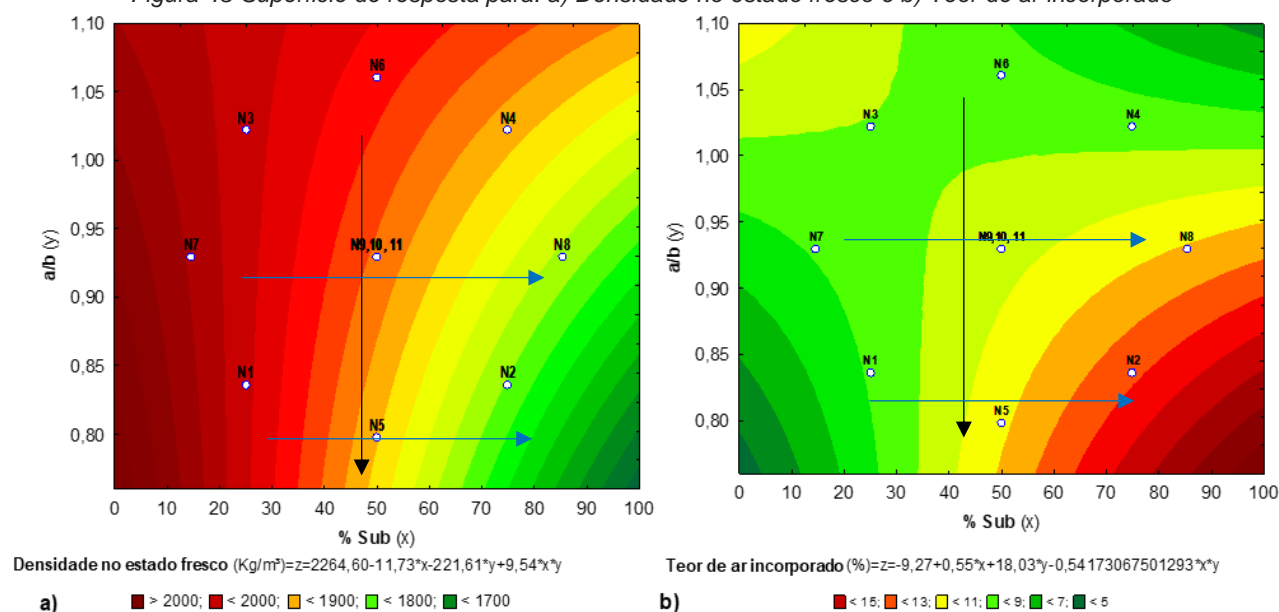
Figura 42-Ensaio de extrudabilidade com pistola de grauteamento: a) R100, b)N2



#### 4.1.1 Densidade aparente no estado fresco e teor de ar incorporado

Na Figura 43, são apresentadas as superfícies de resposta (SR) para as variáveis dependentes, densidade no estado fresco e teor de ar incorporado para as 11 composições do planejamento experimental, enquanto, na Tabela 9, se encontram os resultados para as duas misturas de referências (R0 e R100).

Figura 43-Superfície de resposta para: a) Densidade no estado fresco e b) Teor de ar incorporado



Com base na Figura 43-a), constata-se que a diminuição da densidade (2034 – 1771 kg/m<sup>3</sup>) não foi devido apenas à diferença de massa específica dos agregados, mas também influenciada pelo teor de ligante (implícito na relação a/b). O que representa uma queda de densidade de até 13%, essa diminuição dessa propriedade irá proporcionar maior resistência tanto a flambagem quanto ao colapso plástico que pode ocorrer durante a impressão. Ao analisar a Figura 43b, percebe-se que os maiores valores de ar incorporado estão associados aos mesmos níveis dos menores valores de densidade, o que leva a concluir que a densidade foi reflexo do aumento do teor de ar incorporado da matriz cimentícia. Ambas as repostas apresentam equações da superfície de resposta (SR) dependente linearmente de ambas as variáveis como também são influenciadas pela interação entre elas ( $x*y$ ). Tal pressuposto leva à interpretação que menores relações a/b aumentam o ar incorporado da mistura. O ar incorporado na mistura é desejável desde que forme uma rede de poros pequenos e bem distribuídos (P. KUMAR MEHTA, 2006).

Em síntese, observa-se que a resposta densidade fresca é mínima para os níveis altos da variável “%sub” juntamente com os níveis baixos da variável “a/b”. Isso indica que maiores teores de ligantes designados por “a/b” menor que 0,84 proporcionam melhor trabalhabilidade em virtude da menor densidade, o que virá a oferecer menor resistência ao sistema de bombeamento da impressora. Da Tabela 9, conclui-se que as misturas com menor densidade no estado fresco foram R100 (S100ab0,93), N2 (S75ab0,84) e N8 (S85.4ab0,93) com densidades no estado fresco de 1771, 1781 e 1816 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. O fato de a mistura N2 apresentar densidade semelhante a N8, enquanto possui teor de substituição inferior ao de N8 se deve ao maior teor de ligante e conseqüente conteúdo de VMA que proporcionaram uma viscosidade superior durante a mistura da pasta, o que facilitou o aprisionamento de ar (13,6%) e, portanto, decréscimo da densidade fresca (SIAMARDI, 2022b).

Observou-se que o baixo efeito de a/b com o alto efeito de %Sub resultam nos menores valores de densidade no estado fresco da argamassa. Isso pode ser justificado, além do menor peso específico da LECA, pela facilidade de incorporar ar das argamassas com maiores teores de pastas e, portanto, de VMA. Quando se combinou 75% de substituição de areia por LECA e 0,84 de relação agregado/ligante, obteve-se o menor valor de densidade dos pontos experimentais, 1771 kg/m<sup>3</sup> para a mistura R100.

Conforme Figura 43b, observa-se que a resposta teor de ar incorporado máxima é obtida para os níveis altos da variável “%sub” juntamente com os níveis baixos da variável “a/b”. Da Tabela 9, verifica-se que os teores de ar incorporado variaram de 8,3% a 13,6%.

Nesses casos, a baixa massa específica da LECA em comparação à massa específica do agregado natural junto com uso do VMA resultou em maior eficiência da mistura visto que o conjunto dos materiais (secos e água) ofereciam menor resistência às rotações padronizadas da argamassadeira. Dessa forma o mesmo processo de mistura ocasionou maior incorporação de ar na composição.

Os maiores teores de ar incorporado foram apresentados pelos traços com maiores teores de substituição, relação  $a/b$  menor que 0,93 e com relação água/secos maior que 0,200, como exemplo, N2, N5, N8 e R100 (Tabela 9). A substituição de areia por LECA diminui o peso da argamassa na cuba, fazendo com que a energia de mistura originasse maior quantidade de vazios na massa, quando comparado às misturas sem substituição do agregado, como é o caso da mistura de referência R0(S0ab0,93), que apresentou um dos menores teores de ar incorporado, 8,5%. Enquanto a composição de referência com 100% de LECA apresentou incorporação de vazios de 11,7%.

Por outro lado, o pressuposto que o teor de LECA na mistura é proporcional ao teor de vazios não explica os valores encontrados em traços como N4 (S75ab1.02) com  $a/secos = 0,1995$ , que apresentou teor de ar incorporado de apenas 8,3%. Conclui-se que o teor de SP foi eficiente em manter o intervalo de espalhamento, no entanto a mistura se tornou pesada devido à ávida sucção dos agregados e, com isso não se originou tantos vazios na matriz cimentícia. Além disso, a mistura N4 recebeu o maior teor de aditivo (0,48%) sobre a massa do CP. E, conforme o reportado por Tunstall *et al.* (2021), o ar é introduzido no concreto principalmente por meio da ação de mistura, embora também possa ser introduzido pelo ar dissolvido na água de amassamento ou pelo ar dentro do cimento e do agregado. Ainda segundo o autor, uma vez que o papel do SP é tornar a mistura mais fluida, e, portanto, menos viscosa, um aumento no uso de SP às vezes está associado à perda de ar incorporado. Isso ocorre, pois, se a viscosidade de uma mistura for muito baixa, a mistura é incapaz de evitar que as bolhas de ar escapem devido à sua flutuabilidade.

Na argamassa N2, que assim como N4 teve 75% de substituição, o efeito de sucção da água de amassamento não foi tão pronunciado a ponto de interferir no teor de ar incorporado, pois ela possuía um maior teor de pasta em virtude da relação  $a/b = 0,84$ . Com esse efeito, fica evidente que relações água/cimento baixas como 0,35 podem comprometer a trabalhabilidade de argamassas com altos teores de substituição do agregado comum por LECA, podendo isso ser válido para agregados porosos em geral. Neste estudo, com a incorporação de LECA, a densidade fresca pôde ser reduzida em até 13%. Nesse caso, a leveza da LECA juntamente com a melhor trabalhabilidade devido ao uso do VMA resultaram

em misturas de baixo peso. Isso aumentou a energia fornecida pelo misturador padronizado, visto que a menor leveza da composição do material oferecia menos resistência ao movimento do misturador. Tal condição resultou na formação de microporos em maior número quando comparado com a mistura de referência.

#### **4.1.2 Trabalhabilidade**

Em função da faixa de espalhamento padronizada e testes com a pistola de graute, todas as onze misturas do planejamento de experimentos mais duas misturas de referências foram consideradas aplicáveis. A análise aqui discutida é comparativa e os resultados obtidos restringem-se estudar a influência da relação a/b e %sub no ensaio de abatimento e espalhamento das composições. O teor a/c das misturas foi mantido constante em 0,35 de forma a se obter matrizes cimentícias idênticas e assim poder avaliar os efeitos da mudança de agregado nas propriedades das argamassas. O teor de aditivo foi maximizado proporcionalmente ao teor de substituição com vistas a manter a trabalhabilidade, o que resultou em *slump* maiores para espalhamentos praticamente constantes. Isso pode ser atribuído à densidade de empacotamento do agregado, porque é necessária uma alta fluidez para obter alta trabalhabilidade em uma mistura de baixa densidade de empacotamento, como no caso de agregados de argila expandida (LOTFY; HOSSAIN; LACHEMI, 2014).

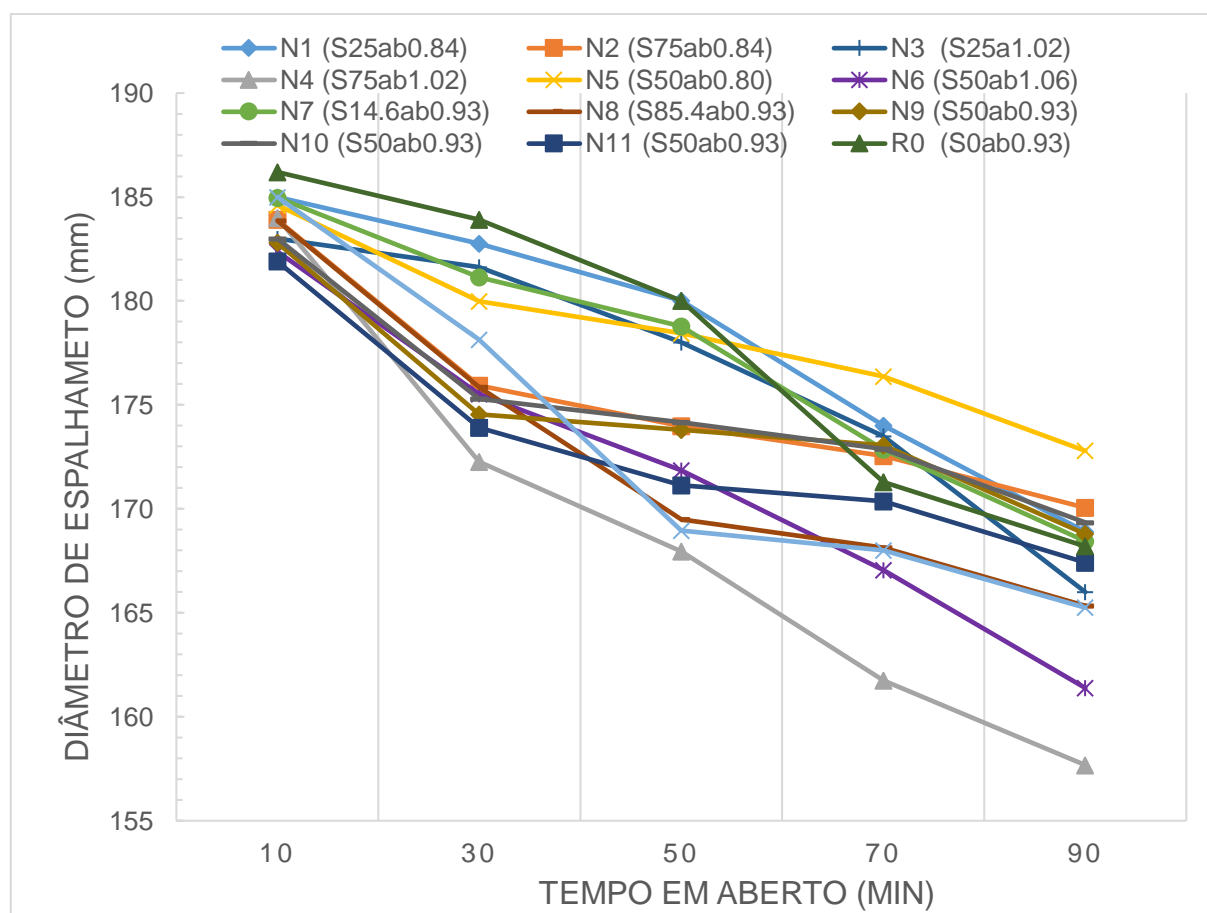
Na Tabela 10, são resumidas as perdas de trabalhabilidade ao longo do tempo para as onze misturas do planejamento de experimentos, o que fornece um método conveniente para descrever a mudança na trabalhabilidade ao longo dos intervalos de tempo relevantes para a impressão 3D. As colunas “*Slump*” e “*Spread*” descrevem o slump e espalhamentos obtidos da mesa de consistência medidos logo após o término da mistura, que corresponde a 10 minutos (10’) depois do contato do cimento com a água. As 4 últimas colunas trazem as perdas percentuais de espalhamento que foram medidas em tempos de 30’, 50’, 70’ e 90’ após o contato do cimento com a água.

Tabela 10 - Perda de trabalhabilidade ao longo do tempo

Fatores				Resultados					
mistura	(valores codificados)			Perda de espalhamento (%) / tempo					
código	Experimento	a/b	%Sub	Slump (mm)	Spread (mm)	30'	50'	70'	90'
S25ab0.84	N1	-1,00	-1,00	13	185	1,22	2,70	5,95	8,70
S75ab0.84	N2	-1,00	1,00	20	183,9	5,33	5,39	6,18	7,53
S25ab1.02	N3	1,00	-1,00	15	183	0,55	2,73	5,19	9,29
S75ab1.02	N4	1,00	1,00	24	184	6,38	8,72	12,09	14,31
S50ab0.80	N5	-1,41	0,00	16,5	184,6	2,83	3,34	4,46	6,40
S50ab1.06	N6	1,41	0,00	20	182,4	3,76	5,77	8,40	11,51
S14.6ab0.93	N7	0,00	-1,41	13,2	185	2,07	3,34	6,55	8,94
S85.4ab0.93	N8	0,00	1,41	20,5	183,9	4,36	7,82	8,56	10,08
S50ab0.93	N9 (C)	0,00	0,00	19	182,8	4,51	4,92	5,34	7,66
S50ab0.93	N10 (C)	0,00	0,00	18	183	4,21	4,82	5,54	7,46
S50ab0.93	N11 (C)	0,00	0,00	16,5	182,1	5,20	5,92	6,34	7,96
S0ab0.93	R0	-	-	10,7	186,2	1,24%	3,37%	8,28%	10,51%
S100ab0.93	R100	-	-	21,7	185	3,71%	9,01%	10,06%	11,76%

O comportamento típico de espalhamento da argamassa para impressão 3D está mostrado na Figura 44. O gráfico ilustra a diminuição do diâmetro de espalhamento de acordo com o tempo.

Figura 44 - Perda de trabalhabilidade das misturas por flow-table



A partir da Figura 44, observa-se que, num primeiro instante, o espalhamento parte da faixa 183 mm – 186 mm. Ao longo do tempo em aberto, esse ele tende a se dispersar em função das particularidades de cada composição. Com isso, aos 90 min, a faixa final de espalhamento fica entre 174 mm e 158 mm.

Com exceção das misturas N1 (S25ab0,84), N3 (S25ab1,02), N7 (S14,65ab0,93), N5 (S50ab0,80), R0 (S0ab0,93) e R0 (S100ab0,93), todas as demais perderam mais avidamente (mais que 5%), a plasticidade durante o primeiro intervalo de medição, o que indica que maiores teores de a/b conjuntamente com altos teores de substituição resultam em misturas com menor capacidade de manterem a trabalhabilidade em virtude da absorção de água pelos grãos de LECA.

