



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE**  
**MATERIAIS**

**BREMMER CARNEIRO CAVALCANTE SOUTO**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO FATOR ÁGUA/CIMENTO NA CONFECÇÃO**  
**DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM ARGILA EXPANDIDA E SEUS**  
**IMPACTOS NA MICROESTRUTURA**

**JOÃO PESSOA – PARAÍBA- BRASIL**

**ABRIL – 2022**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE**  
**MATERIAIS**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO FATOR ÁGUA/CIMENTO NA CONFECCÃO**  
**DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM ARGILA EXPANDIDA E SEUS**  
**IMPACTOS NA MICROESTRUTURA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, da Universidade Federal da Paraíba, na Área de Materiais Cerâmicos, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

**Orientador:** Prof. Dr. Marçal Rosas Florentino  
Lima Filho

**JOÃO PESSOA – PARAÍBA- BRASIL**

**2022**

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

S728e Souto, Bremmer Carneiro Cavalcante.

Estudo da influência do fator água/cimento na  
confeção de compósitos cimentícios com argila  
expandida e seus impactos na microestrutura / Bremmer  
Carneiro Cavalcante Souto. - João Pessoa, 2022.  
64 f. : il.

Orientação: Marçal Rosas Florentino Lima Filho.  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Argamassa. 2. Argila expandida. 3. Desempenho  
mecânico. 4. Relação a/c. I. Lima Filho, Marçal Rosas  
Florentino. II. Título.

UFPB/BC

CDU 691.53(043)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Ata da defesa de dissertação de mestrado apresentada pelo aluno BREMMER CARNEIRO CAVALCANTE SOUTO, no dia 28 de abril de 2022.

Às nove horas e trinta minutos do dia 28 de abril de 2022, no Centro de Energias Alternativas e Renováveis da Universidade Federal da Paraíba (CEAR-UFPB), reuniram-se os membros da banca examinadora composta pelos Professores: Prof. Dr. MARCAL ROSAS F LIMA FILHO - UFPB/PPCEM (Presidente, Orientador), Prof<sup>a</sup>. Dra. RENATE MARIA RAMOS WELLEN - UFPB/PPCEM (Examinadora Interna), Prof. Dr. SANDRO MARDEN TORRES - (Examinador Externo ao Programa), a fim de avaliarem a dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, com título "Estudo da influência do fator água/cimento na confecção de compósitos cimentícios com argila expandida e seus impactos na microestrutura" de autoria do aluno BREMMER CARNEIRO CAVALCANTE SOUTO, matrícula 20191007040. A reunião foi aberta pelo Presidente da banca, que deu início aos trabalhos autorizando o candidato a iniciar sua apresentação. Concluídos os trabalhos de apresentação e de arguição, a Comissão Examinadora emitiu o seguinte parecer:

O discente fez sua apresentação em aproximadamente 30 min de forma clara e objetiva. Após a apresentação, a banca procedeu a arguição e comentários sobre o trabalho. A banca examinadora sugeriu pequenas alterações e correções de acordo com as versões corrigidas devolvidas ao aluno. Ao fim da banca, o discente foi considerado APROVADO.

O aluno é obrigado a realizar as sugestões da banca. Para constar, foi lavrada a presente ata, que vai assinada pelos membros da Comissão Examinadora além do referido discente que apresentou a defesa de seu mestrado.

---

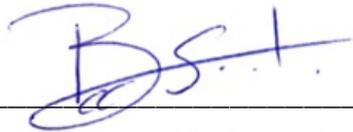
Prof. Dr. MARCAL ROSAS F LIMA FILHO - UFPB/PPCEM  
(Presidente, Orientador)

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. RENATE MARIA RAMOS WELLEN - UFPB/PPCEM  
(Examinadora Interna)

---

Prof. Dr. SANDRO MARDEN TORRES  
(Examinador Externo ao Programa)



---

BREMMER CARNEIRO CAVALCANTE SOUTO  
(Discente)

*Emitido em 28/04/2022*

**ATA Nº 1/2022 - PPECM (11.01.17.35)**  
**(Nº do Documento: 1)**

**(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)**

*(Assinado digitalmente em 04/05/2022 15:56 )*  
**SANDRO MARDEN TORRES**  
ASSESSOR  
3581068

*(Assinado digitalmente em 03/05/2022 12:19 )*  
**MARCAL ROSAS F LIMA FILHO**  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
1160815

*(Assinado digitalmente em 03/05/2022 13:04 )*  
**RENATE MARIA RAMOS WELLEN**  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
1666290

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sipac.ufpb.br/documentos/> informando seu número: **1**, ano: **2022**, documento (espécie): **ATA**, data de emissão: **03/05/2022** e o código de verificação: **6fd863d1ae**

*“Sucesso é a capacidade de ir de um fracasso a outro  
sem perda de entusiasmo.”*

**Winston Churchill**

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais,  
**Jacob e Patrícia,**  
por toda resiliência e incentivo no meu desenvolvimento.

## AGRADECIMENTOS

A **Deus**, por Sua eterna compreensão, permitir alcançar os objetivos traçados, e a **Nossa Senhora Maria Santíssima** por toda intercessão durante o percurso.

Ao Prof. Dr. **Marçal Rosas**, pela orientação, conhecimento, paciência e generosidade durante todo o processo. Acreditou no trabalho e contribuiu além da estrutura acadêmica, na minha vida.

Aos membros da banca examinadora, Prof<sup>ª</sup>. Dra. **Renate Maria Ramos Wellen** e Prof. Dr. **Sandro Marden Torres**, pela gentileza em participar da minha defesa.

Aos meus pais, **Jacob Silva Souto** e **Patrícia Carneiro Souto**, minhas referências na área acadêmica. Suas vidas, dedicadas à docência, demonstram o quanto acreditam na educação e na ciência. Sinto-me orgulhoso e privilegiado por ter grandes mestres ao meu lado.

A minha noiva, **Stéfany Lima Pontes**, por todo o incentivo, carinho e cuidado. Sua certeza na conclusão deste trabalho, serviu de combustível para que conseguisse finalizá-lo.

As minhas irmãs, **Ingrid e Samilly**, e toda minha família, pelo apoio e contribuição em toda minha vida.

Aos amigos do Laboratório TECNOMAT/UFPB e Laboratório de Materiais de Construção (UNIPÊ/PB), em especial a Nelly e Ricardo, por toda disponibilidade e amizade.

A todos que auxiliaram, direta ou indiretamente, para a realização do trabalho, o meu sincero agradecimento.