A tixotropia de materiais varia com o tempo em aberto, devido ao aumento significativo da taxa de formação e produção de estrutura de floculação. De certa forma, uma redução significativa da fluidez dos materiais de concreto foi obtida com o aumento da geração da estrutura de floculação (LE *et al.* 2012). Essa redução da fluidez foi máxima para a mistura N4 (S75ab1,02), que apresentou 14% de perda de fluidez quando comparada ao espalhamento inicial (10 min), por outro lado, a composição com maior teor de cimento, N5 (S50ab0,80), apresentou queda de fluidez de 6%. Com isso, podemos concluir que baixos teores de aglomerantes (traduzidos por altas a/b) não proporcionam misturas 3DCP-LECA adequadas para extrusão com longos tempos em aberto ( $t > 50$  min)

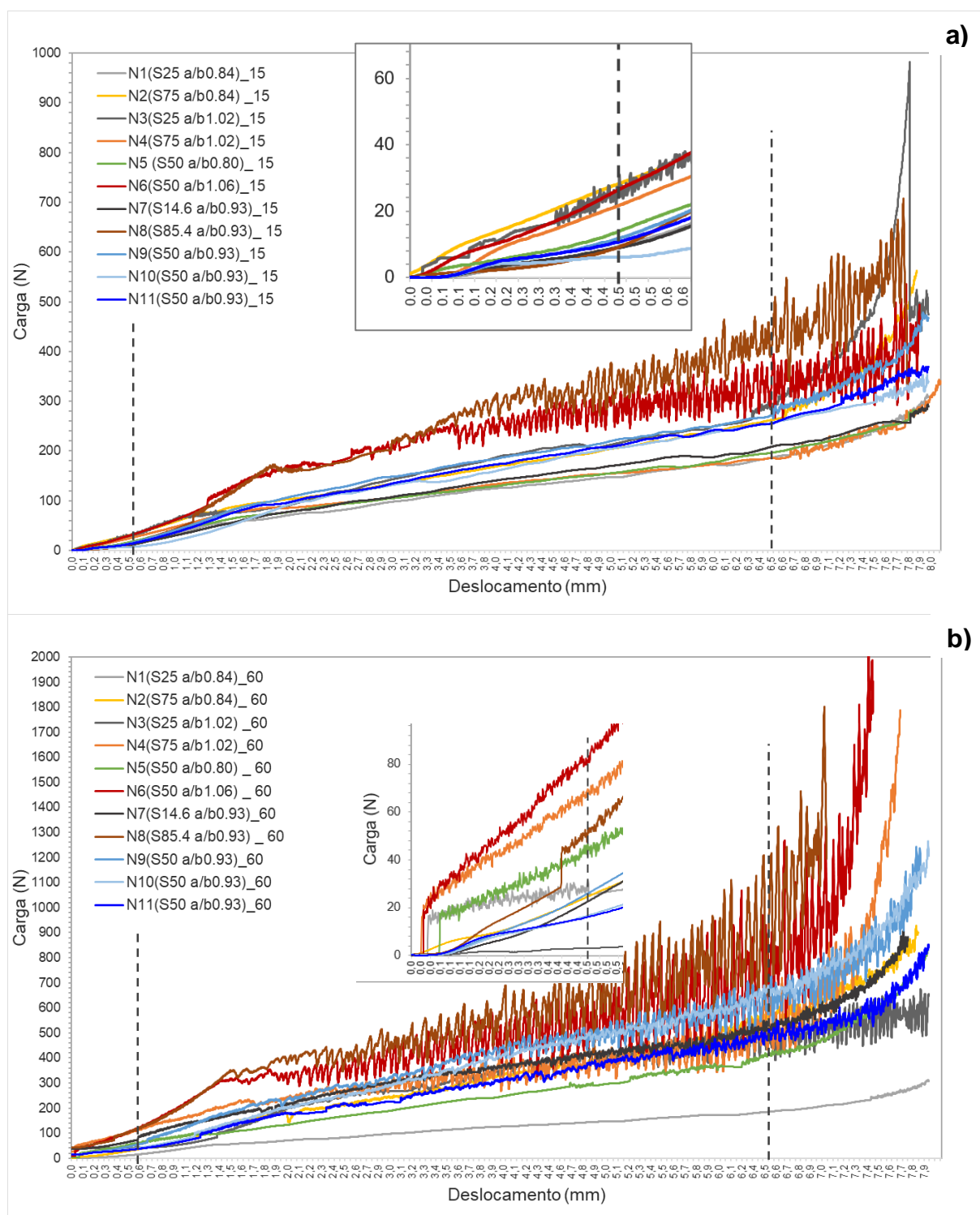
#### **4.1.3 Reometria por fluxo na compressão**

Nas Figura 45 a-b, são apresentadas as curvas carga versus deslocamento obtidas no ensaio de Squeeze-flow para as misturas N1 a N11 em intervalos de tempo de 15 e 60 min após o contato do cimento com água. As curvas de deslocamento versus carga mostram o perfil típico dos resultados do teste de fluxo na compressão; veja a Figura 17. O estágio de comportamento elástico linear (Estágio I na Figura 17) não pode ser visualizado nesta escala e a transição do estágio I para o II foi definida como a carga referente ao deslocamento de 0,5 mm, conforme metodologia de Cardoso *et al.* (2014) e Nicolini *et al.* (2021).

Em contrapartida, pode-se observar as duas regiões distintas de comportamento: (i) fluxo viscoso ou deformação plástica em cargas baixas, com um grande aumento no deslocamento com um pequeno aumento na carga no Estágio II (mostrado na Figura 17), que sofre uma transição em aproximadamente 6,5 mm de deslocamento para a região (ii)

Etapa III (endurecimento por deformação evidente na Figura 17), onde a carga necessária para deformar o material aumenta exponencialmente. A análise das curvas carga versus deslocamento mostradas na Figura 45 a-b) demonstra que existe diferença significativa entre os resultados obtidos aos 15 min e aos 60 min.

Figura 45 - Curvas cargas x Deslocamento: a) Squeeze-flow aos 15 min; b) Squeeze-flow aos 60 min



O segundo estágio, relacionado à deformação plástica do material, está presente em todas as amostras, no entanto esse estágio já apresenta bastante ruído, que é característico do estágio III, nas curvas das misturas com maior teor de substituição, por exemplo: N6 (S50ab1,06), N8 (S86,5ab0,93) e N4 (S75 ab1,02).

As curvas de carga de compressão x deslocamento retratados no gráfico da Figura 46 são uma indicação da facilidade de deformar o material, portanto, para maiores cargas, um maior esforço é necessário para deformar as camadas do material extrudadas pela impressora 3D. Nesse sentido, a região de interesse desse ensaio para aplicação em 3DCP é a transição do estágio I para o II, visto que esse material deve deformar o mínimo possível sobre o peso das camadas subjacentes.

#### 4.1.3.1 Reometria por fluxo na compressão – ensaio aos 15 min

As distintas 11 curvas plotadas são resultado dos diferentes teores de substituição, relações a/b, porosidade da LECA e relação a/secos em peso. Os valores a/secos da Tabela 9 revelam a influência do teor de água na composição da matriz cimentícia no comportamento reológico das argamassas avaliado por *squeeze-flow* durante o estágio II no intervalo de 0,5 a 2,0 mm de deslocamento. Como descrito na tabela 1, foram formuladas 11 argamassas com diferentes teores de agregado/ligante (a/b) e de substituição da areia por LECA. Percebe-se que a carga de compressão das misturas N6 (S50ab1,06) e N8 (S86,5ab0,93) são as mais alta durante todo o estágio II, apresentando atrito enquanto as demais curvas são praticamente lineares. A mistura N8 possui a/secos de 0,213, mas possui 86,4% de substituição, enquanto a N6 sofre influência perceptível do nível pasta devido à relação a/secos de 0,184.

Por outro lado, as menores cargas de compressão no estágio II pertenceram as misturas N1 (S25ab0,84), N4 (S75ab1,02), N5 (S50ab0,80) e N7 (S14,6ab0,93), que possuíam respectivamente, 0,194; 0,199; 0,209 e 0,181 de relação a/secos. O que leva a concluir que o principal fator para a baixa resistência à deformação é regido pelo teor de substituição, com exceção de N4, que mesmo possuindo 75% de LECA, recebeu o maior teor de SP (0,48%) para manter a trabalhabilidade adequada e apresentou um comportamento não esperado.

Na porção de misturas que apresentaram carga intermediária no estágio II, apresentam-se os pontos centrais do planejamento de experimento N9, N10 e N11 (S50a/b0.93), N2 (S75a/b0.84) e N3 (S25a/b1.02), com relação a/secos de 0,196; 0,217 e

0,176, respectivamente. Em tal faixa intermediária, encontra-se duas misturas com teores semi-opostos de substituição (25% e 75%), junto de valores opostos de  $a/secos$  (0,217 e 0,176). Esses valores foram responsáveis por manter essas misturas fora do “range” que suportam maiores e menores cargas durante o estágio de deformação II.

Como a relação água cimento ( $a/c = 0,35$ ) foi mantida constante para todos os traços, a quantidade de pasta livre dependia da relação  $a/b$  e do teor de substituição da areia por LECA, em virtude da alta absorção desse agregado. Em ordem decrescente de carga, tem-se a composição N6 e N8, seguida por N9, N10, N11, N2 e N3 na faixa média e por últimos, N1, N5, N4 e N7.

#### 4.1.3.2 Reometria por fluxo na compressão – ensaio aos 60 min

Para o tempo de 60 min em virtude da sucção da água por parte do agregado e demanda nos processos de hidratação, apesar da taxa de deslocamento utilizada (0,1 m/s), a carga necessária para comprimir a argamassa aumentou consideravelmente, atingindo o limite da célula de carga (1000 N) antes da conclusão do programa de deslocamento de 2,5 milímetros conforme prescrição da literatura. (CARDOSO *et al.* 2009)

Para a Figura 45b, que retrata as misturas ensaiadas com 60 min, podemos fazer a análise para o estágio I e estágio II. No estágio I percebe-se, as misturas N4, N6 e N8 apresentando as maiores cargas, em decorrência da combinação de baixa relação  $a/secos$  e do teor de substituição. O *range* é seguido por N7, N5, N9, N10, N11, N2 e N1.

No estágio II, ocorrem mudanças na ordem de suporte e podemos dividir as misturas em duas faixas. Na primeira faixa, tem-se a presença novamente de N6 e N8. N4 passa a figurar no topo da segunda faixa, seguida das misturas N7, N5, N9, N10, N11, N2 e N1, e por últimos, N5 e N1, que não apresentaram atrito nesse estágio.

Na Figura 46b), temos as misturas N7 a N11, em escala de deformabilidade no intervalo de 1 a 2 mm temos a sequência de N9 seguido por N7, N10 e N8. As misturas que representam os pontos centrais (N9, N10, e N11 S50ab0,93) têm deformação praticamente igual no trecho de 0 a 1 mm, tomando trajetórias ligeiramente diferentes após esse ponto em função de variações da moldagem. A argamassa com 86% de substituição apresenta um aumento repentino após os 3mm iniciais, embora tenha se mostrado a mais fluida no início da deformação, devido ao alto teor de SP. Tal comportamento ocorre em função do elevado atrito entre os agregados, que ensaiam o começo do enrijecimento por deformação característica do estágio III (CARDOSO; PILEGGI, 2010b).

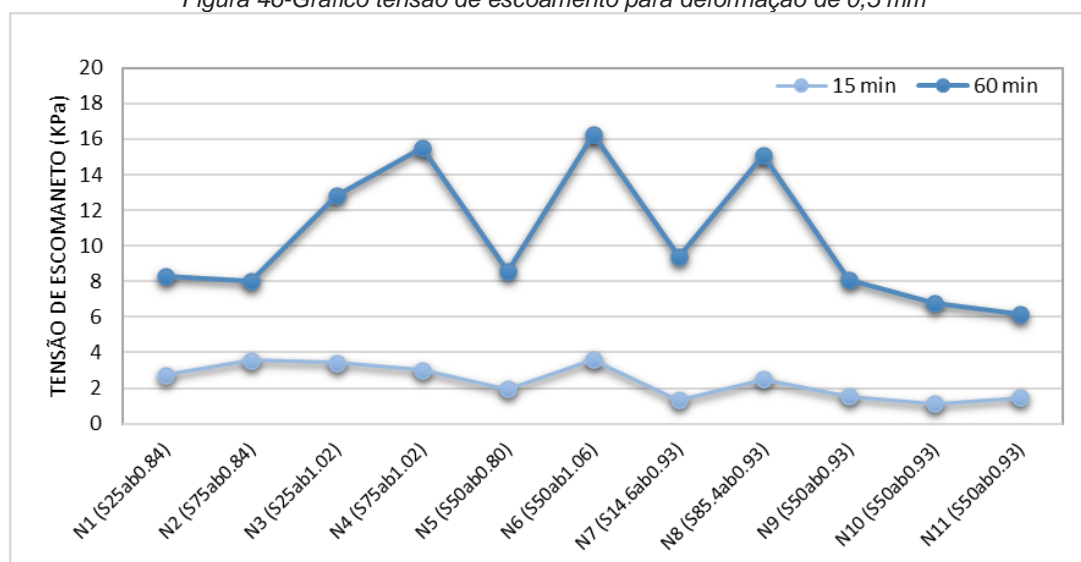
Os traços com maiores teores de pasta, a/b igual a 0,84 e 0,80, N1 e N5 respectivamente, apresentam estágio II e III retilíneos em contraposição aos demais que apresentam um ruído em zigue-zague mais pronunciado. A diminuição do teor de substituição no tempo 60 justifica as menores cargas alcançadas no estágio II pelas misturas N1 a N11, tornando-se menos viscosa e facilitando o escorregamento relativo dos agregados. Não foi observado separação líquido-sólido em baixa velocidade de compressão conforme (CARDOSO *et al.*, 2014; GRANDES *et al.*, 2018).

Portanto, tanto aos 15 min como aos 60 min, as misturas N4, N8 e N6 suportaram as maiores carga para uma deformação equivalente a 0,5 mm; com isso espera-se que seja mais difícil as camadas extrudadas colapsarem quando comparado às misturas N1, N3, N5 e N7 que suportaram as menores cargas, e, dessa forma, são mais propícias a deslizarem quando sujeitas ao seu peso próprio e ao peso das demais camadas assentadas sobre ela.

#### 4.1.4 Reometria por fluxo na compressão – Tensão de escoamento

A Figura 46 a-b apresenta os resultados da tensão de escoamento calculadas para o deslocamento de 0,5 mm, conforme metodologia de Cardoso *et al.* (2014) para os ensaios realizados com 15 e 60 minutos. Os valores aqui obtidos estão numa escala superior ao encontrados por Cardoso *et al.* (2010), entre 475 e 2000 Pa, para argamassas de revestimento com cimento Portland. Adicionalmente, pode-se notar que a taxa de hidratação do CP do ensaio de 60 min e o teor de substituição influenciam no limite de escoamento obtido.

Figura 46-Gráfico tensão de escoamento para deformação de 0,5 mm



Para o ensaio realizado no período de 15 min, as misturas apresentam tensão de escoamento na faixa de 1000 a 4000 Pa. As misturas mais rígidas (maior tensão de escoamento) aos 15 minutos foram N2 (S75ab0,84), N3 (S25ab1,02) e N6 (S50 ab1,06). Não foi possível modelar a superfície de resposta com mais de 95% de confiança, pois a resposta não dependia linearmente ou quadraticamente da variável %sub e a/b, parte desse efeito é relacionado ao uso de SP em elevada quantidade nas misturas nos níveis altos da variável %sub.

Nesse sentido, no que diz respeito a bombeabilidade das composições 3DCP, pesquisadores veem afirmando que dependendo dos parâmetros de impressão, uma tensão de escoamento inicial mínima de 1000 Pa é necessária na maioria dos casos para materiais de impressão à base de cimento quando sua capacidade de construção é uma preocupação (BOS *et al.*, 2021; KAZEMIAN *et al.*, 2017b; LU *et al.*, 2019; MOEINI; HOSSEINPOOR; YAHIA, 2022b; ROUSSEL, 2018). Portanto todas as 11 misturas são preliminarmente imprimíveis. Isto corrobora para o fato que o ensaio com a mesa de fluxo fornece um bom indicativo para selecionar misturas para 3DCP. Outros pares afirmaram que tensões de escoamento maiores que 3300 Pa também são aplicáveis e tendem a variar de acordo com a fração de volume e gradação das partículas de agregados (BIGGERSTAFF *et al.*, 2021; WENG *et al.*, 2018).

Foi reportado que a combinação de tensão escoamento estática mais alta e a menor viscosidade plástica, são desejáveis para garantir baixa pressão de bombeamento e alta capacidade de construção (WENG *et al.*, 2018). Na mesma linha, não deve ser entendido que o material de alta tensão estática sempre causa problemas na extrusão, já que a presença de material tixotrópico na ciência do cimento contradiz esse comportamento por apresentar alta tensão de escoamento em repouso e baixa viscosidade quando fluindo sob força de cisalhamento ou qualquer pressão aplicada (PANDA; TAN, 2018b). Dessa forma, conclui-se que substituição em níveis altos do agregado convencional por LECA é viável para a impressão 3D e pode resultar em melhorias na capacidade de suporte e resistência ao colapso por flambagem, devido possuírem menor peso específico, conforme Tabela 9.

Moeini *et al.* (2022), por sua vez encontraram valores de tensão de escoamento aos 15 min na faixa de 2,0 a 4,75 Kpa, enquanto aos 40 min após o contato da auga com o aglomerante a variação entre as 5 misturas foi de 5,5 a 14 KPa.

No período de 60 minutos ocorre um acréscimo das cargas necessárias para deformação do material decorrentes do aumento da viscosidade da pasta. As misturas

passaram então a apresentar tensão de escoamento na faixa de 5000 a 13000 Pa. Embora não tenha sido possível modelar a superfície de resposta com mais de 95% de confiança, foi possível identificar que a tensão de escoamento se tornou dependente da variável “%sub”. O teor de água em massa era de 16.6 e 15.5 por cento para os traços N4 e N6. O traço N8 apresenta 17,6% de água, no entanto os quase 90% de substituição de areia por LECA corroboraram para uma tensão de 13 kPa, sendo a maior carga referente ao deslocamento de 0.5 mm.