## RESUMO

A construção civil é considerada de fundamental importância para o desenvolvimento da economia mundial, respondendo pela criação de produtos e serviços essenciais, além de contribuir para a geração de empregos. O ambiente construído tem solicitado materiais cada vez mais avançados e com características específicas de desempenho. Dentro desse âmbito, o concreto e as argamassas tem papel fundamental para a produção de diversos elementos da construção civil. Sendo assim, o presente estudo objetivou avaliar o efeito da variação do fator água/cimento (a/c) para confecção de compósitos cimentícios leves, com substituição total do agregado natural pela argila expandida, e analisar o seu desempenho mecânico correlacionando com a microestrutura. Após caracterização do agregado, foi confeccionado 16 corpos de prova, na proporção (traço) 1:6 (cimento CP V - ARI: argila expandida 2,50mm), com 5,0 cm de diâmetro e 10 cm de altura, variando-se a relação água/cimento: T1 (a/c 0,5), T2 (a/c 1,0), T3 (a/c 1,2), T4 (a/c 1,3) e T5 (a/c 1,5). Realizou-se ensaio de resistência à compressão axial aos 7, 14, 21 e 28 dias, utilizando prensa hidráulica. Determinou-se a massa específica do compósito aos 28 dias, fator de eficiência e a absorção por capilaridade. Com o microscópio eletrônico de varredura (MEV) obteve-se informações sobre a morfologia, distribuição e porosidade dos compósitos. Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física do compósito o qualificam como compósito cimentício leve; observou-se, de maneira geral, que a resistência à compressão de todos os traços atingiu cerca de 80% da resistência final, aos 7 dias; a alta porosidade do compósito foi comprovada pela absorção de água nas primeiras horas de ensaio e, posteriormente, pelo ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura. Por apresentar o melhor fator de eficiência e menor absorção de água, o traço T2 com relação  $a/c = 1,2$  pode ser considerado o mais indicado para desenvolvimento de elementos construtivos (bloco, placa, telha), que satisfaçam, por exemplo, as exigências da NBR 15575. De maneira geral, com o alcance dos índices mecânicos preconizados em norma, observa-se a viabilidade técnica para aplicação desse material em edificações visando o aproveitamento de suas qualidades como contribuição para redução cargas nas estruturas das edificações, além de isolamento termoacústico.

Palavras-chave: Argamassa; Argila Expandida; Desempenho Mecânico; Relação a/c;

## **Influence of the water/cement ratio on the lightweight cementitious composites production with expanded clay and its impacts on the microstructure.**

### **ABSTRACT**

Civil construction is considered of fundamental importance for the development of the world economy, responsible for the creation of essential products and services, in addition to contributing to the generation of jobs. The built environment has required increasingly advanced materials with specific performance characteristics. Within this scope, concrete and mortars play a fundamental role in the production of various elements of civil construction. Therefore, the present study aims to evaluate the effect of the variation of the water/cement (w/c) ratio for the manufacture of lightweight cementitious composites, with total replacement of the natural aggregate by expanded clay, and to analyze its mechanical performance correlating with the microstructure. After characterizing the aggregate, 16 specimens were made, in the proportion (mix design) 1:6 (CP V cement - ARI: 2.50 mm expanded clay), with 5.0 cm in diameter and 10 cm in height, varying the water/cement ratio: T1 (w/c 0.5), T2 (w/c 1.0), T3 (w/c 1.2), T4 (w/c 1.3) and T5 (w/c 1.3) c 1.5). An axial compressive strength test was performed at 7, 14, 21 and 28 days, using a hydraulic press. The composite density at 28 days, efficiency factor and capillary absorption were determined. With the scanning electron microscope (SEM) information about the morphology, distribution and porosity of the composites was obtained. The results obtained in the tests of physical characterization of the composite qualify it as a light cementitious composite; it was observed, in general, that the compressive strength of all traces reached about 80% of the final strength, at 7 days; the high porosity of the composite was confirmed by the absorption of water in the first hours of testing and, later, by the Scanning Electron Microscopy test. As it presents the best efficiency factor and the lowest water absorption, the T2 mix with a w/c ratio = 1.2 can be considered the most suitable for the development of constructive elements (block, plate, tile), which satisfy, for example, the requirements of NBR 15575. In general, with the reach of the mechanical indexes recommended in the standard, it is possible to observe the technical feasibility for the application of this material in buildings, aiming to take advantage of its qualities as a contribution to reducing loads on the structures of the buildings, in addition to thermoacoustic insulation.

**Keywords:** Mortar; Expanded Clay; Mechanical Performance; w/c ratio;

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo de fabricação do Cimento Portland.....	18
Figura 2: Variedade de agregado leve: a) argila expandida; b) poliestireno (EPS); c) ardósia; d) xisto. ....	20
Figura 3: Tipos de argila expandida produzidas pela empresa brasileira CINEXPAN..	26
Figura 4: Espectro dos agregados leves e dos concretos correspondentes.....	29
Figura 5: Concreto leve: a) sem finos; b) com agregados leves; c) celular.....	33
Figura 6: Diferentes tamanhos de grãos de argila expandida.....	34
Figura 7: Planejamento experimental.....	37
Figura 8: Ensaio para determinação de massa específica do agregado leve, segundo a - NBR 16916:2021 .....	38
Figura 9: Ensaio de absorção de água pelo agregado leve, segundo a NBR 16916:2021 .....	39
Figura 10: Ensaio para determinação de massa unitária e índice de vazios, segundo a NBR 16972:2021 .....	40
Figura 11: Prensa Hidráulica utilizada no Ensaio de Resistência à Compressão .....	41
Figura 12 : Corpos de provas (CP's) envolvidos com filme PVC e devidamente identificados .....	42
Figura 13: Ensaio de absorção de água nos compósitos leves produzidos (NBR 9779:2012).....	43
Figura 14: Preparação de amostra para ensaio de microscopia e análise em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	44
Figura 15: Critério de Chauvenet .....	45
Figura 16: Curva de distribuição normal do Critério de Chauvenet.....	45
Figura 17: Faixas de probabilidade do Critério de Chauvenet .....	46
Figura 18: Preparação de compósito Traço 1 - (relação a/c: 0,5).....	49
Figura 19: Resistência à compressão.....	51
Figura 20: Fator de eficiência x Tempo de cura.....	53
Figura 21: Absorção de água do compósito cimentício leve.....	54
Figura 22: Resistência mecânica x Absorção de água.....	55
Figura 23: Imagem obtida por MEV, no modo BSED, onde pode ser observado os vazios do agregado (argila expandida) nas magnitudes: 100x (A), 200x (B), 500x (C) e 1000x D).....	56

Figura 24: Imagem obtida por MEV, no modo BSED, onde pode ser observado os vazios do compósito cimentício, incorporado com argila expandida, nas magnitudes: 100x (A), 500x (B) e 1000x (C), respectivamente. ....	57
Figura 25: Imagem do compósito cimentício leve obtida por MEV, com utilização de EDS.....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades e características do cimento CPV- ARI.....	35
Tabela 2: Composição química da argila expandida.....	36
Tabela 3: Ensaio realizados para caracterização do agregado leve .....	38
Tabela 4: Definição de traços para avaliação do desempenho dos compósitos .....	40
Tabela 5: Definição de Corpos de Prova (CP's) conforme à resistência à compressão.	41
Tabela 6: Composição granulométrica – NM 248:2003 .....	47
Tabela 7: Resultado do Ensaio de Massa Unitária .....	48
Tabela 8: Resultados do Ensaio de Massa Específica e Absorção de Água.....	48
Tabela 9: Resistência à compressão e massa específica do compósito cimentício leve.	49
Tabela 10: Resistência à compressão .....	50
Tabela 11: Classificação de blocos quanto ao uso – NBR 6136:2016.....	52
Tabela 12: Ensaio de absorção de água por capilaridade (NBR 9779:2012).....	54

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2. JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>16</b>
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	<b>17</b>
3.1 Objetivo geral .....	17
3.2 Objetivos específicos .....	17
<b>4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>18</b>
4.1 Cimento.....	18
4.2 Agregados leves.....	19
4.3 Argila expandida.....	22
4.4 Compósito cimentício leve .....	28
4.5 Compósito cimentício com argila expandida.....	32
<b>5. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>35</b>
5.1 Materiais .....	35
5.1.1 Cimento .....	35
5.1.2 Agregado leve .....	35
5.1.3 Água .....	36
5.2 Métodos utilizados.....	36
5.2.1 Caracterização do agregado leve.....	37
5.2.2 Produção de compósito cimentício leve.....	40
5.2.3 Propriedades do compósito no estado endurecido .....	41
5.2.4 Análise microestrutural .....	43
5.3 Critério de Chauvenet .....	44
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>47</b>
6.1 Caracterização do agregado leve .....	47
6.2 Resistência à compressão e massa específica .....	49
6.3 Fator de eficiência.....	52
6.4 Absorção de água x resistência mecânica.....	54
6.5 Microscopia eletrônico de varredura do compósito cimentício leve .....	56
<b>7. CONCLUSÕES</b> .....	<b>59</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>60</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da sociedade e o avanço tecnológico exigem do segmento da construção civil soluções que viabilizem a produtividade, qualidade e durabilidade das construções. Estudos desenvolvidos nas últimas décadas propiciaram à evolução de algumas técnicas, assim como o uso de materiais alternativos que permitiram a produção de estruturas leves, com excelente desempenho em eficiência energética, visando à melhoria do desempenho nas edificações.

A mecanização nos processos construtivos como forma de acelerar o processo de produção e, como consequência, a produtividade de estruturas de concreto, principalmente em elementos pré-fabricados, tem incentivado estudos mais aprofundados de estruturas com compósitos cimentícios leves (BORJA, 2011). De acordo com o autor, o emprego do concreto estrutural leve é recomendado em lugares com grandes aglomerações de edificações, devido ao seu bom desempenho como isolante térmico e acústico, e no caso de solos com reduzida capacidade de sustentação, em razão do peso próprio reduzido.

A escassez e divulgação de estudos sobre materiais de menor peso específico que podem ser utilizados na produção de compósitos leves aumenta a disparidade entre o setor da construção do Brasil e do resto do mundo, onde diversos países já possuem normas específicas e vem utilizando com sucesso essa técnica, com reflexos positivos na resistência mecânica e no custo final. Nesse contexto, a indicação de norma específica para o uso de compósitos leves no setor da construção civil é uma necessidade urgente, beneficiando financeiramente o setor, com reflexos positivos no tempo de execução e logística das obras.

Seu dimensionamento ainda segue conceitos semelhantes ao dimensionamento do concreto convencional, pois percebe-se uma carência de estudos e a falta de normas específicas para este fim (FERREIRA, 2015).

Segundo Abreu (2014) a redução da massa específica dos compósitos cimentícios com o uso agregado leve, comparado aos confeccionados com agregados convencionais, resulta em um menor peso próprio das estruturas. Desta forma, possibilita a utilização de elementos estruturais com seções menores e conseqüentemente, reduzir o dimensionamento das fundações.

Moravia et al. (2006) concluíram que a utilização da argila expandida como agregado graúdo é economicamente viável na fabricação de concretos devido à redução da massa específica que estes agregados proporcionam.

A argila expandida é um material de origem artificial obtido a partir da sinterização de uma mistura de argilas. O resultado é uma estrutura altamente porosa devido a liberação de gases durante o processo de produção. Sua massa específica está entre 450 e 800 Kg/m<sup>3</sup>. (ROSSO, 1973).

Alguns estudos sobre a microestrutura de concretos com agregados leves demonstraram que a interação entre esse tipo de agregado e a pasta de cimento é diferente da ocorrida nos concretos com agregados convencionais. A natureza da interação entre os agregados leves e a pasta de cimento depende essencialmente do teor de umidade e da porosidade permeável da região externa do agregado. (ROSSIGNOLO, 2009)

A substituição dos agregados convencionais por agregados leves pode ocasionar mudanças significativas em outras importantes propriedades dos compósitos, tais como: Resistência mecânica, Trabalhabilidade, Retração, entre outros (ROSSIGNOLO, 2009). Segundo o autor, a argila expandida tem natureza bem diversa da natureza dos agregados convencionais, como baixa resistência mecânica, estrutura porosa e elevados valores de absorção de água.

## 2. JUSTIFICATIVA

O setor de construção civil é considerado de fundamental importância para o desenvolvimento da economia mundial, respondendo pela criação de produtos e serviços essenciais, assim como contribuindo para a geração de empregos.

A produção de um compósito cimentício com adição de um agregado leve (argila expandida), podendo ser utilizada como elemento pré-fabricado (bloco de vedação ou telha) e material de enchimento, acarretará não somente na redução no peso das estruturas, como também, em um mundo tecnológico, onde a transmissão de informações se dá por meio de ondas eletromagnéticas (WiFi, 3G, 4G e 5G), possibilita uma maior conectividade aos ambientes.

Por se tratar de um material com alta porosidade, é necessário um estudo mais aprofundado sobre o seu processo de confecção, pois a água atua como elemento importante na variabilidade dos resultados esperados.

Por tudo isso, é fundamental desenvolver norma processo de confecção do compósito cimentício leve que satisfaça as exigências normativas, principalmente a NBR 15575:2013 (Norma de desempenho – Edificações habitacionais), que permita a produção de um produto que satisfaça a industrialização necessária para viabilizar seu uso na construção civil.

A falta de normatização dos compósitos cimentícios leves, permite que a produção de compósitos seja baseada em correlações com compósitos convencionais. A criação de normas específicas para os compósitos cimentícios leves, impulsionaria os estudos no desenvolvimento e produção de protótipos viáveis, economicamente e ambientalmente, para construção civil.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo geral**

O presente trabalho teve o objetivo de avaliar o efeito da variação do fator água/cimento (A/C) para confecção de compósitos cimentícios leves, com substituição total do agregado natural pela argila expandida, e analisar o seu desempenho mecânico correlacionando com a microestrutura.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- i. Caracterizar o agregado quanto às propriedades físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais;
- ii. Avaliar as propriedades do compósito endurecido, nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias.
- iii. Analisar a influência da relação A/C na porosidade do compósito e, conseqüentemente, na resistência à compressão.
- iv. Estabelecer o percentual ótimo de relação A/C a ser utilizado na produção de compósitos cimentícios com argila expandida, para criação de protótipo que satisfaça a Norma de Desempenho - NBR 15575:2013 .
- v. Correlacionar os resultados de desempenho mecânico com a microestrutura dos compósitos.