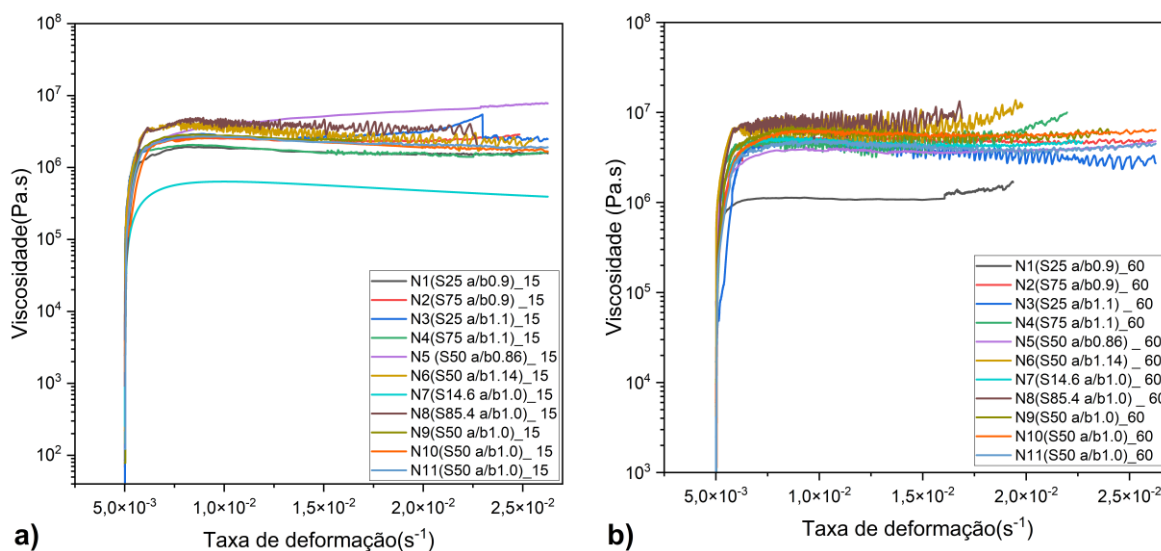
No caso de argamassas com a mesma relação  $a/c$ , o valor da tensão de escoamento diminui quando a relação  $a/b$  aumentou. Este último resultado pode ser explicado pelo fato de que as ligações físico-químicas entre as partículas de cimento são reduzidas quando a fração do volume de areia aumenta. No entanto, no caso de uma fração de alto volume de areia, o valor do rendimento do plástico pode aumentar devido ao componente de atrito da areia que será adicionado aos elos das partículas de cimento (TOUTOU; ROUSSEL; LANOS, 2005). A capacidade de construção também depende da trabalhabilidade e das proporções de mistura e, em particular, da variação da trabalhabilidade com o tempo, ou seja, o tempo aberto (LE *et al.*, 2012b).

Siamardi (2022b) reporta que o agente modificador de viscosidade (VMA) é usado para controlar a segregação, enquanto o limite de escoamento é controlado pelo superplastificante. E que com base na mecânica dos fluidos, a incorporação de VMA à materiais cimentícios pode diminuir o cisalhamento de escoamento sem afetar a viscosidade plástica, significativamente. Sendo assim, as misturas com maiores tensões de escoamento são consideradas mais adequadas do que as demais, embora todas possuam tensão mínima de 1000 Pa. Pode se afirmar que uma maior velocidade de impressão e tensão de escoamento dos materiais levaram a menores variações de largura (MOEINI; HOSSEINPOOR; YAHIA, 2022c).

#### 4.1.5 Reometria por fluxo na compressão – Viscosidade

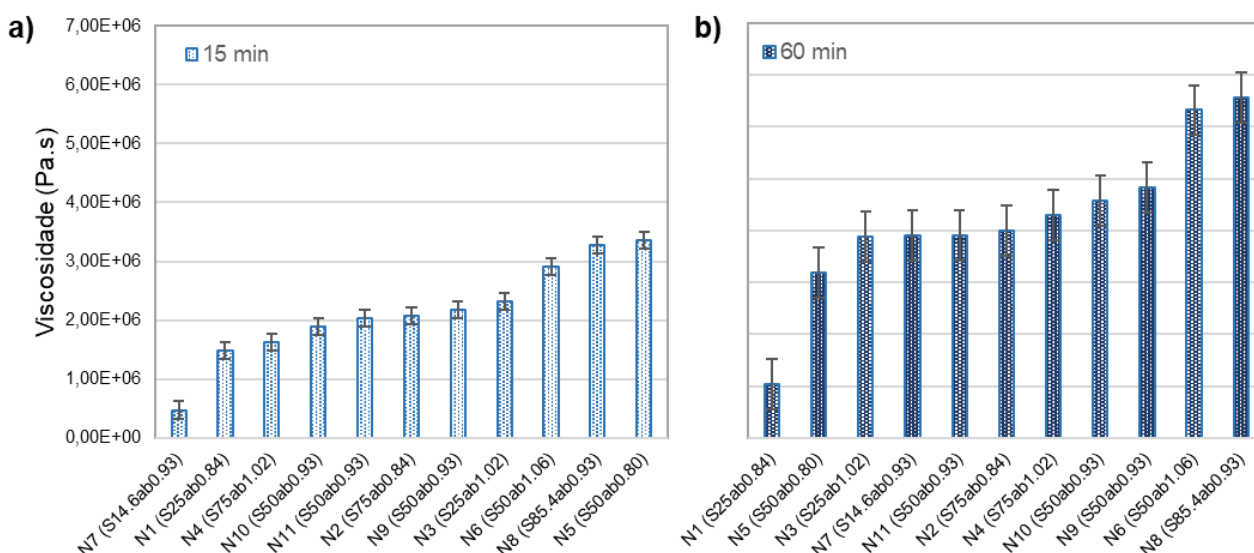
A Figura 47 compara as curvas de viscosidade biaxial versus a taxa de deformação para as amostras avaliadas nos tempos de 15 min e 60 min.

Figura 47- Curvas de viscosidade ( $\eta B$ ) vs. taxa de deformação ( $\epsilon B$ ) testados aos 15 min (a) e 60 min (b)



O comportamento encontrado na análise feita aos 15 min (Figura 47-a)), numa gama  $1 \times 10^5$  a  $8 \times 10^6$  Pa.s, é mais disperso do que os valores de viscosidade encontrados no ensaio feito aos 60 min (Figura 47-b)), que estão mais concentrados num range de  $10^6$  a  $10^7$  Pa.s. Esses resultados podem ser considerados semelhantes aos das argamassas convencionais de cimento Portland relatados por Cardoso *et al.* (2014b) e argamassas poliméricas relatado por Nicolini *et al.* (2021b), mas numa gama um pouco inferior (entre  $1 \times 10^5$  a  $1 \times 10^7$  Pa.s para argamassas de revestimento avaliadas a 0,1 mm/s). Isso ocorre em função do teor de ligante superior nas composições 3DCP quando comparada aos teores das argamassas convencionais.

Figura 48 - Viscosidade em ordem crescente para as misturas



O gráfico está ranqueado por ordem de grandeza de viscosidade média aos 15 e 60 minutos. Os valores de viscosidades média das misturas aos 15 min variaram da ordem de  $5 \times 10^5$  a  $4 \times 10^6$  Pa.s. As misturas com menores teores de substituição tenderam a apresentar menores valores de viscosidade e da ordem  $1 \times 10^6$  a  $7 \times 10^6$  Pa.s. Pode-se classificar para o ensaio de 15 min por ordem crescente de viscosidade. Diante disso, conclui-se que a viscosidade foi baixa para misturas com baixo teor de substituição crescendo ligeiramente com a relação a/b para misturas que possuem até 25% de substituição.

Os valores de viscosidade média das misturas aos 60 min variaram da ordem de  $1 \times 10^6$  a  $5,5 \times 10^6$  Pa.s. As misturas com menores teores de substituição (N1, N3 e N7) tenderam a apresentar menores valores de viscosidade, da ordem  $1 \times 10^6$  a  $3 \times 10^6$  Pa.s. As misturas com menor viscosidade N5 e N1, foram as que possuem menor relação a/b e, portanto, menor teor de cimento.

Chaves Figueiredo *et al.* (2019) constataram que a elevada viscosidade proporcionada por VMA com uma boa distribuição do tamanho de grão das partículas na matriz, e uma ótima relação água-sólidos podem levar a um material apresentar a viscosidade necessária para impressão e formar contornos de geometria desejada. O uso demasiado de superplastificante, aumento da relação a/c e diminuição de VMA levariam a perdas na estabilidade de forma culminando em uma mistura menos estável, a qual poderia segregar enquanto o compósito é bombeado. Ou seja, o risco de diminuir a viscosidade resulta em piorar a estabilidade de forma, visto que se mais água ou superplastificante for

adicionado a esta mistura, as consequências seriam a diminuição das tensões de escoamento inicial e de cisalhamento.

#### 4.2 Propriedades no estado endurecido

Na Tabela 11 são reunidos os dados das propriedades físicas ilustradas nas superfícies de resposta adiante, na tabela também consta as propriedades de duas misturas de referência. As propriedades no estado endurecido são reflexo das propriedades no estado fresco e controle das propriedades na impressão 3D, como por exemplo o teor de ar incorporado irá refletir no peso específico e este também será influenciado pela adesão entre camadas. As duas últimas colunas trazem os dados de perda de módulo de elasticidade e peso específico com relação à mistura de referência (S0ab0,93).

*Tabela 11-Resumo das respostas modeladas no planejamento de experimentos*

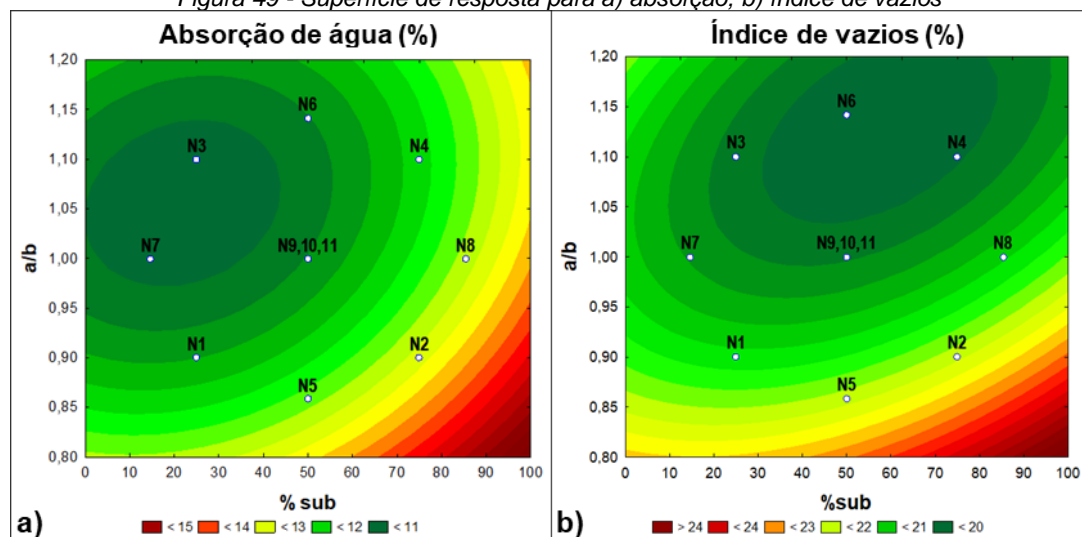
Id	(composição)	Estado fresco		Estado endurecido						
		Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	Ar incorporado (%)	Absorção	Porosidade	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidade (GPa)	Desvio	Perda de módulo	Perda peso específico
N1	S25ab0.84	1975	8.6	11.6%	21.2%	2318	22.78	±0.35	14%	4%
N2	S75ab0.84	1781	13.6	13.0%	22.0%	2178	20.49	±0.30	23%	10%
N3	S25ab1.02	2000	8.4	11.0%	20.3%	2312	24.71	±0.79	7%	5%
N4	S75ab1.02	1895	8.3	12.0%	20.1%	2098	21.86	±0.08	17%	14%
N5	S50ab0.80	1891	10.4	12.3%	21.8%	2270	23.02	±0.74	13%	6%
N6	S50ab1.06	1927	9.5	11.1%	19.7%	2202	22.77	±0.17	14%	9%
N7	S14.6ab0.93	2011	8.3	10.8%	20.4%	2368	25.28	±0.48	5%	2%
N8	S85.4ab0.93	1816	10.9	12.5%	20.8%	2105	21.85	±0.20	17%	13%
N9,10,11	S50ab0.93	1931	8.9	11.2%	20.1%	2250	23.59	±0.24	11%	7%
N10	S50ab0.93	1918	9.5	11.3%	20.2%	2243	23.70	±0.19	11%	8%
N11	S50ab0.93	1920	9.4	11.3%	20.3%	2253	23.23	±0.23	12%	7%
R0	S0ab0.93	2034	8.5	10.6%	20.4%	2427	26.48	±0.84	0%	0%
R100	S100ab0.93	1771	11.7	13.1%	21.1%	2044	21.13	±0.49	20%	16%

Observa-se a partir da coluna “peso específico” da Tabela 11, como já era esperado, que o peso específico tem uma relação direta com teor de substituição de areia por LECA. Os pesos específicos encontradas foram 2044 kg/m<sup>3</sup> para o traço de referência LECA (S100 ab0,93) a 2427 kg/m<sup>3</sup> para a composição de referência (S100 a/b0,93).

#### 4.2.1 Absorção, porosidade e módulo de elasticidade

Na Figura 49 são mostradas as superfícies de resposta absorção de água e porosidade aberta (índice de vazios), com vistas a entender que a porosidade do agregado, responsável pela queda de densidade, também altera ligeiramente essas propriedades no compósito.

Figura 49 - Superfície de resposta para a) absorção; b) índice de vazios



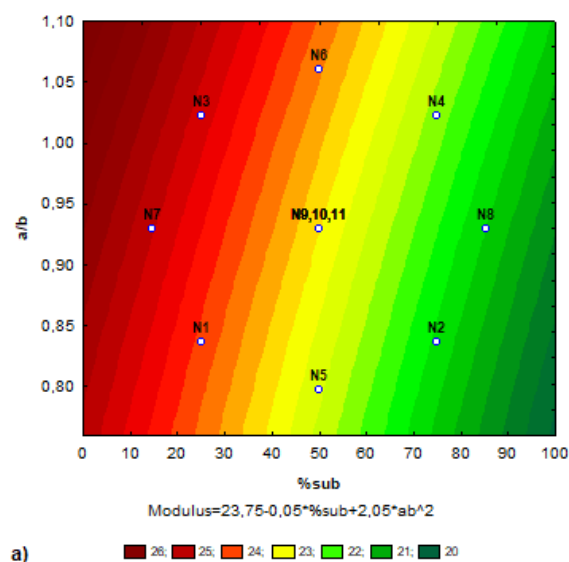
Infere-se da Figura 49a) que as composições 3DCP apresentaram pequena diferença da propriedade absorção de água, com variação de  $11,9\% \pm 1,2\%$ . Compósitos ricos em aglutinantes ( $a/b$  entre 0,84 e 1,06 em volume) foram eficientes em conter o aumento dessa propriedade, tal aumento era esperado em virtude de agregados com menor peso específico que a areia. A LECA possui porosidade aberta de 24,5% enquanto o agregado natural possui porosidade nula (vide Tabela 4). A pasta cimentícia de baixo  $a/c$  proporcionou um invólucro para os agregados, evitando que seus poros interferissem na absorção total do compósito 3DCP. Como exemplo, Remesar *et al.* (2020a) observaram que a absorção de água do compósito com consumo de  $400 \text{ kg/m}^3$  de CP chegou a aumentar duas vezes devido aos poros presentes no agregado leve pesquisado, LECA com diâmetro máximo de 10 mm.

Para a porosidade (Figura 49b), propriedade que traduz os vazios consequentes do teor de ar incorporado na mistura, os vazios formados pela evaporação de água livre na matriz cimentícia e os vazios inerentes ao agregado miúdo, a variação foi ainda menor, apresentando valores de  $20,9\% \pm 1,2\%$ . A variação da porosidade entre as composições advém principalmente do teor de LECA nos níveis altos da variável %sub (S75ab1,06; S85ab0,93; S75ab0,84).

Os menores valores da resposta absorção de água e índice de vazios (porosidade) ocorreram nos níveis centrais e altos da variável razão “a/b” (menos cimento e, portanto, menos água em comparação a baixos “a/b”) e baixos níveis da variável “%sub” (S25ab1,02; S14.6ab0,93; S50ab0,80; S0ab0,93). Essa variação de propriedade é menos acentuada quando comparada a outros estudos com agregados leves. Por exemplo, a absorção de água nos concretos de referência aumentou de 18,9% para 27,1% para o concreto convencional com 100% de substituição do agregado natural pelo leve com diâmetro inferior a 10 mm, conforme relatado por Nguyen *et al.* (2017). Salem e Ltifi (2014) mencionaram um aumento de 55,5% na absorção de água aos 90 dias, substituindo o agregado graúdo pela LECA (faixa de tamanho de 4-16 mm) em concretos convencionais.

A superfície de resposta do modelo que descreve o comportamento da resposta módulo de elasticidade em função das variáveis “%sub” e “a/b” é apresentada na Figura 50. Essa propriedade é influenciada tanto pela natureza do agregado quanto pelo índice de vazios da matriz cimentícia.