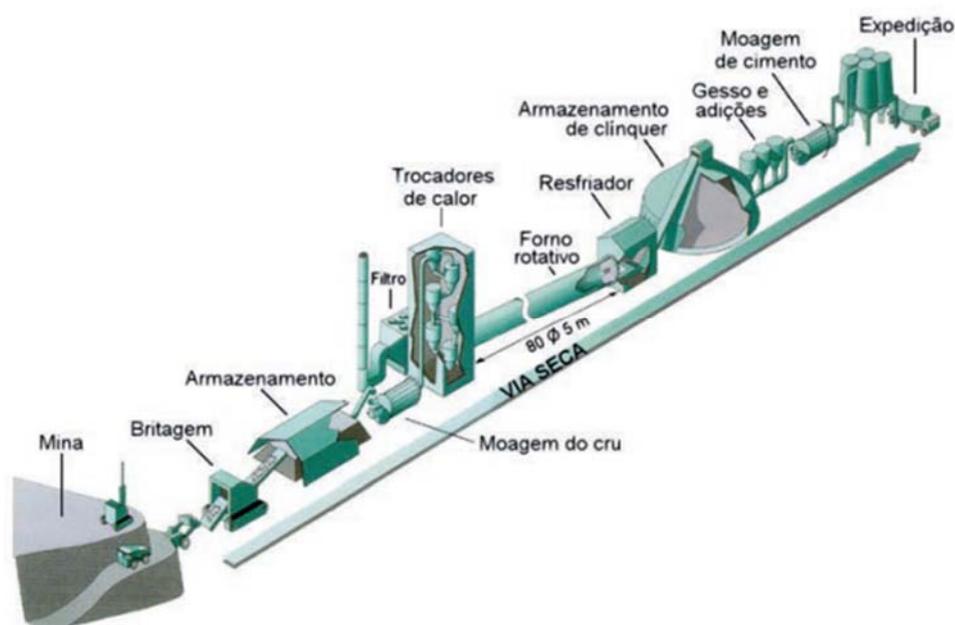
## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1 Cimento

A NBR 16697 (2018) define Cimento Portland como ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais.

O processo de fabricação cimento Portland, exposto na figura 1, inicia-se a partir de uma mistura de rocha carbonática e argila. Essa mistura, finamente moída, é submetida ao forno em temperaturas que chegam próximas a 1450 °C. O processo envolve calcinação, sinterização e peletização, no qual reações químicas transformam os minerais das matérias-primas em outros, dando origem ao clínquer Portland. O cimento é então obtido através da moagem do clínquer com aditivos (gesso, pozolonas, etc.). As proporções clínquer-aditivos são variáveis em função dos tipos de cimento Portland (SHIMADA, 1999).

Figura 1: Processo de fabricação do Cimento Portland.



Fonte: CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA - CNI (2017)

O cimento Portland é constituído de vários compostos anidros, e só adquire propriedades de aglomerante hidráulico a partir da sua mistura à água. Isto acontece porque as reações químicas do cimento com a água, chamadas hidratação geram produtos que possuem características de pega e endurecimento. Quando um cimento é hidratado, seus compostos reagem com a água para atingir estados estáveis de menor energia, pela liberação de calor. Assim, as reações de hidratação dos compostos do

cimento Portland são exotérmicas e decorrem do processo de fabricação do cimento, que no estado anidro é quimicamente instável e acumula energia latente (CAVALCANTI FILHO, 2010).

Os principais produtos do cimento, concretos e argamassas, são os materiais mais utilizados em construções pela sua versatilidade e facilidade de manuseio. A argamassa pode ser conceituada como um material obtido a partir da mistura, em proporções adequadas, de materiais inertes de baixa granulometria e de uma pasta com propriedades aglomerantes (LOPES e SILVA, 2022).

## 4.2 Agregados leves

A NBR NM 35/1995 classifica como agregados leves os que apresentam massas unitárias inferiores a  $1.120 \text{ kg m}^{-3}$ . Devido a formação da fase vítrea de alta resistência em alguns agregados leves, permite que sejam considerados resistentes e duráveis, onde existe a presença de um sistema de poros internos que variam de  $5 \mu\text{m}$  a  $300 \mu\text{m}$ , estando distribuídos de maneira uniforme e praticamente com fissuras ausentes. (BORJA, 2011).

Gomes Filho (2015) afirma que os agregados leves podem ser constituídos por incorporadores de ar, sílica, argila expandida, resíduos da indústria e demais materiais com massa específica reduzida, o que irá permitir a redução da massa específica da peça ao final, exemplificados na figura 2. Os agregados leves comumente encontrados são originados a partir de minerais expandidos que, por possuírem quantidades significativas de ar em seu interior, apresentam como características principais a leveza e os isolamentos acústico e térmico.

Salienta Farias (2009) que há ocorrência de grande variedade de tipos de agregados leves, conforme figura 1, sendo estes classificados, conforme a sua natureza, em agregados naturais e artificiais. Como agregados leves naturais pode-se destacar a pedra-pomes e as escórias vulcânicas. A pedra-pomes é de origem vulcânica, resultante do rápido arrefecimento ao ar da lava, sendo este o agregado mais antigo e o mais leve. É uma rocha não vitrificada de natureza ácida (aproximadamente 70% de sílica), com estrutura interior celular constituída por milhões de bolhas de ar de dimensão variável, que se desenvolveram com sua solidificação. Esse agregado possui excelente comportamento térmico, porém, são fracos do ponto de vista estrutural. Em diversos

países da Europa este material é exclusivamente utilizado em elementos não armados, como é o caso de pré-fabricados leves para alvenarias, lajetas para isolamento e painéis pré-fabricados. Já as escórias vulcânicas são rochas densa, com poros maiores, paredes vitrificadas e mais espessas, o que lhe atribui resistência superior às da pedra-pomes.

Ainda de acordo com o supracitado autor os agregados leves produzidos artificialmente são desenvolvidos de acordo com a disponibilidade de matéria-prima de cada país. Na Alemanha e Noruega os agregados leves frequentemente utilizados são as argilas expandidas Liapor e LECA (Light Expanded Clay Aggregate). Já em Portugal e Espanha são utilizadas as argilas expandidas Leca e Arlita, respectivamente, sendo que estas apresentam restrição em sua resistência. Nos últimos anos na Holanda e Reino Unido os agregados leves são produzidos a partir de cinzas volantes (Lytag e Aardelite) que são obtidas da combustão do carvão pulverizado nas centrais térmicas. Já nos Estados Unidos são utilizados com frequência os xistos expandidos.

Figura 2: Variedade de agregado leve: a) argila expandida; b) poliestireno (EPS); c) ardósia; d) xisto.



Fonte: Adaptado YOON et al. (2015)

O uso do agregado leve necessita de adequações na composição do esqueleto granular, salientam Vervloet et al. (2019), visto que o mesmo possui características físicas, como massa específica e porosidade, altamente díspares dos agregados convencionais. O método de composição mais adequado foi o que considerou a

proporção volumétrica entre os agregados graúdo e miúdo. A viabilidade da utilização deste material encontra-se principalmente na redução da massa específica do conjunto, fator determinante na composição do custo total de uma obra. Outro ponto a ser considerado é a limitação da capacidade mecânica decorrente da aplicação da argila expandida, além da necessidade de um severo controle técnico no momento da produção deste material.

O agregado leve possui menor resistência do que os convencionais, no entanto, essas características podem contribuir positivamente no comportamento mecânico do material quando comparado ao concreto leve estrutural (CLE) produzido com outros agregados (ROSSIGNOLO, 2009).

Para que os agregados leves tenham a microestrutura da zona de transição semelhante ao observada nos concretos com agregados convencionais recomenda-se que sejam previamente saturados ou apresentarem uma camada externa com baixa porosidade permeável. Essa zona de transição em concreto com agregados leves com porosidade permeável na face externa, como a argila expandida brasileira, apresenta natureza distinta da observada nos concretos com agregados tradicionais, sendo a espessura da zona de transição em concretos produzidos com argila expandida, foi de 30  $\mu\text{m}$ , enquanto nos concretos com agregado basáltico foi de 55  $\mu\text{m}$ . A adição da argila expandida promove a redução da espessura da zona de transição assim como da porosidade e do teor de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), em função da diminuição da relação água/cimento da pasta nessa região pela absorção de água do agregado leve, denominado densificação. (ROSSIGNOLO, 2009).

Os agregados leves segundo Farias (2009) são usados na fabricação de concreto com o objetivo de diminuir o peso em determinadas estruturas, permitindo um melhor isolamento térmico quando comparado ao concreto de densidade normal, devido à intrínseca porosidade destes agregados. Conforme o autor, tem-se verificado o uso mais frequente de agregado leve na composição do concreto leve que vem sendo utilizado nas mais diversas e complexas estruturas como plataformas petrolíferas, pontes (incluindo as flutuantes), edifícios de grande altura à reabilitação e pré-fabricação.

O uso de agregados leves na composição do concreto leve, apesar de atribuir uma resistência inferior, é um material vantajoso para a utilização na construção civil, onde a redução em sua massa específica é uma característica desejada para as estruturas de concreto armado, onde se constata redução nos esforços solicitantes gerados pelo seu

peso, refletindo diretamente na redução dos custos das construções de forma global (SCOBAR, 2016).

Os agregados leves utilizados na produção do concreto de baixas densidades podem ser naturais ou artificiais. Os agregados leves naturais, obtidos a partir da extração em jazidas, são pouco utilizados em concretos estruturais devido à variação de suas propriedades e à pouca disponibilidade. Já os agregados leves artificiais, são produzidos através de processos industriais. As argilas expandidas apresentam formatos excessivamente arredondados e superfícies polidas, resultantes do processo de produção em fornos rotativos. Independente do processo industrial, os agregados leves, devido a sua porosidade, absorvem água e, em consequência disso, afetam significativamente outras propriedades dos concretos e o processo de hidratação do cimento (MAYCÁ; RECENA; CREMONINI, 2008).

O conhecimento das características dos agregados leves é de grande importância para definir onde podem ser utilizados pois, devido à sua maior porosidade há maior limitação de resistência obtida pelo concreto. Dessa forma, estudos buscaram potencializar a produção e utilização de concretos leves na construção civil (FARIAS, 2021).

### **4.3 Argila expandida**

A argila expandida (AE) é o produto obtido por aquecimento de alguns tipos de argila na temperatura em torno de 1200 °C (SANTOS, 1992). Próximo desta temperatura, uma parte dos constituintes do material se funde gerando uma massa viscosa, enquanto a outra parte se decompõe quimicamente liberando gases que são incorporados por esta massa sintetizada, expandindo-a em até sete vezes o seu volume inicial. Esses gases, retidos no interior da argila, não podem escapar para o seu exterior devido à fase líquida que envolve as partículas da argila. Ao ser resfriada mantém ainda a estrutura porosa, de modo que, a massa específica aparente do material resultante do processo de sinterização contínua, fique compreendida na faixa entre 650 kg m<sup>-3</sup> e 900 kg m<sup>-3</sup> e os produzidos em forno rotativo, entre 300 kg m<sup>-3</sup> e 650 kg m<sup>-3</sup>. Em relação trabalhabilidade dos concretos, a granulometria do agregado e o fator água/cimento exercem influência e devem ser considerados em conjunto, pois quanto menor for a granulometria do agregado maior será a quantidade de água necessária para envolver os

grãos do mesmo, formando uma película d'água responsável por uma boa trabalhabilidade (MEHTA.; MONTEIRO, 1994).

Segundo Moncada et al. (2019), quando aquecida à altas temperaturas a argila emite gases, expandindo-se em até sete vezes seu volume inicial. Esses mesmos gases não são emitidos ao exterior sendo retido na argila após o resfriamento, assim diminuindo a massa unitária do material, sendo utilizada em concreto leve, possuindo uma densidade aparente de  $500 \text{ kg m}^{-3} \pm 10 \%$ . Com a redução significativa na sua massa específica, o concreto leve torna-se benéfico para sua utilização na construção civil, já que apresenta uma redução no peso próprio de estruturas de concreto armado, pois minimiza os esforços solicitantes neste tipo de estruturas. A utilização desse concreto em obras civis proporciona melhorias no custo total de construções, com consequente redução no custo integral da obra.

Moravia et al (2006) relataram que a argila expandida apresenta alta porosidade em relação aos agregados convencionais, devido à estrutura porosa dos seus grãos, o que também aumenta sua absorção de água. Segundo estes autores, essa elevada absorção de água, quando não prevista, pode ser prejudicial ao concreto, reduzindo sua trabalhabilidade. Além disso, parte da água necessária para a hidratação dos compostos do cimento será absorvida por este agregado, reduzindo, possivelmente, a resistência mecânica do concreto.

Dentre as principais vantagens de utilizar a argila expandida como agregado para concreto estão a baixa densidade, que pode ser até 2,5 vezes menor que a brita, e a inércia química, que evita efeitos adversos sobre a pasta de cimento ou a armadura. (MONCADA et al.2019). Além disso, quando se trata de conforto térmico, o concreto leve com argila expandida tem desempenho superior ao concreto convencional, característica importante em um país tropical como o Brasil (FERREIRA, 2015).

A adição de agregado leve como a argila expandida reduz a massa específica seca abaixo de  $2000 \text{ kg m}^{-3}$  nos concretos leves em comparação aos concretos convencionais e apresentam significativas mudanças em algumas propriedades, como trabalhabilidade, resistência mecânica, modulo de deformação e retração. As propriedades térmicas dos concretos leves apresentam diferenças das analisadas nos concretos tradicionais, sobretudo devido à quantidade de vazios na estrutura celular dos agregados leves. Essa característica obtida reduz a transferência e a absorção de calor em relação aos agregados tradicionais (ROSSIGNOLO, 2009).