Figura 50-Superfície de resposta para módulo de elasticidade (GPa)



Conforme a Figura 50, percebe-se que a resposta módulo de elasticidade é máxima para o nível alto da variável independente “a/b” e nível baixo da variável “%sub”, ou seja varia inversamente proporcional a porosidade, com valores de 20,49 GPa a 26,48 GPa o que resulta numa queda de até 22,64% desta propriedade na mistura N2 (S75ab0,84) quando comparado ao valor do módulo de elasticidade da composição de referência, R0 (S0ab0,93) .

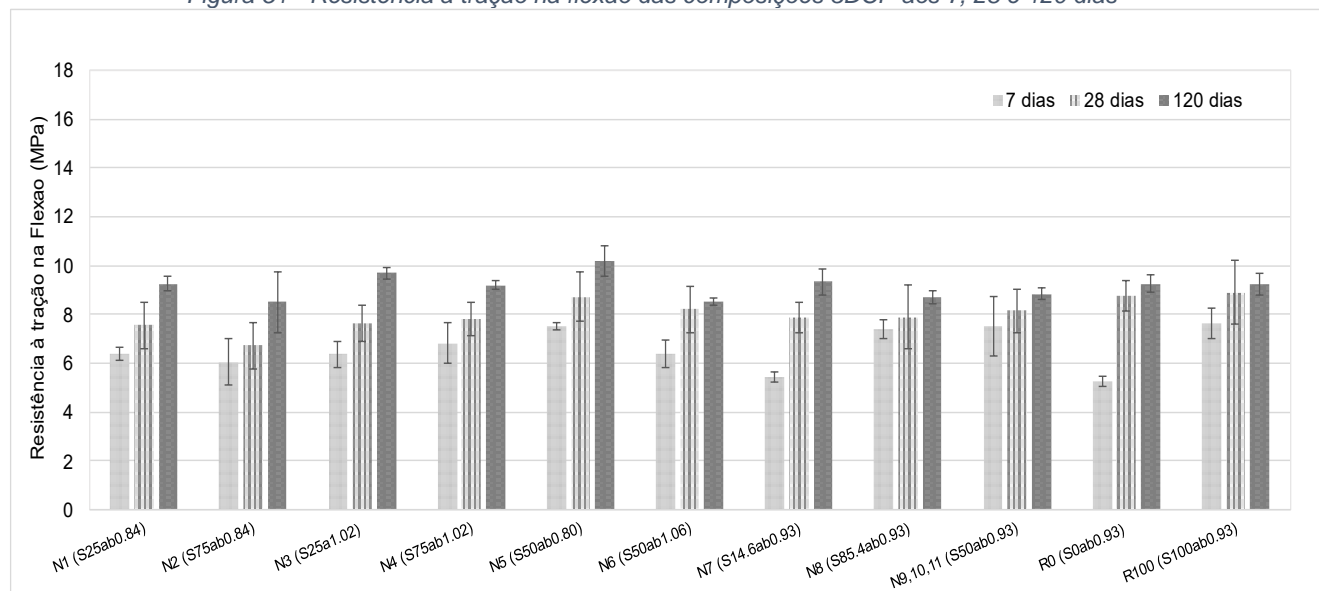
Conforme discutido anteriormente, o peso unitário da mistura diminui devido ao uso da LECA (S75, S85.4 e S100), assim como o módulo de elasticidade. A mistura produzida apenas com o agregado natural R0 (S0ab0,93) tem um peso específico de 1932 kg/m<sup>3</sup> enquanto mistura contendo 75% (N4) é 1676 kg/m<sup>3</sup>, sendo a redução do peso específico de 14%.

O módulo de elasticidade para as composições de referência (R0 e R100) e a mistura N2 (S75ab0,84) foram de 26,5 GPa, 21,13 GPa e 20,5 GPa, respectivamente, resultando em uma redução de 20% e 23%. Isto indica que os poros presentes na mistura N2 são mais representativos no módulo de elasticidade do que o próprio teor de agregado leve. Com exceção desse caso, o comportamento segue o observado por Sengul *et al.* (2011), que relatam, ao contrário do concreto convencional, o agregado é o elo mais fraco no concreto leve e, como visto na Figura 50, valores substancialmente menores de módulo de elasticidade foram obtidos à medida que o conteúdo de agregado leves aumenta.

#### 4.2.2 Resistência mecânica à tração na flexão

A variação da resistência à tração na flexão das composições 3DCP com diferentes relações a/b e teores de substituição são mostradas na Figura 51. Os resultados são apresentados para os 7, 28 e 120 dias de idade das amostras moldadas em forma. Como ocorreu nas demais propriedades, o teor de substituição parece não alterar drasticamente a resistência à tração das composições. As barras de erros representam o desvio padrão do resultado obtido com 3 amostra para cada idade.

Figura 51 - Resistência à tração na flexão das composições 3DCP aos 7, 28 e 120 dias



Para as composições N5 (S50ab0,80) e N6 (S50ab1,06) que possuem teor de substituição de 50%, a relação a/b se mostra determinante na resistência e, portanto, a menor relação a/b resultou na maior resistência da composição N5 em todas as idades. No geral as variações de resistências são independentes diretamente da variável a/b e %sub.

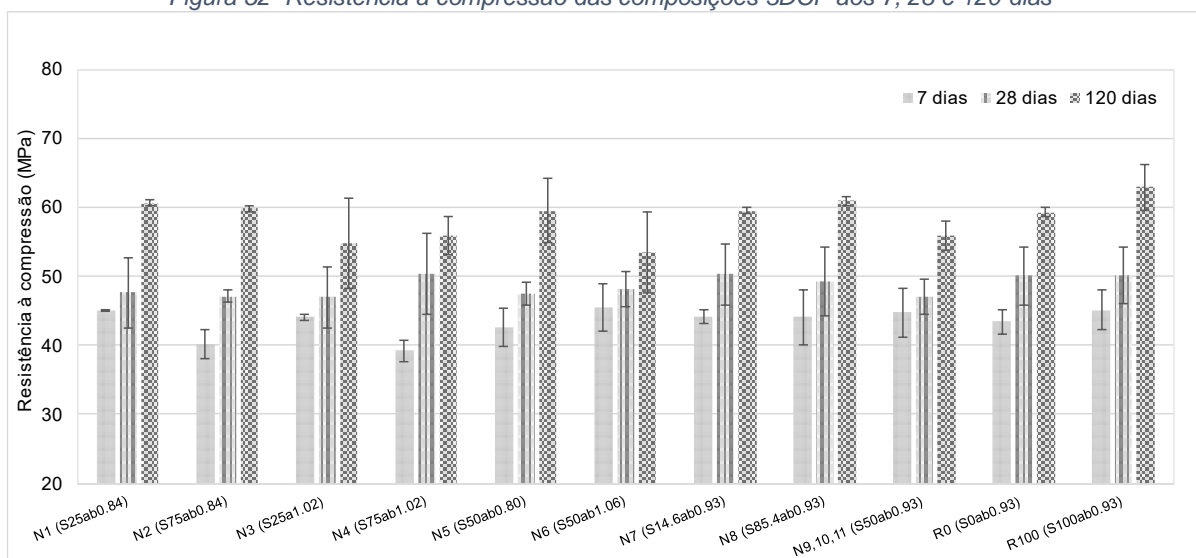
A composição N2 (S75ab0,84), embora não tivesse um dos maiores teores a/b, que justificassem assim a queda de resistência, apresentou a menor resistência dentre as 13 composições. Isso se deve a maior porosidade que esse traço apresentou em virtude da ocorrência de 13% de ar incorporado no estado fresco. Essas propriedades também foram refletidas em uma queda do módulo de elasticidade de 23% em comparação a mistura de referência.

A resistência das composições de referências R0 e R100 são com exceção da variação do desvio padrão ser maior nos espécimes com 100% de substituição de areia por LECA. A razão pode ser atribuída à alta absorção de água e superfície rugosa do agregado cerâmico, que diminuem a razão a/c da pasta cimentícia e compensa a queda de resistência oriunda da fragilidade das partículas cerâmicas. Além disso, o agregado cerâmico também proporciona “cura interna”, com o avanço do tempo de cura (ETXEBERRIA; VEGAS, 2015), além do efeito de ancoragem (P. KUMAR MEHTA, 2006).

#### 4.2.3 Resistência mecânica à compressão

Na Figura 52 são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão realizado aos 7, 28 e 120 dias com os espécimes moldados do lote um, as barras de erros representam o desvio padrão do resultado obtido com 3 amostra para cada idade.

Figura 52- Resistência à compressão das composições 3DCP aos 7, 28 e 120 dias



A resistência mecânica é melhorada quando agregado fino de resíduo cerâmico (CWA) é adicionado à argamassa de cimento de borracha como material de reforço. Devido à superfície rugosa, alta absorção de água e cinzas vulcânicas fracas de CWA, a resistência mecânica da argamassa composta foi muito melhorada. A resistência à flexão e à compressão da argamassa CWA 45% são 21,92% e 15,47% superiores às da RCM, podendo atingir a mesma resistência da argamassa de cimento (XU *et al.*, 2021).

Além disso, o CWA possui uma maior absorção de água, o que pode resultar na diminuição da relação água-cimento real na argamassa. Além disso, a argamassa de cimento com borracha com diferentes teores de CWA tem boa retenção de água e nenhum fenômeno de segregação (XU *et al.* 2021). De forma semelhante, Etxeberria *et al.* (2015) relataram que após 1 ano, a resistência à compressão e resistência difusão de cloreto dos concretos produzidos com agregados reciclados de cerâmica fina foram consideravelmente maiores do que as do concreto convencional, resultado da cura interna proporcionado pelos agregados porosos.

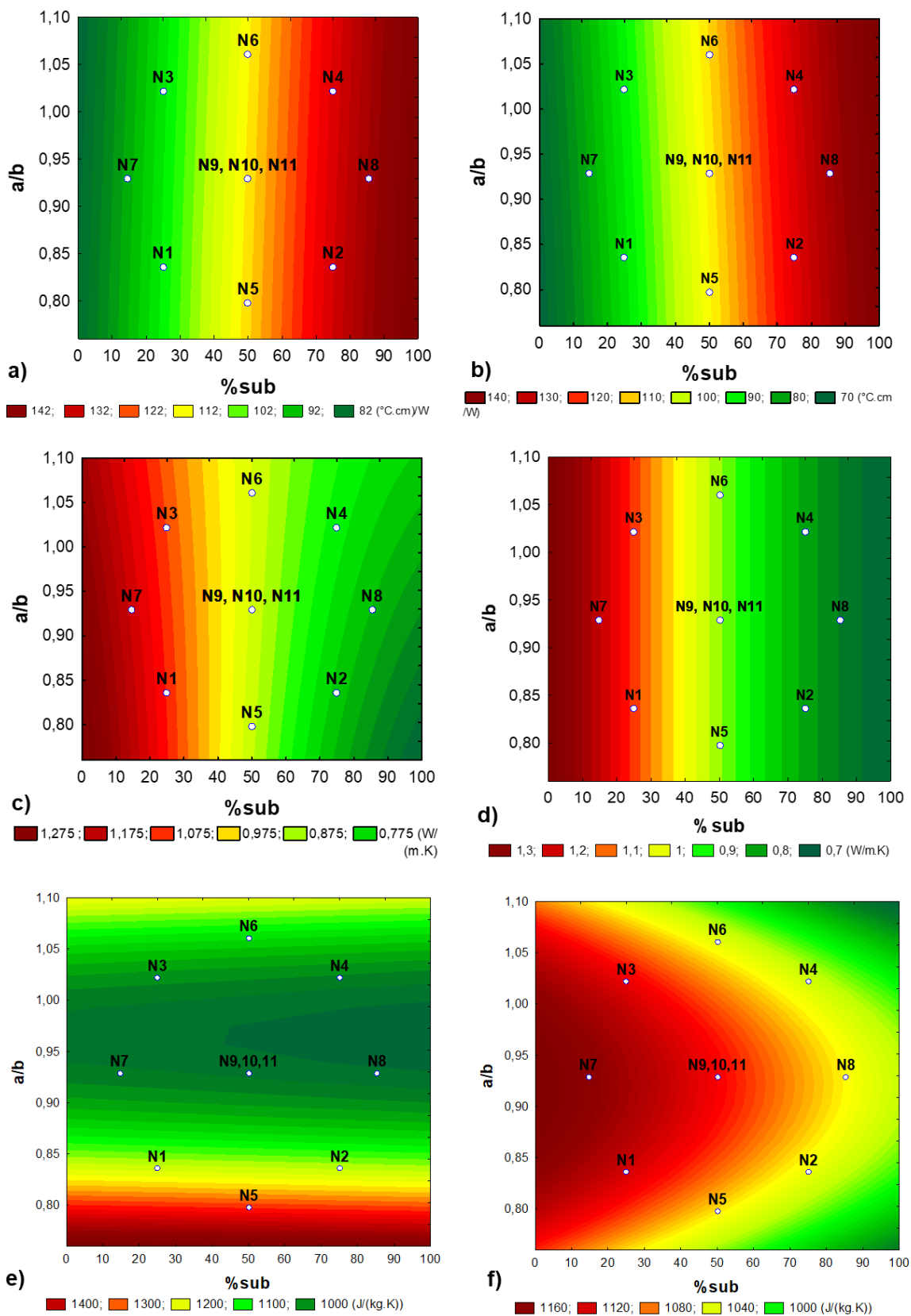
#### 4.2.4 Caracterização térmica das amostras

Os resultados das propriedades térmicas das amostras de 3DCP estudadas em condições de umidade de equilíbrio (secas 24h à 105°C em estufa) são apresentados na Tabela 12 usada para discutir quantitativamente os dados das superfícies de resposta ilustradas na Figura 53 para os modelos matemáticos que representam a interação das variáveis dependentes e independentes obtidos no software Statistica.

Tabela 12 - caracterização térmica até os 21 dias de idade e aos 120 dias.

Identificação	Propriedades aos 21 dias				Propriedades aos 120 dias				Variação (%)	
	R °C(cm/W)	K W/(m* K)	C J/(kg K)	D (mm <sup>2</sup> / s)	R °C(cm/W)	K W/(m* K)	Cp J/(kg K)	D (mm <sup>2</sup> / s)	R	K
N1 S25ab0.84	86.82	1.11	1186.4	0.44	83.93	1.14	1186.4	0.44	-3.3	2.7
N2 S75ab0.84	126.05	0.79	1294.8	0.32	113.07	0.88	1079.0	0.38	-10.3	11.4
N3 S25ab1.02	92.86	1.05	986.2	0.33	89.69	1.11	1120.2	0.45	-3.4	5.7
N4 S75ab1.02	121.51	0.82	943.8	0.42	118.90	0.83	1020.0	0.39	-2.1	1.2
N5 S50ab0.80	112.07	0.88	1220.3	0.35	104.59	0.97	991.2	0.43	-6.7	10.2
N6 S50ab1.06	108.77	0.92	1099.0	0.35	106.45	0.94	1053.6	0.41	-2.1	2.2
N7 S14.6ab0.93	90.75	1.09	1131.8	0.38	86.34	1.16	1106.4	0.45	-4.9	6.4
N8 S85.4ab0.93	142.75	0.72	1045.1	0.32	134.07	0.75	1040.4	0.34	-6.1	4.2
N9,10,11 S50ab0.93	118.36	0.85	844.4	0.44	108.37	0.92	1106.7	0.37	-8.4	8.2
R0 S0ab0.93	88.37	1.13	1236.1	0.38	83.42	1.19	1207.3	0.39	-5.6	5.3
R100 S100ab0.93	164.01	0.61	1007.8	0.30	147.75	0.68	1047.0	0.32	-9.9	11.5

Figura 53 - Superfície de resposta obtidas com o KD2pro: a) e b) resistividade térmica 21 e 120 dias; c) e d) condutividade térmica 21 e 120 dias; e) e f) Capacidade calorífica 21 e 120 dias;



Observa-se nas Figura 53 a) e b) que a resposta resistividade térmica (R) é máxima no nível superior da variável “%sub” (ilustrado pelas linhas vermelho escuro) independentemente do nível que a variável “a/b” esteja. Esse comportamento permaneceu fixo tanto aos 21 dias, quanto aos 120 de ensaio. Este efeito significa que a variação da relação agregado sobre ligante na faixa de 0,80 a 1,06 não tem influência relevante na propriedade de resistividade térmica.

As composições 3DCP com valores altos de “%sub” (S75ab1.02; S85,4ab0.93; S75ab0.84) junto com a de referência 100% (S100ab1,0) que consta na última linha da Tabela 12 apresentaram os maiores valores de resistividade térmica, que variam de 121 a 160 °C.cm/W aos 21 dias. A resposta mínima de resistividade térmica foi 90,75°C.cm/W para o ponto N7 do experimento e 88,37°C.cm/W para o traço de referência R0 (S0ab0,93) (veja Tabela 12).

Quanto a variação da relação agregado ligante “a/b”, tem-se que para o nível de substituição de 75%, a composição N2 (S75ab0,84) apresentou resistividade de 126°C.cm/W enquanto a N4 (S75ab1,06) que possuía menos ligante que agregado; e, portanto, menos água apresentou 121°C.cm/W. Tal diferença se explica pela maior quantidade de pasta que resultou em maior teor de ar incorporado (VMA calculado sobre peso do ligante) e menor densidade no estado fresco e endurecido. No entanto é importante destacar que a baixa condutividade do ar aprisionado na estrutura porosa de agregados leves é o maior responsável pela capacidade de isolamento térmico, entretanto, a condutividade aumenta com o aumento no teor de cimento (KOKSAL; MUTLUAY; GENCEL, 2020; REAL *et al.*, 2016).