O conhecimento das características da argila expandida é importante para a fabricação dos concretos, auxiliando na compreensão das reações físico-químicas que ocorrem na sua interface com a matriz de cimento. Devido à sua alta porosidade, a argila expandida proporciona uma redução da resistência mecânica dos concretos (WASSERMAN; BENTUR, 1996).

As argilas expandidas com suas propriedades mecânicas próprias, ao serem adicionadas em concretos, influencia sua composição final, como também no comportamento da mistura fabricada. O concreto com agregados leves de argila expandida (AE) apresenta menor resistência à compressão quando comparado ao concreto convencional para a mesma proporção de mistura, e isso é atribuído a menor resistência da AE quando comparada à do agregado convencional (MORAVIA; GUMIERI; VASCONCELOS, 2010).

Os concretos produzidos com argila expandida, segundo Rossignolo (2009), possuem zona de transição pasta/agregado menor do que os concretos produzidos com outros agregados, inclusive os naturais. Apesar do agregado leve ser menos resistente do que os convencionais, essas características podem contribuir positivamente no comportamento mecânico do material quando comparado aos concretos leves estruturais (CLE) produzidos com outros agregados. É importante ressaltar que os concretos produzidos com agregados leves se comportam de maneira distinta aos produzidos com agregados convencionais e ocorre menor hidratação dos grãos de cimento nessa região, provocando diminuição da relação água/cimento e permeabilidade no concreto.

Relata Pereira (2008) que pesquisadores nos últimos tempos buscam soluções no aproveitamento de materiais, avaliando o uso da argila expandida como agregado leve para a produção de concreto, dando assim um melhor aproveitamento desse material, que ainda se restringe a elementos de vedação (painéis de paredes). Enfatizam Angelim et al. (2017) que o avanço das pesquisas em busca de novos materiais e técnicas surgiu o conceito de concretos especiais, como o concreto com agregados leves, que se destacam pelo excelente desempenho quanto à redução da massa específica e ao conforto térmico.

A evolução nas últimas décadas na tecnologia do concreto com a contribuição de diversos pesquisadores (ROSSIGNOLO, 2009; BEKTAS et al., 2012; IBRAHIM et al., 2013), foi fundamental na definição e estabelecimento de algumas técnicas e o uso de materiais alternativos aos convencionais, como a argila expandida, buscando assim melhorias nas propriedades e durabilidade dos concretos. Com o desenvolvimento

destes novos materiais e técnicas surgiu o conceito de concretos especiais, como o concreto com agregados leves, caracterizado pelo seu excelente desempenho quanto à redução da massa específica e ao conforto térmico (ANGELIN et al., 2017).

Conforme relatos de Souza et al. (2022), concretos contendo argila expandida, com ou sem sílica ativa, podem ser considerados leves. Ao adicionar a sílica ativa, o desempenho mecânico dos concretos leves foi aumentado sem ser necessário incorporar um maior teor de cimento Portland, resultando em menores impactos ambientais para produção do concreto leve. Portanto, a argila expandida como agregado leve é uma alternativa viável para preparação de concretos, sendo recomendada a sua utilização com sílica ativa para melhoria das propriedades mecânicas.

Propriedades do concreto no estado fresco, como trabalhabilidade e fluidez podem ser influenciadas pelo formato arredondado da argila expandida (AE), interferindo nas características morfológicas como a angularidade, a esfericidade e a textura superficial. As características morfológicas dos agregados segundo a FHWA (Texas Department of Transportation e pela Federal Highway Administrations), influenciam no desempenho estrutural e na resistência de estruturas. Classificar de forma precisa é essencial para o entendimento da relação entre o agregado e a matriz da mistura que o envolve (NUNES et al., 2021).

Para se obter um concreto leve estrutural, recomenda-se a utilização da argila expandida, que pode ser incorporada através de substituições parciais ou totais do agregado graúdo. Salienta-se que há outros agregados leves disponíveis no mercado, porém o uso desses está limitado apenas a produção de concretos leves isolantes que não preservam características para uso com fins estruturais. Diante do exposto, é importante destacar que o emprego da argila expandida proporciona uma melhora no isolamento térmico e acústico devido à porosidade em seu interior, entretanto, algumas propriedades mecânicas podem ser prejudicadas (OLIVEIRA et al., 2019).

ANGELIN et al (2017) avaliando o conforto térmico exercidos pelos concretos leves estruturais concluíram que os índices obtidos no ensaio de condutividade térmica, por meio do método da placa quente protegida, nos concretos com 100% de argila expandida foram menores em comparação ao concreto com agregado natural, apresentando valor máximo de condutividade térmica de 1,00 W/mK. E de acordo com as informações de dosagem obtidas no estudo, observou-se que os concretos leves produzidos podem ser utilizados em elementos pré-moldados, devido, principalmente, à diminuição no tempo de moldagem e do peso próprio. O concreto leve pode ser

aplicado em elementos estruturais ou de vedação, como painéis de concreto e lajes alveolares, devido essencialmente à redução da massa específica e ao excelente desempenho nas propriedades mecânicas, com a fabricação de peças leves, que proporcionam maior conforto térmico sem comprometer a função estrutural.

Segundo Rossignolo (2009), a argila expandida brasileira influencia na microestrutura da zona de transição pasta/agregado em concretos leves estruturais e, logo, nas propriedades desse material. O concreto leve estrutural apresenta ampla utilização em função dos benefícios promovidos pela redução da massa específica, como a redução de esforços na estrutura, a economia com formas e cimbramento, como também a redução dos custos com transporte e montagem de construções pré-fabricadas. Essa substituição dos agregados convencionais por agregados leves pode ocasionar alterações significativas em outras importantes propriedades do concreto, tais como resistência mecânica, módulo de deformação, estabilidade dimensional e isolamento térmico.

O processo de fabricação da argila expandida no Brasil é realizado em forno rotativo a uma temperatura de 1.200 °C, na região de Várzea Paulista, no Estado de São Paulo, sendo sua comercialização feita em sacos de 50L ou a granel. Esse agregado leve possui propriedade de isolante térmico e é constituído por uma crosta microporosa rígida e de alta resistência, com o interior formado por uma massa cerâmica porosa, denominadas Cinexpan 3222, Cinexpan 2215, Cinexpan 1506, Cinexpan 0500e Cinexpan laminado 2,5 mm, demonstradas na figura 3. Esse produto natural apresenta como principais propriedades ser um material incombustível de baixa densidade, alta porosidade e que não se degrada com o tempo (CINEXPAN, 2000).

Figura 3: Tipos de argila expandida produzidas pela empresa brasileira CINEXPAN



Fonte: CINEXPAN (2000)

A fabricação da argila expandida em fornos rotativos, aumenta a característica de arredondamento das partículas produzindo uma casca vitrificada, resistente e de baixa permeabilidade, resultando em uma conformação polida dos grãos e textura superficial das argilas expandidas com menor aderência se comparada ao agregado convencional. Apresenta também comportamento distinto na interação entre o agregado e a matriz de cimento na zona de transição, devido a aspectos de rugosidade e absorção de água (NUNES et al., 2021).