Kim et al. (2003) testaram frações de volume de agregados entre 0,00 e 0,71 na mistura de concreto e constataram um acréscimo linear da condutividade térmica (propriedade oposta a resistividade) nas misturas com maiores frações de volume, uma vez que a condutividade térmica do agregado é maior entre os constituintes do traço de concreto. Tal efeito explica a pouca influência da variável “a/b” sobre a resposta estudada. Quando a variável “%sub” está nos níveis altos (75 a 100%) obtém-se os maiores valores de resistividade térmica

Com o passar do tempo e decorrente evolução da cura da matriz cimentícia, a superfície de resposta da condutividade térmica (Figura 53c-d) passa a apresentar faixas orientadas linearmente, o que indica a simplificação do modelo matemático. Ademais para a idade de 21 e 120 dias dos espécimes, a resposta mínima de condutividade ( $K=0.72$

W/mK) que é buscada neste estudo são apresentadas pelas misturas no nível alto da variável “%sub” independente da variável “a/b”.

Remesar *et al.* (2020) afirmam que a redução da condutividade térmica do concreto induzida pelo aumento do volume de argila expandida grossa e fina está associada à alta porosidade desses agregados. Os autores conseguiram diminuir a condutividade 73% fazendo uso de LECA e cinza volante em substituição ao CP. No trabalho de Sacht *et al.* (2010), a substituição total do agregado graúdo silicioso por argila expandida diminuiu condutividade térmica em 48%, de 1,8 para 0,94 W/mK. Nguyen *et al.* (2017) relataram que uma taxa de substituição de 100% do agregado miúdo por argila expandida resulta em uma redução de 36% da condutividade térmica do concreto.

Baseado nas Figura 53 c-d) e Tabela 12 infere-se que a condutividade variou de 0,72 W/mK a 1.13 W/mK aos 21 dias de idade, enquanto aos 120 dias todas as formulações apresentaram aumento de até 11% da condutividade ficando na faixa de 0,75 a 1,19 W/(mK). Ao contrário do observado por Kim *et al.* (2003), Xiao *et al.* (2010) relataram que a condutividade térmica mostrou-se influenciada pela idade (Figura 53 c-d), além de ser função da fração de volume de agregado, fração de agregado fino, razão a/c, temperatura e condição de umidade no concreto.

Kim *et al.* (2003) verificaram que a condutividade térmica da pasta de cimento (1,16 W/mK) é a mais baixa e cai para a metade da do concreto (2,33 W/mK), enquanto a argamassa apresenta condutividade térmica de 2,07 W/mK aos 28 dias de idade e a mistura (pasta + cascalho) apresenta condutividade de 1,57 W/mK. Com esses resultados, constata-se que o agregado miúdo tem maior impacto na condutividade térmica do concreto do que o agregado graúdo.

Em consonância ao observado, Raheem *et al.* (2021) relataram que condutividade térmica e a difusividade diminuíram com o aumento do teor de casca de caroço de palma (PKS), mas aumentaram com a idade de cura, enquanto a capacidade térmica volumétrica e a resistividade térmica aumentaram com o aumento do teor de PKS, mas diminuíram com a idade de cura.

Saleh *et al.*, (2021) relataram que a condutividade térmica do concreto convencional fica entre (1,22–2,05) W/m °C, enquanto os resultados da condutividade térmica do nano concreto produzido com 1 e 3% de Nanosílica variaram entre (0,5–0,92) W/m °C.

As superfícies de resposta para a capacidade calorífica obtidas no estado endurecido são ilustradas na Figura 53e e 53f. Aos 21 dias a resposta é máxima quando a variável “a/b” está nos níveis baixos e a variável “%sub” se encontra no ponto central. Aos

120 dias, o comportamento da resposta de capacidade calorífica se simplifica e passa a ser regida apenas pelo teor de substituição, desta forma, a resposta ideal (ou valor mínimo) ocorre no nível alto da variável “%sub” independente da variável “a/b” estar no nível inferior ou superior.

Quanto maior o calor específico e a massa de um elemento de construção, maior será a capacidade deste elemento em reter calor, ou seja, sua capacidade calorífica. Os materiais de construção com alta capacidade calorífica são capazes de promover uma diminuição nas taxas de transferência de calor durante os horários de pico e reduzem flutuações da temperatura interna. A capacidade que um material tem em armazenar energia é definida como a capacidade calorífica por unidade de volume, ou o produto entre o calor específico e a gravidade específica. (MENDES *et al.*, 2020b).

De acordo com Nguyen *et al.* (2017), o calor específico aumenta com o teor de umidade, entre o estado seco e o estado saturado do concreto com agregado leve, o calor específico aumenta em 21%-43% dependendo da natureza e da fração de volume dos agregados.

A Tabela 12 traz o grupo de colunas “Variação (%)” que retrata a diferença das propriedades medidas com 21 e 120 dias, essa variação é relacionada a capacidade de calor volumétrico hidratação da matriz cimentícia. A coluna R representa a resistividade térmica, K representa o valor de condutividade térmica, C a capacidade calorífica específica e D a difusividade medida nos corpos de prova. As análises de regressão linear múltipla são realizadas com ensaios aos 21 e 120 dias para os testes térmicos.

A difusividade térmica (*D*) caracteriza a velocidade na qual o calor se propaga em um material. Quanto mais baixo for o seu valor, mais tempo o calor leva para passar por um material. Observa-se na Tabela 12 que a variação da difusividade ocorreu em um intervalo estreito de 0,30 a 0,42 mm<sup>2</sup>/s. E aos 120 dias de idade os valores de difusividade passaram a ocupar uma faixa mais alta de valores, indo de 0,34 a 0,44 mm<sup>2</sup>/s, conforme Tabela 12. O aumento da capacidade calorífica (*C*) e da difusividade térmica (*D*) de 21 a 120 dias está relacionado ao preenchimento dos poros da matriz cimentícia por produtos de hidratação ao longo da cura da matriz com o decorrer do tempo.

Deve-se ainda notar a partir da Tabela 12 que a resistividade térmica (*R*) diminui de 21 para 120 dias. Por outro lado, a condutividade térmica (*K*) aumenta com o tempo de cura e se estabiliza em torno de 100 dias junto com o processo de hidratação do cimento, conforme relatado por Mehta, Monteiro (2006). Essas variações são mais significativas para as composições com maior teor de LECA. A partir das composições N1 e N2, nota-se que

a resistividade térmica diminuiu 3 e 10%, enquanto a condutividade térmica aumentou 1 e 11%, respectivamente. Outro exemplo pode ser visto a partir das composições R0 e R100. A resistividade térmica de ambos diminuiu 6 e 10%, enquanto a condutividade térmica aumentou 5 e 11%, respectivamente. Tais variações se devem ao efeito de cura interna do agregado poroso sobre as reações de hidratação. De acordo com Yang *et al.* (2021), o fornecimento de água de cura interna leva à hidratação contínua da pasta de cimento e mais produtos de hidratação preenchem os poros, reduzindo substancialmente o tamanho dos poros capilares.

Xu *et al.* (2022) relataram que os agregados porosos têm um efeito de cura devido à sua capacidade de armazenar e liberar água, contribuindo para o processo de hidratação do cimento, reduzindo as microfissuras causadas pelo encolhimento autógeno e melhorando significativamente a resistência compressiva dos compósitos cimentícios que contêm agregado, em comparação com as amostras de referência. Ao mesmo tempo, a água armazenada nos agregados porosos contribui para a formação e crescimento de silicato de cálcio hidratado adicional (C-S-H) na zona de transição da interface agregado-cimento.

Assim como no estudo de Saleh *et al.* (2021), a adição de materiais para diminuir a condutividade térmica originou redução da capacidade calorífica específica e da difusividade térmica em relação a composição de referência. Os autores adicionaram Nanosílica para melhorar a capacidade de isolamento térmico do concreto. Pomianowski *et al.* (2014) reportaram uma investigação experimental da capacidade calorífica específica em função da temperatura  $C_p(T)$  do concreto misturado com várias quantidades de material de mudança de fase (PCM) e encontrou valores de capacidade calorífica específica na faixa de 1000 a 1600 J/(kg\*K).

Em suma, para as composições com LECA, a capacidade calorífica inclinou-se a aumentar com o tempo de cura e tendeu a diminuir tanto quanto fosse maior o teor de substituição do agregado ou tanto quanto maior fosse a relação a/b.

#### 4.2.5 Avaliação estatística dos resultados das propriedades térmicas

As equações 1 a 8 descrevem o modelo matemático para o comportamento das variáveis dependentes resistividade (R<sub>21</sub> e R<sub>120</sub>), condutividade (K<sub>21</sub> e K<sub>120</sub>), difusividade (D<sub>21</sub> e D<sub>120</sub>) e calor específico (C<sub>21</sub> e C<sub>120</sub>) em função das variáveis independentes (a/b) e (%sub). Nas equações foram incorporados apenas os fatores significativos, com nível de significância de 95% (valor p ≤ 0,05), o que demonstra a influência no processo representado pelos modelos matemáticos (ZHANG; YUE, 2018). O prefixo da equação designa a resposta, e o sufixo a idade (em dias) quando a propriedade do espécime foi medida. Como exemplo, R<sub>21</sub> e R<sub>120</sub> significam a resistividade térmica em 21 e 120 dias. O R<sup>2</sup> indica o nível de ajuste do modelo aos resultados observados.

Tabela 13 - Quadro de equações

Coeficientes de determinação		R <sup>2</sup>
$R_{21} = 82,07 + 0,6661 * \%sub - 3,26 * \left(\frac{a}{b}\right)^2$	(1)	96.97%
$R_{120} = 65,37 + 0,747 * \%sub - 4,74 * \left(\frac{a}{b}\right)^2$	(2)	86.76%
$K_{21} = 1,41 - 0,016 * \%sub + 0,00003 * (\%sub)^2 - 0,1678 * \left(\frac{a}{b}\right)^2 + 0,0075 * \%sub * \left(\frac{a}{b}\right)$	(3)	96.97%
$K_{120} = 1,348 - 0,010 * \%sub + 0,00004 * (\%sub)^2$	(4)	91.73%
$C_{21} = 2,55 + 0,049 * \%sub - 0,0001 \%sub^2 - 0,045 * \%sub * \left(\frac{a}{b}\right)$	(5)	96.97%
$C_{120} = 2,78 - 0,0074 * \%sub$	(6)	75.54%
$D_{21} = 1,139 - 0,0167 * \%sub - 0,76 * \left(\frac{a}{b}\right) + 0,016 * \%sub * \left(\frac{a}{b}\right)$	(7)	83.67%
$D_{120} = 0,447 - 0,0011 * \%sub$	(8)	51.30%

Portanto, com essa análise estatística conclui-se que as propriedades de interesse podem ser previstas com base num modelo matemático demonstrado nas equações 1-8. A análise de variância (ANOVA) identificou para as propriedades resistividade e condutividade que os modelos de regressão são representativos com um nível de confiança maior que 95% aos 21, no entanto aos 120, a representatividade dos modelos diminuiu para um nível de confiança maior que 85%. Os modelos para as demais propriedades (capacidade calorífica e difusividade) não apresentam nível de representatividade significativa.

Os altos valores de R<sup>2</sup> sugeriram que os modelos quadráticos se ajustaram muito bem aos dados experimentais, com exceção das respostas C<sub>120</sub>, D<sub>21</sub> e D<sub>120</sub>. Os coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) das repostas R, K e C aos 21 dias foram maiores que

0,95, isso significa que menos de 5% de variações não poderiam ser explicadas respectivamente pelos modelos *R21*, *K21* e *C21*.

A análise da variância (ANOVA) apresentada na Tabela 14 mostra os fatores de regressão dos modelos matemáticos (Equação 1-8) descritos em função das variáveis dependente (R, K, C e D). Foram consideradas em função das variáveis estudadas (a/b e %sub), com parâmetros estatisticamente controlados. Os valores F obtidos a partir do resultado da ANOVA (Tabela 14) tem importante influência na avaliação do modelo selecionado. Se um modelo de regressão for estatisticamente significativo, o valor F calculado deve ser maior do que o valor crítico da distribuição F.

Tabela 14-ANOVA das propriedades térmicas

Fonte	Sum of squares	DF	Mean of squares	F cal	F tab	Sum of squares	DF	Mean of squares	F cal	F tab
<b>Resistividade Térmica (R)</b>										
	R 21 days - R <sup>2</sup> =96.97%					R 120 days - R <sup>2</sup> =86.76%				
Regression	2300.32	2	1150.16	88.36	4.46	2831.25	2	1415.62	26.14	4.46
Residue	104.14	8	13.02			433.205	8	54.15		
Total	2404.46	10	240.45			3264.45	10	326.45		
<b>Condutividade térmica (K)</b>										
	K 21 days - R <sup>2</sup> =96.97%					K 120 days - R <sup>2</sup> =91.73%				
Regression	0.15	4	0.04	47.99	4.53	0.214	2	0.11	44.38	4.46
Residue	0.005	6	0			0.019	8	0		
Total	0.16	10	0.02			0.233	10	0.02		
<b>Capacidade calorífica vol (C)</b>										
	C 21 days - R <sup>2</sup> =96.97%					C 120 days - R <sup>2</sup> =75.64%				
Regression	0.16	3	0.05	0.68	4.35	0.488	1	0.49	27.95	5.12
Residual	1	7	0.08			0.157	9	0.02		
Total	0.73	10	0.07			0.645	10	0.06		
<b>Difusividade térmica (D)</b>										
	D 21 days - R <sup>2</sup> =83.67%					D 120 days - R <sup>2</sup> =51.30%				
Regression	0.007	3	0	11.96	4.35	0.006	1	0.01	9.48	5.12
Residual	0.001	7	0			0.006	9	0		
Total	0.009	10	0			0.012	10	0		

O modelo descrito para a variável R21 pode ser considerado adequado, visto que a porcentagem de variação explicada (R<sup>2</sup>) é de 97,17 % e que o teste F é altamente significativo, por resultar no F calculado (88,36) equivalente a 19,8

vezes o F tabelado (4,459). No entanto o modelo para a variável R120 apresenta porcentagem de variação explicada de 86,76% e o F calculado (26,14) equivale a 5,86 vezes o F tabelado. O que leva a concluir que a complexidade dos eventos micro estruturais durante a cura dos hidratos cimentícios e suas alterações nas propriedades físicas comprometem a modelagem antes bem-sucedida.

A partir da análise da superfície de resposta apresentada na Figura 8c e d verifica-se que os níveis altos da variável “%sub” conduzem ao aumento da resistividade térmica dos compósitos, tal efeito ocorre independente da alteração da variável “relação a/b”, na faixa (0,80 a 1,06). Dessa forma pode se concluir que a apenas a variação do teor de LECA na mistura tem influência na resistividade térmica, conforme o afirmado por Koksall et al. (2020a). Ademais resistividade aumenta com o aumento da porosidade, isto devido a presença de ar nos poros. O ar tem uma resistência térmica muito maior (3846,2 K.cm/W), do que a das partículas sólidas, este fato explica a baixa resistividade térmica dos materiais arenosos em relação aos materiais argilosos (KOKSAL; MUTLUAY; GENCEL, 2020a).

Os resultados da ANOVA apresentados na Tabela 7 também sugerem que o modelo matemático (Equação 3) descrito para a variável dependente K21, em função das variáveis estudadas com parâmetros estatisticamente significativos, pode ser considerado adequado. O percentual de variação explicada ( $R^2$ ) é de 96,67% e o teste F é significativo (Tabela 14). Dado que F calculado foi 47,99, o que equivale a 10,6 vezes o F tabelado (4.534). Embora, o oposto tenha sido observado para a resistividade térmica na superfície de resposta da Figura 8c e d, as baixas razões “a/b” juntamente com o alto “%sub” resultaram em uma diminuição na condutividade térmica da composição 3DCP (menos de 0,7 W/mK). Isso pode ser explicado pela redução do teor de areia, que é relativamente condutora quando comparado com a argila expandida. As Figuras 53 -c) e d) ilustram as superfícies de resposta de condutividade térmica aos 21 e 120 dias. Além disso, notou-se que o tempo contribui para a linearização das superfícies, o que explica a influência dominante da variável “%sub” LINEAR. A variável “a/b” resulta em variação de condutividade de 1,1 a 1,3 W/(m.°C), enquanto a variável “%sub” varia de 0,70 a 1,2 W/(m.°C) após 120 dias de cura. Para ambas as idades, um comportamento principalmente linear da resposta pode ser observado.

O modelo matemático observado na Tabela 13 (Equação 5 e 6) descrevendo a variável dependente C21d C120d (capacidade térmica de 21 e 120 dias) foi considerado inadequado, uma vez que o percentual de variação ( $R^2$ ) foi baixo e o teste F não foi significativo. O F calculado (0,68) é 0,15 vezes menor que o F tabelado (4,347) (Tabela 14).

A partir da análise da superfície de resposta mostrada nas Figura 53e-f, nota-se que as altas relações  $a/b$  e o alto consumo de LECA diminuíram a capacidade térmica das composições 3DCP, embora o modelo matemático descrito para a variável dependente D21 e D120, não fosse adequado. O modelo para a propriedade difusividade térmica apresentou a menor adequação do que os demais, uma vez que o percentual de variação explicada ( $R^2$ ) foi de 83,67%, e o teste F não foi significativo. O F calculado (11,96) foi 2,7 vezes a tabela F (4.459) em 21 dias. Aos 120 dias, o modelo apresenta redução do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para 51,30% (Tabela 14). Juntamente com a estreita variação desta propriedade de 0,32 para 0,45, destaca-se a representação insuficiente do modelo quadrático utilizado para descrever o comportamento da variável. Além disso, a baixa variação da difusividade também foi relatada por Nguyen et al., (2017).