No Brasil, a produção de argila expandida é exclusiva a um único fabricante, sendo direcionada, principalmente, para a indústria têxtil (estonagem de “jeans”) e de ornamentação (decoração de jardins). No entanto, a utilização da argila expandida como agregado graúdo é economicamente viável na fabricação de concretos pois, a redução da massa específica proporcionada por estes agregados, reduzem os carregamentos atuantes nas estruturas. No entanto, recomenda-se que na preparação de um traço de concreto utilizando argila expandida, seja feita uma composição granulométrica deste agregado, para que a mesma corresponda à granulometria do agregado convencional (MORAVIA et al., 2006).

Santis et al. (2013) afirmam que, no Brasil, a utilização dos concretos com agregados leves ainda é modesta, frente ao seu potencial de utilização, estando concentrada no estado de S. Paulo e em estados vizinhos, dada a localização da fábrica de argila expandida CINEXPAN, em Várzea Paulista - SP, único fabricante de agregados leves no país. Por se tratar de uma única empresa produtora, o alto custo do transporte a longas distâncias dificulta a disseminação dessa tecnologia por todo o território nacional.

A argila expandida (AE) em sua forma original, solta e sem outros aditivos, pode ser utilizada na construção civil para enchimentos leves, na formação de concreto leve e em nata de cimento ou na troca do solo (geotecnia). Os tipos mais comuns de argila expandida são a AE 0500 (diâmetro das partículas até 5mm), utilizado normalmente em concreto leve e enchimento até 5cm, a AE 1506 (diâmetro das partículas entre 6 e 15mm), também utilizado em concreto leve e enchimento até 5cm e a AE 2215 (com diâmetro das partículas até entre 15 e 22mm), utilizado em enchimento de vazios, isolamento térmico e paisagismo. Ressalta-se que as propriedades químicas permanecem as mesmas após o processo de fabricação. No entanto, a densidade aparente e a massa específica são distintas entre as classes, pois a variação da dimensão do grão implica em diferentes índices e vazios no interior dos grãos. Já a condutividade

térmica e o isolamento acústico apresentam comportamento semelhantes para as classes citadas. Já em relação à resistência ao esmagamento, verifica-se que quanto menor é o grão, maior é a resistência obtida (NUNES et al., 2021).

Atualmente, com o aumento da demanda da construção civil e ao déficit de agregados leves naturais, agregados leves de argila expandida aparecem como uma das únicas opções de agregados leves para a produção de concretos estruturais leves no Brasil (SANTIS; ROSSIGNOLO, 2015)

#### **4.4 Compósito cimentício leve**

Os compósitos são a união de dois ou mais materiais distintos com o objetivo de formar um terceiro material que tenha características específicas dos materiais utilizados. Para Callister (2005), compósito é qualquer material multifásico que exhibe uma proporção de propriedades das fases matriz e fibras, de tal maneira que uma melhor combinação de propriedades é realizada.

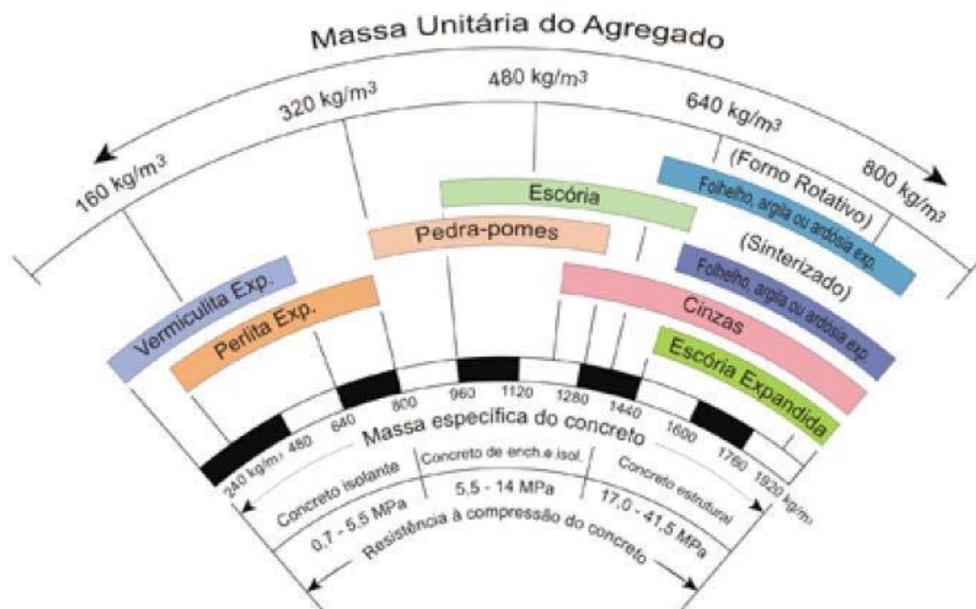
Dentre os diversos materiais que podem ser aproveitados na preparação de compósitos cimentícios Silva et al. (2018) sugerem que a fibra de coco pode ser aproveitada e assim diminuir o consumo de agregados minerais como areia e brita, e melhorar propriedades físicas e mecânicas de um compósito cimentício. No entanto, um dos pontos que requer mais estudos está relacionado à degradação acelerada da fibra vegetal pela ação química da matriz cimentícia. Os autores constataram que a incorporação dessa fibra vegetal tratadas com o teor proposto de 10% p/p diminui a massa específica e melhora o desempenho termoacústico do novo compósito em até 20%. As propriedades do novo compósito (massa específica reduzida e atenuação térmica/sonora) associadas à elevada resistência à tração na flexão e resistência à compressão sugerem que este material pode ser aproveitado na construção civil para produção de tijolos.

Os polos cerâmicos são geradores de grande volume de resíduos que poderão ser reaproveitados em matrizes cimentícias na substituição do cimento Portland. Resíduos de telhas cerâmicas e isoladores elétricos de porcelana, moídos finamente são chamados de filer cerâmicos, com granulometria similar ao cimento Portland, possuem atividade pozolânica, ou seja, capacidade de endurecer e oferecer resistência mecânica, quando misturado com água. Os resíduos da cerâmica vermelha, em especial telhas e blocos, e da cerâmica branca, isoladores elétricos de porcelana, são os materiais mais indicados

para serem reutilizados na construção civil na produção de argamassas com matrizes cimentícias com baixo teor de cimento Portland. Para isso foram avaliados o teor máximo de utilização do cimento Portland, fixado em 70% e os 30% de material aglomerante distribuído com 10% de sílica ativa e 20% de filer cerâmico, e a relação água-cimento fixada em 0:55 para todos os traços. Concluíram que os resíduos cerâmicos testados são indicados para utilização como filer pozolânico em matrizes cimentícias com baixo teor de cimento, pois possuem matérias-primas similares ao cimento Portland, devendo filers cerâmicos serem utilizados em conjunto com a sílica ativa, que também apresenta propriedade pozolânica, propiciando, assim, para maiores ganhos de resistência. A incorporação destes filers em argamassas com baixo teor de cimento mostrou ser benéfica, pois os traços com filer atingiram valores de resistência à compressão simples, similares e até superiores ao traço de referência CAMPOS et al., (2022).