A difusividade aos 21 variou de 0,30 a 0,44 e os menores valores (resposta ideal) desta propriedade, mostrados na Figura 53-e, ocorrem para baixos níveis de “%sub” concomitantemente com altos níveis de “ $a/b$ ” (S25ab1.02). Por outro lado, ele é válido também para altos níveis de “%sub” e baixos níveis de “ $a/b$ ” (S75ab0,84).

No entanto aos 120 dias a resposta de difusividade passou a ser dominada apenas pela variável “%sub” e a superfície de resposta se tornou linear, com valores de difusividades maiores para quase todos os experimentos, variando de 0,32 a 0,45. Tal comportamento justifica-se pela densificação da matriz cimentícia em virtude da conversão da água lamelar em produtos de hidratação junto com a colmatação de parte dos vazios no decorrer da cura entre 21 e 120 dias. Como a difusividade é dependente da condutividade térmica, do calor específico e da densidade do material, que também foram alteradas com o passar do tempo, tem-se um aumento na condução de calor durante mudanças de temperatura com o tempo (condições não estacionárias) (NGUYEN *et al.*, 2017; SALAZAR, 2003).

Segundo Nguyen *et al.* (2017), quanto menor for a difusividade, maior será o tempo necessário para que o calor ultrapasse um material, assim, a capacidade da velocidade de transferência de calor é expressa pela difusividade. A adição de agregados leves, que aumentem a porosidade, diminui a densidade, assim como também a difusividade térmica (TAOUKIL *et al.*, 2013). Este é o principal parâmetro que caracteriza os fenômenos de transporte de calor em estado instável, tendo o mesmo significado que a condutividade térmica tem na transferência de calor em estado estacionário. (ISIDRO-OJEDA; CALDERÓN; MARÍN, 2020)

Quando a variável “ $a/b$ ” sub está nos níveis altos (75 a 100%) obtém-se os maiores valores de resistividade térmica maior que 130 °C.cm/W que compreende as zonas

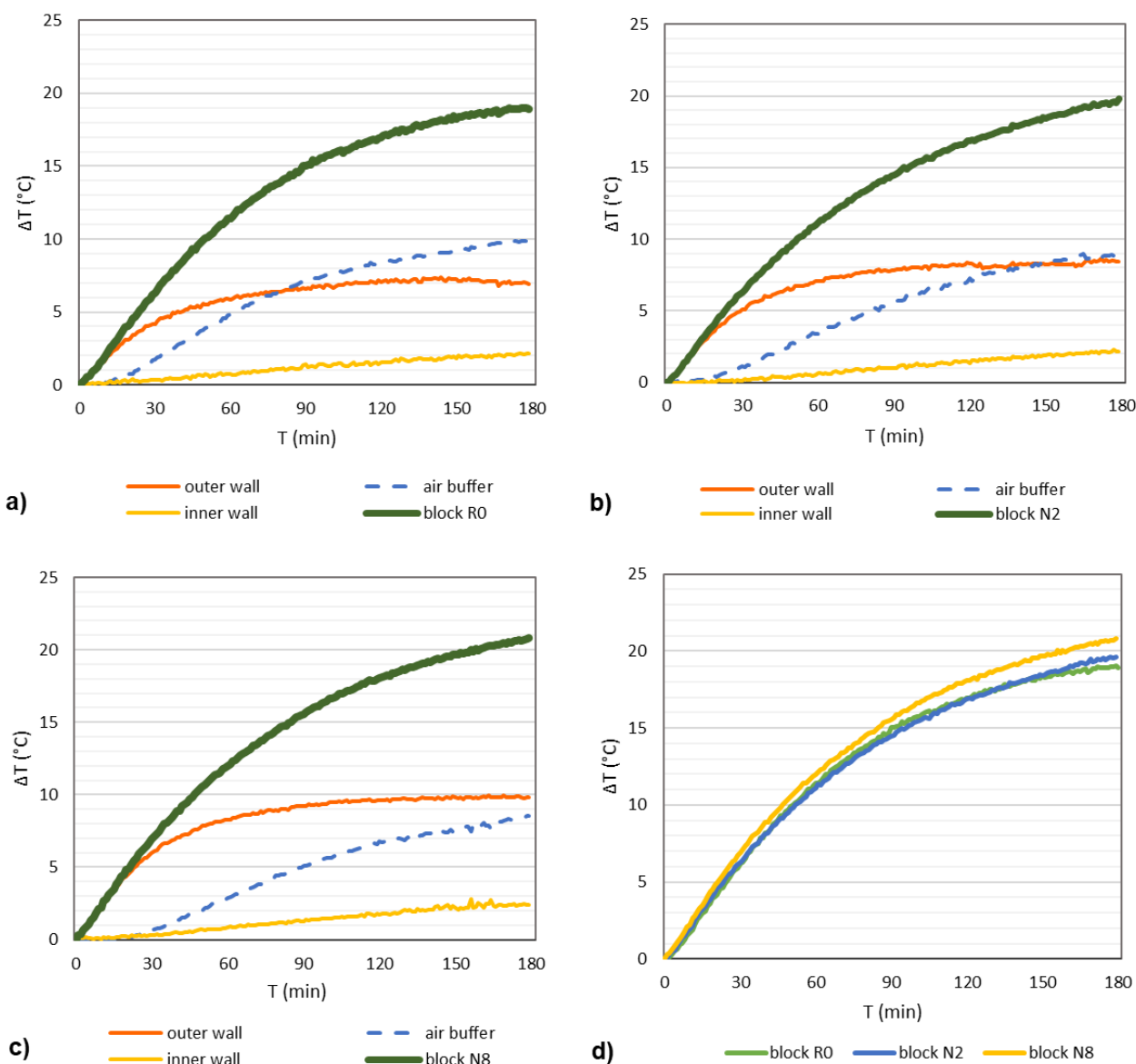
vermelho-marrom tanto aos 21 dias quanto aos 120 dias de cura ocorreu esse comportamento já a variação de  $a/b$  resulta em pequena variação da variável de resposta com resistividade menor que  $80 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$ .

#### **4.2.6 Simulação do atraso térmico com os blocos impressos**

O desempenho das edificações é normatizado pela NBR 15220 (ABNT 2005), que também inclui alguns dados sobre as características climáticas de cada região, a fim de estabelecer os requisitos mínimos que devem ser atingidos pelos sistemas de paredes, pisos e telhados. Para zonas climáticas tropicais, por exemplo, a variação de temperatura ao longo de 24 horas no verão é de  $32 \pm 8 \text{ }^\circ\text{C}$  e a radiação solar é em torno de  $6274 \text{ Wh}/\text{m}^2$  [64].

Duas misturas ótimas N2 (S75ab0.84) e N8 (S85.4ab0.93), e mais uma mistura de referência (S0ab0.93) foram selecionadas para serem impressas e ter suas propriedades comparadas as dos espécimes fundidos. O isolamento térmico dos componentes integrantes do bloco impresso é ilustrado na Figura 54. O componente em contato direto com a fonte de calor é identificado por “outer wall”. Cada curva mostra o gradiente de temperatura medido na face interna da camada mostrada nas Figura 41 da seção "3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL". Além disso, “air buffer” e “inner wall” referem-se ao isolamento oferecido pela câmara de ar e a camada interna do bloco (sem contato com a fonte de calor), respectivamente.

Figura 54 - Isolamento de cada componente do protótipo: construído com mistura de referência R0; b) construído com mistura N2 do planejamento experimental; b) construído com mistura N8 do planejamento experimental



A partir da análise do gráfico, podem-se observar duas fases distintas nas curvas “outter wall”. A primeira entre o tempo de 0 e 70 min, no qual o compósito apresenta uma rampa de isolamento crescente. A partir de 70 min de ensaio, os compósitos passaram a apresentar um isolamento constante até o final do ensaio. Enquanto a curva da câmara de ar “air buffer” se mostra crescente em todo tempo. As linhas verdes, intituladas “all” ilustram o isolamento total do bloco ensaiado, conjunto camada externa + câmara de ar + camada interna.

Com base na Figura 54a observa-se que o isolamento do bloco de referência (R0) foi aproximadamente 18,9°C (linha verde) e infere-se ainda que esta composição mostra

um desempenho térmico inferior aos compósitos N2 e N8 (Figura 54b-c), pois a maior parte do isolamento, cerca de 10°C, ocorre na câmara de ar (linha azul sobreposta as demais).

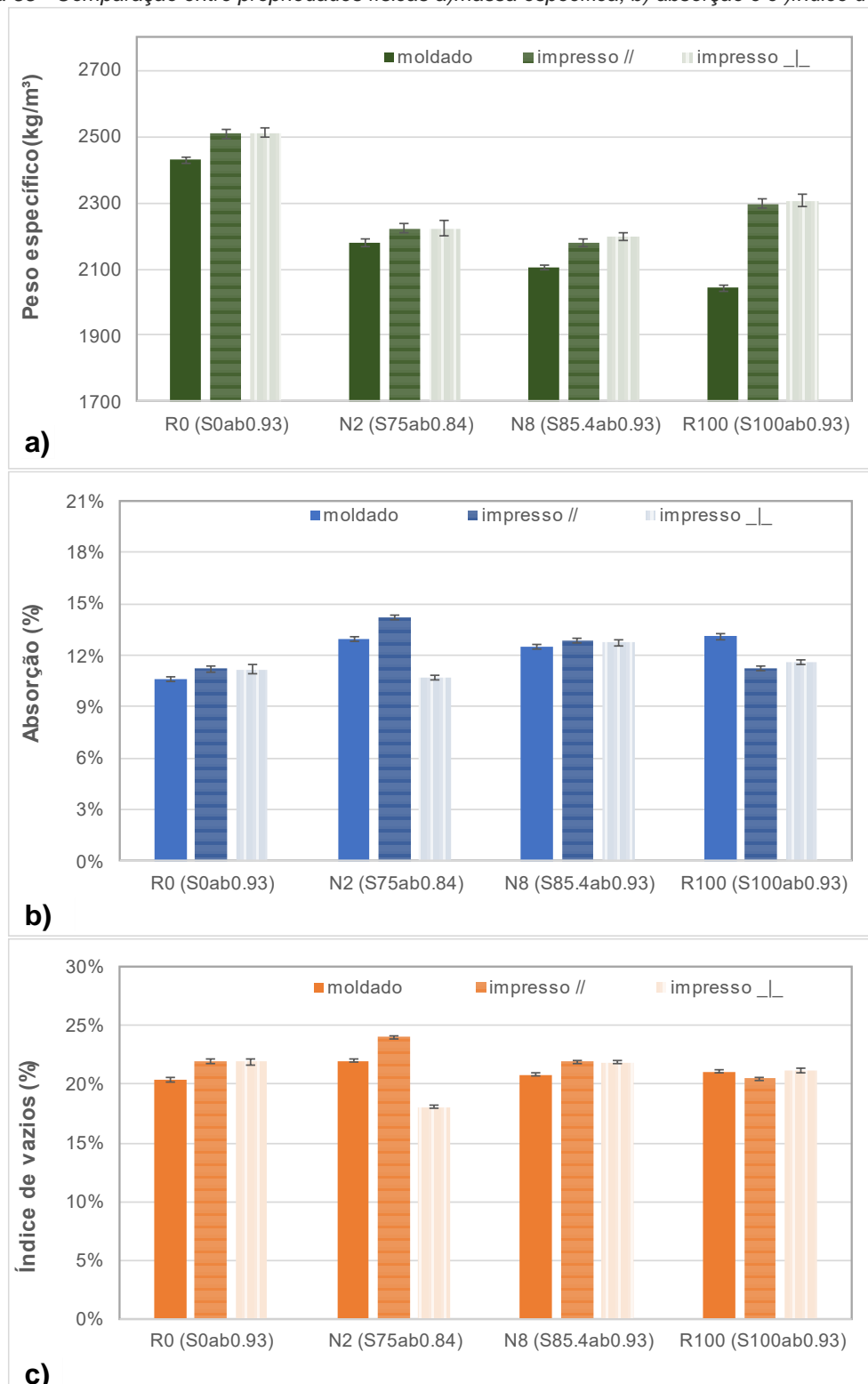
Com a incorporação de LECA os compósitos passam a apresentar um isolamento por parte da camada externa (linha laranja) equivalente ou superior a câmara de ar. Os protótipos N2 e N8 apresentam isolamento total de 19,60°C e 20,8°C, respectivamente, sendo proporcionais em termos de comportamentos de cada mistura com os valores de resistividade térmica encontrado no experimento com as amostras fundidas da seção .

Infere-se que conforme aumenta o teor de substituição, a camada externa tende a isolar mais calor do que a câmara de ar. Percebe isso, mais claramente ao final do 180 min, quando as curvas “outer wall” e “air buffer” estão no mesmo nível, ou a camada “outer wall” ultrapassa o isolamento do ar. A argamassa com 85,6% de substituição (N8) chega a isolar 10°C na camada “ext”, o que levar a interpretar que sua resistividade térmica é 25% maior que a de referência (R0). A diferença de isolamento entre teores de substituição próximos, como 75,0 e 85,6% ocorreu devido o teor de ligante na mistura N2 ser maior que em R0 e N8.

#### **4.3 Comparação das propriedades mecânicas e físicas de amostras fundidas e impressas**

A Figura 55 mostra as propriedades físicas (aos 28 dias) para as amostras moldadas (fundidas), impressas com corte paralelo às camadas (//) e perpendicular às camadas (⊥). A diferença entre amostras cortadas na direção paralela e perpendicular é visível quando observa-se às diferenças nas propriedades físicas ilustradas nas Figura 55a-c.

Figura 55 - Comparação entre propriedades físicas a) massa específica, b) absorção e c) índice de vazios



Na Figura 55a está ilustrado o peso específico das amostras que foram selecionadas a partir das análises feitas no lote um. Percebe-se que os espécimes impressos possuem valores até maiores dessa propriedade, há aumento do peso específico (2,0 a 3,3%) dos

espécimes impressos quando comparados aos moldados. Essa diferença vem do procedimento de mistura. No lote um foi feito uso de um misturador padrão com pouco mais de 3 L de material usado para os espécimes moldados, enquanto os blocos impressos foram obtidos a partir de um misturador de argamassa/tinta a uma velocidade de 180 - 750 rpm em um recipiente de 30 L. O procedimento foi adotado porque a quantidade de material necessária para a fabricação do bloco não permitia o uso de vários lotes de misturas menores de 3L, em virtude consumir demasiado tempo em aberto das misturas. Como consequência, houve menos energia de mistura e homogeneidade quando comparado com à mistura padronizada, feita com argamassadeira de laboratório normatizada. Isso resultou em um menor teor de ar incorporado nas misturas, causando as diferenças observadas nas propriedades físicas. Por outro lado, o índice de vazios e absorção passou de 0,3% para 1,3% e 1,1 para 2,0%, respectivamente. Tal variação vem das zonas de transição entre as camadas, uma vez que a matriz de cimento se densificou como observou-se no gráfico Figura 55a. Com base na Figura 55b), a variação de peso específico entre a amostra extraída na direção perpendicular e paralela às camadas foi inferior a 0,9% para os espécimes impressos. A diferença nas taxas de absorção e índice de vazios foi ainda menor (Figura 55b-c).

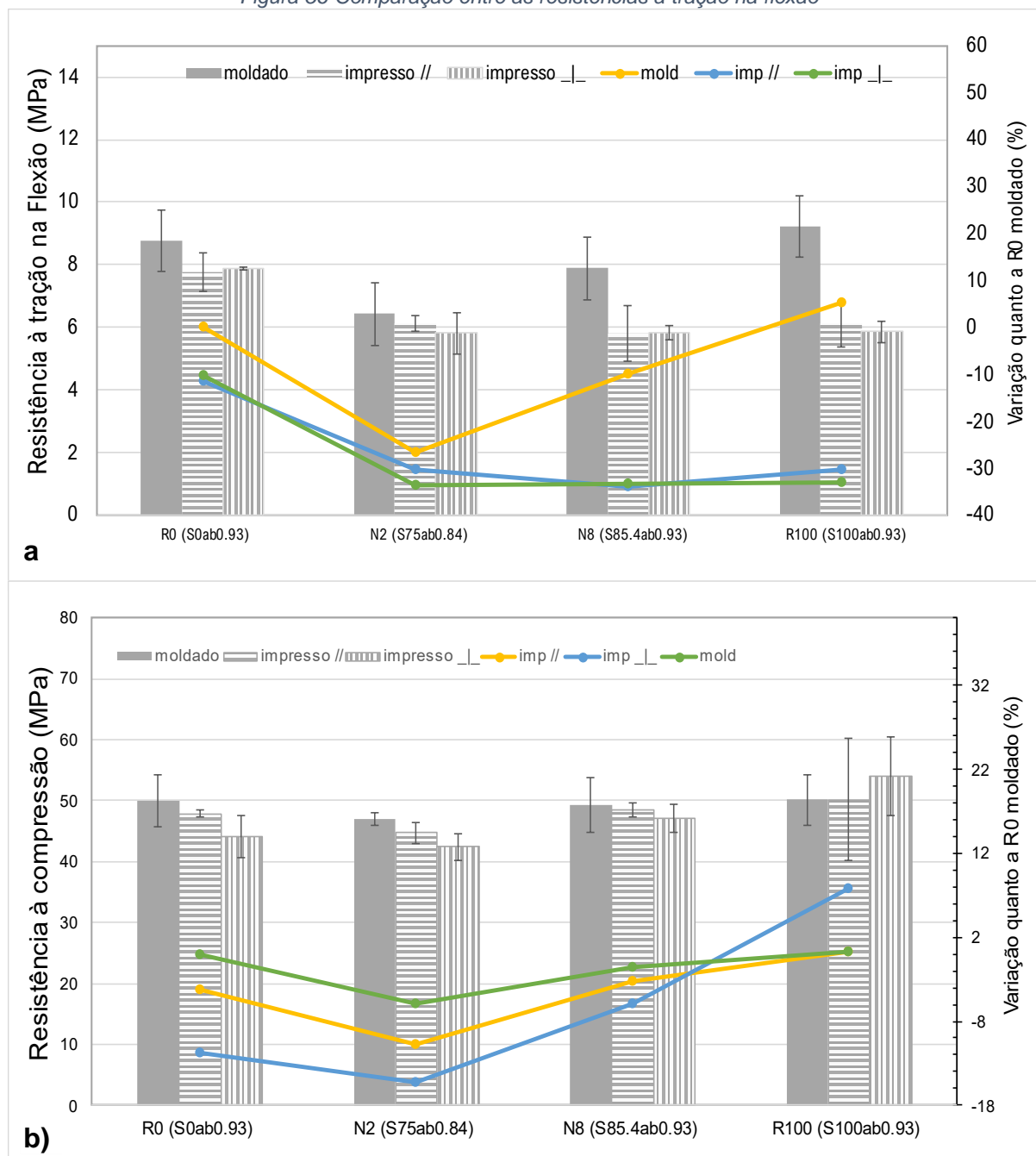
Apesar do desvio padrão ser um fator gerador de resultados incoerentes, a probabilidade de os espécimes “impresso //” serem mais densos e/ou mais uniformes do que os espécimes “impresso \_|\_” é plausível devido à variação de densidade induzida pelo processo, pelo menos até certo ponto. Isso explica a possível origem da variação da força compressiva observada em diferentes direções de carga. Em resumo, pode-se afirmar que tanto a presença de interfaces fracas quanto a variação da compactação são as prováveis causas das propriedades mecânicas anisotrópicos observadas nos testes compressivos em amostras impressas (NERELLA; HEMPEL; MECHTCHERINE, 2019).

Panda e Tan (2018); e Sanjayan (2019) explicaram o comportamento anisotrótrópico de elementos impressos sob carga compressiva usando uma hipótese baseada na compactação dependente da direção. Eles afirmam que as camadas impressas sofrem diferentes graus de compressão em várias direções, resultando em uma variação correspondente na força compressiva. Sob observação mais aprofundada, dois tipos de compactações podem ser identificados em estruturas impressas: a) compactação na extrusora em direção à deposição do concreto e b) compactação em peso das camadas de concreto subsequentes.

### 4.3.1 Comparação das propriedades mecânicas de amostras fundidas e impressas

A resistência à tração na flexão e compressão é ilustrada na Figura 56a-b). Assim como nas propriedades físicas a diferença na direção paralela e perpendicular são mais proeminentes. As barras de erros representam o desvio padrão do resultado obtido com 3 amostra para o ensaio.

Figura 56-Comparação entre as resistências à tração na flexão



Em parte, a diferença das propriedades entre as amostradas impressas e moldadas se deve à limitação dos procedimentos de corte e controle das dimensões da extração das amostras impressas, os quais não puderam evitar a presença de irregularidades horizontais

nas amostras que acabaram por influenciar indevidamente os resultados (WOLFS; BOS; SALET, 2019), principalmente para os espécimes submetidos ao ensaio de tração na flexão (Figura 56a). Inference-se que a resistência a tração na flexão das amostras foi entre 10 e 33% menores que a resistência dos espécimes moldados, variando de 5,8 MPa (N2) até 7,8 para a composição de referência (R0). Segundo o gráfico, não foi possível identificar um padrão de maior queda das propriedades entre os espécimes “impresso\_||”. Apenas as composições N2 e R100 apresentaram resistência dos espécimes na orientação II menor que a da orientação I. Segundo Nerella et al. (2019), essa ocorrência indicaria indiretamente a resistência de adesão entre camadas. Dessa forma, a equivalência das resistências na orientação I e II indicaria uma boa adesão, visto que o a impressão foi contínua, sem intervalo entre as camadas.

Liu et al. (2021) relataram que as resistências à flexão das amostras com fibras impressas (em média 6,6 MPa) são menores do que as das amostras reforçadas com fibras fundidas até 8,5%, e que o motivo pode ser os vazios gerados durante o processo de impressão. Esses vazios podem ocorrer no processo de impressão por meio de extrusão/deposição entre os filamentos que acabam por alterar as propriedades mecânicas (LE et al., 2012b; LIU et al., 2021; PAUL et al., 2018).

Com base no gráfico da Figura 56 b), percebe-se que as quatro misturas moldadas tinham uma resistência média de 50 MPa, embora N2 ( $a/b = 0,84$ ) tenha um conteúdo de aglutinante maior que R0 e N8 ( $a/b = 0,93$ ). Este efeito é devido ao maior teor de ar incorporado que resultou na elevação do desvio padrão. A resistência à compressão para o ensaio segundo a orientação I foi 44 a 50 MPa, enquanto para o ensaio realizado na orientação II, a resistência variou de 42 a 53 MPa.

Com base nas linhas do eixo secundário, inference-se que a resistência a compressão entre os espécimes moldados foi até 6% menores (N2) e até 0,21% maior (R100) que a resistência do espécime R0 moldado. Enquanto a resistência entre os espécimes ensaiados segundo a orientação I (impresso //) foram até 10% menor (N2) que a resistência do espécime de referência, e essa variação chegou até 15% menor para os espécimes ensaiados segundo a orientação II (impresso \_||\_). Concluir-se que resistência mecânica foi menor para os espécimes ensaiados segundo a orientação II (Figura 38 ).

Com base nesses resultados, conclui-se que a otimização das propriedades térmicas contra pequenas alterações nas propriedades físicas e mecânicas das composições 3DCP foi considerada satisfatória, uma vez que o aumento de quase 40% na resistividade térmica foi obtido sem perda de resistência mecânica à compressão. Esse achado difere do que já

foi relatado para outros compósitos cimentícios (argamassas e concreto), onde melhorias térmicas afetaram negativamente as propriedades mecânicas. Por exemplo, Remesar *et al.* (2020a) observaram uma diminuição da condutividade de 1,04 para 0,43 W/mK ao custo de redução da resistência mecânica em aproximadamente 70% para o concreto leve estudado. Tal otimização do desempenho térmico e mecânico deve-se à composição da mistura e ao uso de apenas agregado miúdo. Kim *et al.* (2003) explicou que ocorre uma otimização sutil das propriedades térmicas ao utilizar agregado fino em detrimento das grosseiras, pois as partículas menores são mais uniformemente distribuídas na mistura.

## CONCLUSÕES

Esse trabalho mostra a influência do teor de agregados/aglomerantes e o percentual de substituição do agregado natural por agregado leve nas propriedades físicas selecionadas dos compósito cimentício moldados e impressos em 3D. Para esse propósito foi modelado misturas com agregado leve para impressão 3D a partir de planejamento de experimentos 2<sup>n</sup>. Com base nos testes realizados e análise estatística dos resultados destes testes foram escolhidos 4 composições para impressão e confecção de blocos para avaliação do atraso térmico. Com base nos resultados alcançados, as seguintes considerações finais podem ser propostas:

1. Conclui-se com base na avaliação dos parâmetros reológicos das composições 3DCP que a substituição do agregado natural por agregado de argila expandida aumenta a tensão de escoamento estática e a viscosidade das misturas no estado fresco, devido ao sequestro de água promovido por esses agregados porosos; esse comportamento ocasionado pela LECA irá melhorar a extrudabilidade e capacidade de suportar as camadas sobrepostas
2. A avaliação estatística das propriedades físicas no estado fresco leva a conclusão que o comportamento é influenciado pela interação das variáveis independentes “%sub” e “a/b”, enquanto as propriedades endurecidas podem ser modeladas com equações dependentes apenas do fator teor de substituição (%sub).
3. Composições com LECA podem apresentar até 16% de redução do peso específico e 20% do módulo de elasticidade em comparação a mistura de referência R0. Além disso, substituição total de areia por LECA confere aumento de 77% de resistividade térmica (R) ao material, com R passando de 83,4 °C(cm/W) na argamassa de referência para 147,8 °C(cm/W) na composição com 100% de substituição por LECA.
4. A substituição total de areia por LECA diminui em 37% a condutividade térmica, de 1,19 W/(m\*K) para 0,68 W/(m\*K). As custas de discretas diferenças das propriedades entre os espécimes fundidos e impressos foi similar aos estudos publicados. No geral entre os espécimes impressos parece ocorrer discretas variações nas propriedades físicas relacionadas com a condução do compósito.

5. Devido o teor de cimento Portland utilizado nas misturas 3DCP a porosidade dos agregados não influenciou significativamente as propriedades de absorção e índice de vazios do compósito, as custas da matriz cimentícia. A resistência à compressão média aos 28 dias foi de 50 MPa, com exceção das misturas com alta relação a/b ou excesso de ar incorporado, como a mistura N2.
6. Ocorre variação das propriedades térmicas entre os 21 e 120 dias, como diminuição da resistividade e aumento da condutividade térmica, sendo que as variações são mais significativas nas composições com maior teor de LECA em detrimento daquelas produzidas apenas com areia ou baixo teor do agregado leve estudado. O que indica que esta substituição é benéfica para os processos de cura do cimento que ocorrem ao longo do tempo, favorecendo as reações de hidratação e preenchimento de vazios

Por fim pode-se concluir que agregados de densidade inferior aos convencionas, como LECA são viáveis para elaboração de misturas 3DCP, sem necessidade de pre-molhagem; a simulação do sistema de vedação demonstrou que as propriedades térmicas seguiam o mesmo comportamento das composições 3DPC fundidas no lote um. Pouca variação nas propriedades físicas foram observadas. Os blocos feitos com a composição de referência resultaram em gradiente térmico de cerca de 19 °C entre as paredes externas e internas do bloco. A composição com 85,4% de substituição de areia pela LECA resultou em um gradiente de temperatura de cerca de 21 °C.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para continuidade de pesquisas neste tema são as seguintes:

- a) Estudar os parâmetros de altura máxima construída, e intervalo de impressão entre camadas e sua influência na resistência mecânica de aderência e propriedades físicas como porosidade e densidade nas composições R0, N2, N8 e R100;
- b) Avaliar a resistência ao fogo, durabilidade e conforto acústico de paredes construídas com formulações imprimíveis usando altos teores de LECA em substituição ao agregado de convencional.
- c) Desenvolver formulações 3DCP com adição pozolânica a partir dos teores a/b considerados ótimos para as propriedades térmicas, contribuindo assim para o estudo de compósitos com baixo teor de cimento Portland;
- d) Utilizar o squeeze-flow como teste preliminar para seleção de misturas imprimíveis a partir da tensão de escoamento;
- e) Analisar a reologia das composições 3DCP com auxílio do Squeeze-flow usando intervalos de 15, 30, 45, 60, 75 e 90 min após o contato do ligante com água, variando a altura das amostras e taxas de carregamento;
- f) Investigar a incorporação de outros agregados, como vermiculita expandida, nas propriedades térmicas de composições 3DCP.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. ABNT NBR 15575: Residential buildings — Performance. **Brazilian Association of Technical Standards**, [s. l.], 2013.
- ABNT, A. B. de N. T.-. **ABNT NBR 15839 - Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método Squeeze-flow**. [S. l.: s. n.], 2010.
- ABNT, A. B. de N. T.-. NBR 7211: Aggregates for concrete-Specification. **Brazilian Association of Technical Standards**, [s. l.], p. 1–15, 2005. Disponível em: [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br).
- ALCHAAR, A. S.; AL-TAMIMI, A. K. Mechanical properties of 3D printed concrete in hot temperatures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 266, p. 120991, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820329950>.
- ALKHALIDI, A.; HATUQAY, D. Energy efficient 3D printed buildings: Material and techniques selection worldwide study. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 30, n. February, p. 101286, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101286>.
- AMERI, F. *et al.* Geopolymers vs. alkali-activated materials (AAMs): A comparative study on durability, microstructure, and resistance to elevated temperatures of lightweight mortars. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 222, p. 49–63, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.079>.
- ANTUNES, D. *et al.* A solution with low-cement-lightweight concrete and high durability for applications in prefabrication. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 275, p. 122153, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820341568>. Acesso at: 11 Mar. 2022.
- ARDAKANI, A.; YAZDANI, M. The relation between particle density and static elastic moduli of lightweight expanded clay aggregates. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 93–94, p. 28–34, 2014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169131714000593>.
- AYATI, B. *et al.* Use of clay in the manufacture of lightweight aggregate. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 162, p. 124–131, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817324133>.
- BAI, G. *et al.* 3D printing eco-friendly concrete containing under-utilised and waste solids as aggregates. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], p. 104037, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946521001062>.
- BIGGERSTAFF, A. *et al.* Determining the yield stress of a Biopolymer-bound Soil Composite for extrusion-based 3D printing applications. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 305, p. 124730, 2021. Disponível em: Acesso at: 28 Feb. 2022.
- BOGAS, J. A.; GOMES, A.; GOMES, M. G. Estimation of water absorbed by expanding clay aggregates during structural lightweight concrete production. **Materials and Structures**, [s. l.],

l.], v. 45, n. 10, p. 1565–1576, 2012. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-012-9857-7>.

BORGES, A.; FLORES-COLEN, I.; DE BRITO, J. Physical and mechanical performance of cement-based renders with different contents of fly ash, expanded cork granules and expanded clay. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 191, p. 535–543, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.043>.

BOS, F. P. *et al.* Juxtaposing fresh material characterisation methods for buildability assessment of 3D printable cementitious mortars. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 120, p. 104024, 2021. Disponível em: Acesso at: 21 Jun. 2022.

BOUMHAOUT, M. *et al.* Thermomechanical characterization of a bio-composite building material: Mortar reinforced with date palm fibers mesh. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 135, p. 241–250, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.217>.

BUSWELL, R. A. *et al.* 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 112, n. June, p. 37–49, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>.

CARDOSO, F.A. *et al.* Characterisation of rendering mortars by squeeze-flow and rotational rheometry. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 57, p. 79–87, 2014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884613002639>.

CARDOSO, F. A. *et al.* Characterisation of rendering mortars by squeeze-flow and rotational rheometry. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 57, p. 79–87, 2014.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Rheological behavior of mortars under different squeezing rates. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 39, n. 9, p. 748–753, 2009a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.05.014>.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Rheological behavior of mortars under different squeezing rates. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 39, n. 9, p. 748–753, 2009b. Disponível em: Acesso at: 20 Feb. 2022.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. BT/PCC/545: Squeeze-flow aplicado a argamassas de revestimento: Manual de utilização. [s. l.], p. 26, 2010a.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Squeeze-flow aplicado a argamassas de revestimento: Manual de utilização. **Boletim técnico da Escola Politécnica da USP**, [s. l.], v. 1, p. 1–36, 2010b.

CASAGRANDE, L. *et al.* Effect of testing procedures on buildability properties of 3D-printable concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 245, p. 118286, 2020. Disponível em: Acesso at: 21 Jun. 2022.

CHAVES FIGUEIREDO, S. *et al.* An approach to develop printable strain hardening cementitious composites. **Materials & Design**, [s. l.], v. 169, p. 107651, 2019. Disponível em: Acesso at: 2 Apr. 2022.

CHAVES FIGUEIREDO, S.; ÇOPUROĞLU, O.; SCHLANGEN, E. Effect of viscosity modifier admixture on Portland cement paste hydration and microstructure. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 212, p. 818–840, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819308645>.

CHEN, Y. *et al.* Effect of different grade levels of calcined clays on fresh and hardened properties of ternary-blended cementitious materials for 3D printing. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 114, n. March, 2020.

DAUNGWILAILUK, T.; PHEINSUSOM, P.; PANSUK, W. Uniaxial load testing of large-scale 3D-printed concrete wall and finite-element model analysis. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 275, p. 122039, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820340423>.

DEMIRBOĞA, R.; GÜL, R. The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 33, n. 5, p. 723–727, 2003. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884602010323>.

DING, T. *et al.* Hardened properties of layered 3D printed concrete with recycled sand. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 113, p. 103724, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946520302316>.

ENGMANN, J.; SERVAIS, C.; BURBIDGE, A. S. Squeeze flow theory and applications to rheometry: A review. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, [s. l.], v. 132, n. 1–3, p. 1–27, 2005. Disponível em: Acesso at: 16 Jun. 2022.

ETXEBERRIA, M.; VEGAS, I. Effect of fine ceramic recycled aggregate (RA) and mixed fine RA on hardened properties of concrete. **Magazine of Concrete Research**, [s. l.], v. 67, n. 12, p. 645–655, 2015.

FUJII-YAMAGATA, A. L. *et al.* Skin formation in adhesive mortars evaluated by MRI and interfacial rheology. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 99, n. May 2018, p. 251–261, 2019.

FUJIWARA, T. Effect of Aggregate on Drying Shrinkage of Concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 31–44, 2008. Disponível em: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jact/6/1/6\\_1\\_31/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jact/6/1/6_1_31/_article).

GRANDES, F. A. *et al.* Squeeze flow coupled with dynamic pressure mapping for the rheological evaluation of cement-based mortars. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 92, n. May, p. 18–35, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.05.016>.

GUPTA, T.; CHAUDHARY, S.; SHARMA, R. K. Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 112, p. 702–711, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652615010100>.

HAMBACH, M.; VOLKMER, D. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 79, p. 62–70, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.001>.

HAN, Y. *et al.* Environmental and economic assessment on 3D printed buildings with recycled concrete. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 278, p. 123884, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652620339299>.

HOU, S. *et al.* A review of 3D printed concrete: Performance requirements, testing measurements and mix design. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 273, p. 121745, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820337491>.

HUANG, S. C. *et al.* Production of lightweight aggregates from mining residues, heavy metal sludge, and incinerator fly ash. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 144, n. 1–2, p. 52–58, 2007.

ISIDRO-OJEDA, M. A.; CALDERÓN, A.; MARÍN, E. Thermal diffusivity of heptane-isooctane mixtures. **Thermochimica Acta**, [s. l.], v. 689, n. February, p. 178616, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2020.178616>.

JOSSERAND, L.; COUSSY, O.; DE LARRARD, F. Bleeding of concrete as an ageing consolidation process. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 36, n. 9, p. 1603–1608, 2006.

JOZWIAK-NIEDZWIEDZKA, D. Scaling resistance of high performance concretes containing a small portion of pre-wetted lightweight fine aggregate. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 27, n. 6, p. 709–715, 2005.

JÓŹWIAK-NIEDŹWIEDZKA, D. Scaling resistance of high performance concretes containing a small portion of pre-wetted lightweight fine aggregate. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 27, n. 6, p. 709–715, 2005. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946504001775>.

KALHORI, E. M. *et al.* Modeling of adsorption of toxic chromium on natural and surface modified lightweight expanded clay aggregate (LECA). **Applied Surface Science**, [s. l.], v. 287, p. 428–442, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.09.175>.

KATZER, J.; SZATKIEWICZ, T. Properties of concrete elements with 3-D printed formworks which substitute steel reinforcement. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 210, p. 157–161, 2019. Disponível em: Acesso at: 8 Jun. 2022.

KAZEMIAN, A. *et al.* Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 145, p. 639–647, 2017a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015>.

KAZEMIAN, A. *et al.* Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 145, p. 639–647, 2017b. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015>.

- KAZEMIAN, A. *et al.* Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 145, p. 639–647, 2017c. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015>.
- KHALIL, N. *et al.* Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D-printing mortars. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 157, p. 382–391, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.109>.
- KIM, K.-H. *et al.* An experimental study on thermal conductivity of concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 33, n. 3, p. 363–371, 2003. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884602009651>.
- KOKSAL, F.; MUTLUAY, E.; GENCEL, O. Characteristics of isolation mortars produced with expanded vermiculite and waste expanded polystyrene. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 236, p. 117789, 2020a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117789>.
- KOKSAL, F.; MUTLUAY, E.; GENCEL, O. Characteristics of isolation mortars produced with expanded vermiculite and waste expanded polystyrene. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 236, p. 117789, 2020b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117789>.
- KONIGSBERG, D. *et al.* Online process rheometry using oscillatory squeeze flow. **Applied Rheology**, [s. l.], v. 23, n. 3, p. 4–6, 2013.
- KRISTOMBU BADUGE, S. *et al.* Improving performance of additive manufactured (3D printed) concrete: A review on material mix design, processing, interlayer bonding, and reinforcing methods. **Structures**, [s. l.], v. 29, n. November 2020, p. 1597–1609, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.061>.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2014.
- LATHA, P. K.; DARSHANA, Y.; VENUGOPAL, V. Role of building material in thermal comfort in tropical climates - A review. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 3, p. 104–113, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.06.003>.
- LE, T. T. *et al.* Hardened properties of high-performance printing concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 42, n. 3, p. 558–566, 2012a.
- LE, T. T. *et al.* Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, [s. l.], v. 45, n. 8, p. 1221–1232, 2012b.
- LIM, S. *et al.* Developments in construction-scale additive manufacturing processes. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 262–268, 2012.
- LIU, J. *et al.* 3D-printed concrete with recycled glass: Effect of glass gradation on flexural strength and microstructure. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 314, p. 125561, 2022. Disponível em: Acesso at: 21 Jan. 2022.

LIU, M. *et al.* Tensile and flexural properties of 3D-printed jackets-reinforced mortar. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 296, p. 123639, 2021. Disponível em: Acesso at: 4 May 2022.

LOTFY, A.; HOSSAIN, K. M. A.; LACHEMI, M. Application of statistical models in proportioning lightweight self-consolidating concrete with expanded clay aggregates. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 65, p. 450–469, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.027>.

LU, B. *et al.* Designing spray-based 3D printable cementitious materials with fly ash cenosphere and air entraining agent. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 211, p. 1073–1084, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819306750>. Acesso at: 7 Mar. 2022.

LUCIO-MARTIN, T. *et al.* Thermal conductivity of concrete at high temperatures for thermal energy storage applications: Experimental analysis. **Solar Energy**, [s. l.], v. 214, p. 430–442, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X20312524>.

MA, G.; LI, Z.; WANG, L. **Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing**. [S. l.: s. n.], 2018a.

MA, G.; LI, Z.; WANG, L. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 162, p. 613–627, 2018b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.051>.

MECHTCHERINE, V. *et al.* Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: A review. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 132, p. 106037, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884619317132>.

MECHTCHERINE, V. *et al.* Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 107, n. August, p. 102933, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102933>.

MENDES, J. C. *et al.* Factors affecting the specific heat of conventional and residue-based mortars. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 237, 2020a.

MENDES, J. C. *et al.* Factors affecting the specific heat of conventional and residue-based mortars. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 237, 2020b.

METSÄ-KORTELAINEN, S. *et al.* Biomimetic building of 3D printed tailored structures. **VTT Research Reports**, [s. l.], v. VTT-R-0066, p. 0–16, 2014.

MOEINI, M. A.; HOSSEINPOOR, M.; YAHIA, A. 3D printing of cement-based materials with adapted buildability. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 337, p. 127614, 2022a. Disponível em: Acesso at: 16 Jun. 2022.

MOEINI, M. A.; HOSSEINPOOR, M.; YAHIA, A. 3D printing of cement-based materials with adapted buildability. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 337, p. 127614, 2022b. Disponível em: Acesso at: 2 Jul. 2022.

MOEINI, M. A.; HOSSEINPOOR, M.; YAHIA, A. Yield stress of fine cement-based mortars: Challenges and potentials with rotational and compressional testing methods. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 314, p. 125691, 2022c. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061821034255>. Acesso at: 28 Feb. 2022.

MUÑOZ-RUIPEREZ, C. *et al.* Lightweight masonry mortars made with expanded clay and recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 118, p. 139–145, 2016.

N SALEM, M LTIFI, H. H. Characterization of lightweight aggregates manufactured from Tunisian clay. **J. Sci. Res.**, [s. l.], 2014.

NBR 13276. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, [s. l.], n. Mm, p. 6, 2016.

NEPOMUCENO, M. C. S.; PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L. A.; PEREIRA, S. F. Mix design of structural lightweight self-compacting concrete incorporating coarse lightweight expanded clay aggregates. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 166, p. 373–385, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.161>.

NEPOMUCENO, M. C. S.; SILVA, P. D. Experimental evaluation of cement mortars with phase change material incorporated via lightweight expanded clay aggregate. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 63, p. 89–96, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.027>.

NERELLA, V. N. *et al.* Inline quantification of extrudability of cementitious materials for digital construction. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 95, n. March 2018, p. 260–270, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.09.015>.

NERELLA, V. N.; HEMPEL, S.; MECHTCHERINE, V. Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 205, p. 586–601, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.235>.

NERELLA, V. N.; MECHTCHERINE, V. Virtual Sliding Pipe Rheometer for estimating pumpability of concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 170, p. 366–377, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.003>.

NGUYEN, L. H. *et al.* Experimental study on the thermal properties of lightweight aggregate concretes at different moisture contents and ambient temperatures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 151, p. 720–731, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.087>.

NICOLINI, A. *et al.* Rheological behavior of fresh latex polymeric mortar by squeeze-flow technique. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 267, p. 121175, 2021a. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820331792>.

NICOLINI, A. *et al.* Rheological behavior of fresh latex polymeric mortar by squeeze-flow technique. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 267, p. 121175, 2021b.

Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820331792>. Acesso at: 26 Nov. 2021.

OMRANE, M.; RABEHI, M. Effect of natural pozzolan and recycled concrete aggregates on thermal and physico-mechanical characteristics of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 247, p. 118576, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118576>.

OZGUVEN, A.; GUNDUZ, L. Examination of effective parameters for the production of expanded clay aggregate. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 34, n. 6, p. 781–787, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.007>.

P. KUMAR MEHTA, P. J. M. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials** . 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

PANDA, B. *et al.* Synthesis and characterization of one-part geopolymers for extrusion based 3D concrete printing. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 220, p. 610–619, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.185>.

PANDA, B.; TAN, M. J. Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing. **Ceramics International**, [s. l.], v. 44, n. 9, p. 10258–10265, 2018a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.031>.

PANDA, B.; TAN, M. J. Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing. **Ceramics International**, [s. l.], v. 44, n. 9, p. 10258–10265, 2018b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.031>.

PANDA, B.; TAN, M. J. **Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing**. [S. l.: s. n.], 2018c.

PANDA, B.; UNLUER, C.; TAN, M. J. Investigation of the rheology and strength of geopolymer mixtures for extrusion-based 3D printing. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 94, n. November 2017, p. 307–314, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.10.002>.

PAPACHRISTOFOROU, M.; MITSOPOULOS, V.; STEFANIDOU, M. Evaluation of workability parameters in 3D printing concrete. **Procedia Structural Integrity**, [s. l.], v. 10, p. 155–162, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.09.023>.

PAUL, S. C. *et al.* Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 311–319, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2017.02.008>.

PERROT, A.; RANGEARD, D.; PIERRE, A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, [s. l.], v. 49, n. 4, p. 1213–1220, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-015-0571-0>.

PESSOA, S. *et al.* **3D printing in the construction industry - A systematic review of the thermal performance in buildings**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2021. Disponível em: Acesso at: 15 May 2021.

POMIANOWSKI, M. *et al.* A new experimental method to determine specific heat capacity of inhomogeneous concrete material with incorporated microencapsulated-PCM. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 55, p. 22–34, 2014. Disponível em: Acesso at: 7 Apr. 2022.

RAHEEM, A. A. *et al.* Investigation on thermal properties of rice husk ash-blended palm kernel shell concrete. **Environmental Challenges**, [s. l.], v. 5, p. 100284, 2021. Disponível em: Acesso at: 7 Apr. 2022.

RAHUL, A. v. *et al.* 3D printable concrete: Mixture design and test methods. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 97, n. March 2018, p. 13–23, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.12.014>.

RAHUL, A. V.; SANTHANAM, M. Evaluating the printability of concretes containing lightweight coarse aggregates. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 109, n. February, p. 103570, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946520300627>.

RASHAD, A. M. Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 170, p. 757–775, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.009>.

REAL, S. *et al.* Thermal conductivity of structural lightweight aggregate concrete. **Magazine of Concrete Research**, [s. l.], v. 68, n. 15, p. 798–808, 2016.

REMESAR, J. C. *et al.* Improved balance between compressive strength and thermal conductivity of insulating and structural lightweight concretes for low rise construction. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 247, p. 118448, 2020a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118448>.

REMESAR, J. C. *et al.* Improved balance between compressive strength and thermal conductivity of insulating and structural lightweight concretes for low rise construction. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 247, p. 118448, 2020b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118448>.

REMESAR, J. C.; VERA, S.; LOPEZ, M. Palavras-chave. [s. l.], v. 247, 2020.

RICHARD, R. B. Industrialised building systems: Reproduction before automation and robotics. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 442–451, 2005.

ROMANO, R. C. O. *et al.* Viscosidade cinemática de pastas cimentícias com incorporadores de ar avaliadas em diferentes temperaturas. **Cerâmica**, [s. l.], v. 58, n. 345, p. 58–65, 2012.

ROUSSEL, N. Rheological requirements for printable concretes. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 112, n. March, p. 76–85, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.005>.

ROUSSEL, N. *et al.* The origins of thixotropy of fresh cement pastes. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 42, n. 1, p. 148–157, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.09.004>.

ROUSSEL, N.; LANOS, C.; MÉLINGE, Y. Induced heterogeneity in saturated flowing granular media. **Powder Technology**, [s. l.], v. 138, n. 1, p. 68–72, 2003.

SACHT, H.M.; ROSSIGNOLO, J. A.; SANTOS, W. N. Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 31–39, 2010. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1517-70762010000100005&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762010000100005&lng=pt&tlng=pt).

SACHT, H. M.; ROSSIGNOLO, J. A.; SANTOS, W. N. Evaluation of thermal conductivity of lightweight concrete with expanded clay. **Revista Materia**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 031–039, 2010.

SALAZAR, A. On thermal diffusivity. **European Journal of Physics**, [s. l.], v. 24, n. 4, p. 351–358, 2003.

SALEH, A. N. *et al.* Improving the thermal insulation and mechanical properties of concrete using Nano-SiO<sub>2</sub>. **Results in Engineering**, [s. l.], v. 12, p. 100303, 2021. Disponível em: Acesso at: 7 Apr. 2022.

SANJAYAN, J. G. Efeito da umidade da superfície na resistência entre camadas do concreto impresso em 3D. [s. l.], p. 1–19, 2019.

SANJAYAN, J. G. *et al.* Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 172, p. 468–475, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.232>.

SARILAK, D. *et al.* Model-based design, synthesis and use of thermally insulating mortar formulations for energy conservation in buildings. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 276, p. 124287, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124287>.

SENGUL, O. *et al.* Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 43, n. 2–3, p. 671–676, 2011.

SIAMARDI, K. Optimization of fresh and hardened properties of structural light weight self-compacting concrete mix design using response surface methodology. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 317, p. 125928, 2022a. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061821036618>. Acesso at: 11 Mar. 2022.

SIAMARDI, K. Optimization of fresh and hardened properties of structural light weight self-compacting concrete mix design using response surface methodology. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 317, p. 125928, 2022b. Disponível em: Acesso at: 12 Apr. 2022.

SIKORA, P. *et al.* Thermal Properties of Cement Mortars Containing Waste Glass Aggregate and Nanosilica. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 196, n. June, p. 159–166, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.186>.

SOLTAN, D. G.; LI, V. C. A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 90, p. 1–13, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.017>.

SOLTANZADEH, F. *et al.* Development and characterization of blended cements containing seashell powder. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 161, p. 292–304, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.111>.

TAOUKIL, D. *et al.* Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood-concrete composite. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 48, p. 104–115, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.067>.

TAY, Y. W. D.; QIAN, Y.; TAN, M. J. Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 174, p. 106968, 2019. Disponível em: Acesso at: 4 May 2021.

TEIXEIRA, R. S. *et al.* Extrudability of cement-based composites reinforced with curauá (*Ananas erectifolius*) or polypropylene fibers. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 205, p. 97–110, 2019. Disponível em: Acesso at: 28 Feb. 2022.

TOUTOU, Z.; ROUSSEL, N.; LANOS, C. The squeezing test: A tool to identify firm cement-based material's rheological behaviour and evaluate their extrusion ability. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 35, n. 10, p. 1891–1899, 2005.

TUNSTALL, L. E.; LEY, M. T.; SCHERER, G. W. Air entraining admixtures: Mechanisms, evaluations, and interactions. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 150, p. 106557, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884621002064>. Acesso at: 12 Apr. 2022.

WENG, Y. *et al.* Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marston-Percy model. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 163, p. 600–610, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.112>.

WOLFS, R. J. M.; BOS, F. P.; SALET, T. A. M. Correlation between destructive compression tests and non-destructive ultrasonic measurements on early age 3D printed concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 181, p. 447–454, 2018a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.060>.

WOLFS, R. J. M.; BOS, F. P.; SALET, T. A. M. **Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing**. [S. l.: s. n.], 2018b.

WOLFS, R. J. M.; BOS, F. P.; SALET, T. A. M. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 119, n. March, p. 132–140, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.017>.

XIAO, J. Z.; SONG, Z. W.; ZHANG, F. An experimental study on thermal conductivity of concrete. **Jianzhu Cailiao Xuebao/Journal of Building Materials**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 17–21, 2010.

XU, F. *et al.* Effects of recycled ceramic aggregates on internal curing of high performance concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 322, p. 126484, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061822001763>. Acesso at: 27 Jan. 2022.

XU, J. *et al.* Mechanical properties and damage analysis of rubber cement mortar mixed with ceramic waste aggregate based on acoustic emission monitoring technology. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 309, p. 125084, 2021. Disponível em: Acesso at: 26 Apr. 2022.

YANG, L. *et al.* Factors affecting the effectiveness of internal curing: A review. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 267, p. 121017, 2021. Disponível em: Acesso at: 29 Jan. 2022.

ZHANG, J. *et al.* A review of the current progress and application of 3D printed concrete. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 125, n. April, p. 105533, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105533>.

ZHANG, Yu *et al.* Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 174, p. 263–271, 2018a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.115>.

ZHANG, Yu *et al.* Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 174, p. 263–271, 2018b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.115>.

ZHANG, Y. *et al.* Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 201, p. 278–285, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.061>.

ZHANG, L.; YUE, Y. Influence of waste glass powder usage on the properties of alkali-activated slag mortars based on response surface methodology. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 181, p. 527–534, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.040>.