Em substituição total ou parcial aos agregados convencionais existem diversos agregados leves que podem ser utilizados objetivando a massa específica dos concretos. Dentre eles pode-se destacar a pumicita (pedra pomes), a vermiculita, a cinza volante sintetizada, a escória de alto forno expandida, a argila expandida e alguns resíduos industriais (FARIAS, 2009).

Figura 4: Espectro dos agregados leves e dos concretos correspondentes.



Fonte: ABREU (2014)

A utilização de agregados leves na produção de concretos leves tem como maior vantagem um produto com peso específico menor que o concreto convencional e isso facilita sua implementação em locais que precisam de cargas reduzidas, como em projetos de reforma, onde a estrutura base não será modificada e conseqüentemente tem-se limites de cargas máximas (CALDERAN, 2019).

Por apresentar tais resultados e características, os concretos leves têm sido utilizados desde o começo deste século, tanto para fins estruturais como para estruturas de vedação. Por apresentar baixos valores quanto à massa específica, o uso do concreto leve reduz significativamente o peso próprio dos elementos, influenciando diretamente na estrutura de fundação, na facilidade de transporte das peças, com reflexos diretos no custo final da construção (ANGELIN et al., 2017).

A utilização de agregados leves como cinza volante, vidro triturado, poliestireno expandido (EPS), casca de arroz, resíduo de construção civil (RCC), vermiculita, argila expandida, aerogel, agente espumante e sílica ativa tem contribuído para a produção de concretos leves que propiciam melhor desempenho térmico e acústico, em função de sua massa específica reduzida (LUCAS, 2021).

Os processos industriais segundo De Oliveira et al. (2022) são geradores de grandes volumes de resíduos que são cada vez mais estudados e utilizados como materiais alternativos para a indústria da construção. É o que acontece com concretos leves com adição de grãos de Etileno-Acetato de Vinila (EVA), subproduto da indústria calçadista e reforçados com fibras de piaçava, nativas da região sul da Bahia. Nos últimos anos, tem-se avançado estudos direcionados a compreender e determinar o potencial desses novos materiais com o uso de ensaios não-destrutivos, que mantêm a estrutura do material ensaiado, evitando perdas de materiais e descartes desnecessários.

Conhecer as vantagens do uso do concreto leve é fundamental, principalmente por questão de segurança, de modo a avaliar o seu desempenho nas mais variadas situações em que possa ser submetido. O conhecimento do comportamento residual do concreto leve não estrutural com pérolas de poliestireno expandido (EPS) após situação de incêndio e resfriamento rápido é de fundamental importância, de modo a reduzir os efeitos nocivos causados por incêndios, uma vez que estruturas de concreto eventualmente são expostas a situações de incêndio controladas por meio de resfriamento rápido com água. Os concretos com EPS leves estão dentro do preconizado pela legislação -NM 35 (ABNT, 1995) -e podem ser utilizados em aplicações não estruturais, com valores médios de resistência à compressão de 7 MPa após queima no

forno e gasolina juntamente com reidratação. No entanto, a escassez de estudos sobre o comportamento do concreto em condições de elevadas temperaturas provenientes de um incêndio, ainda mantém muitas respostas que carecem ser descobertas, devendo-se também padronizar os ensaios experimentais de modo que se obtenham parâmetros que possam ser comparados (CARVALHO; SANTOS, 2022).

Carvalho Matos et al. (2021) em estudo prospectivo sobre as argamassas cimentícias contendo cinzas do bagaço de cana-de-açúcar em substituição (parcial) tanto da areia quanto a do cimento, constataram que a reutilização de resíduos de biomassa é uma linha de grande aplicabilidade na área da construção civil. Cinzas do bagaço de cana-de-açúcar aplicadas em teores que variam entre 7,5 – 40% e 5 - 20% em substituição parcial da areia e do cimento, respectivamente, favorece positivamente as propriedades (reológicas, mecânicas e de durabilidade) dos seus produtos. O reaproveitamento dos resíduos das usinas sucroalcooleiras pela indústria de construção civil na produção de argamassas cimentícias, reduz significativamente as extrações de matérias-primas naturais e as emissões de gases de efeito estufa durante os processos produtivos, podendo contribuir em inovações e descobertas, como potencial solução sustentável para o setor.

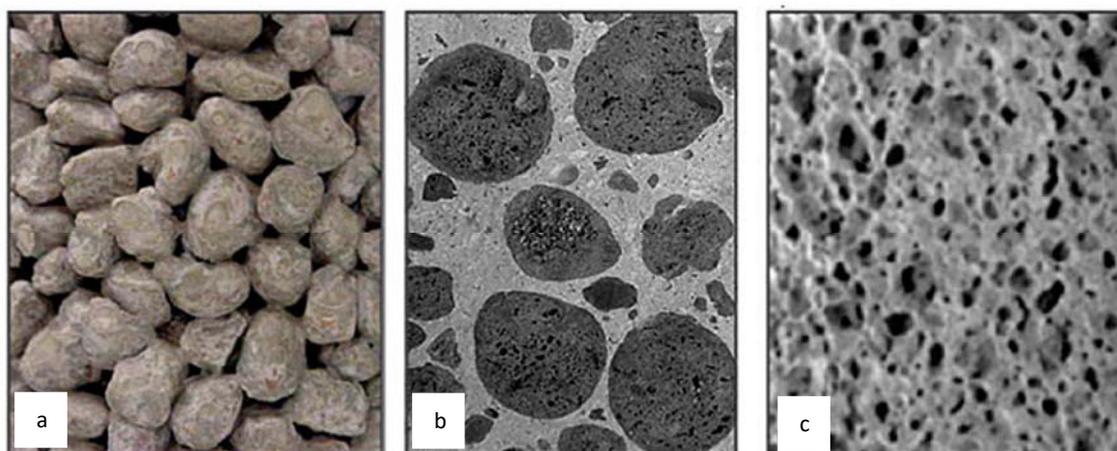
De acordo com Silva et al. (2014) a atividade da construção civil, ao mesmo tempo em que é grande consumista de recursos naturais, tem potencial para absorver resíduos industriais (EVA - Etil Vinil Acetato) que são descartados em grande quantidade no meio ambiente. Uma opção é a utilização desse material como agregados leves utilizados para a produção de concreto e argamassas leves, fato esse que se justifica pela grande variedade de matérias-primas e pelo grande número de componentes aplicados no processo da construção civil. Devido às características específicas do concreto leve, surge a necessidade de reforço desses materiais. Daí surge a opção de utilizar a fibra da palmeira piaçava (*Attalea funifera* Martius), uma excelente alternativa como elemento de reforço em misturas de cimento leve. Nesse contexto, ao testar a resistência mecânica de um compósito cimentício leve com EVA e Fibras de Piaçava verificou-se que com a utilização de EVA na mistura da argamassa há uma queda de resistência mecânica, entretanto, essa queda de resistência é menos acentuada quando inserido 1% de fibra na mistura. Com a adição de fibras de piaçava na matriz cimentícia há um aumento na capacidade de resistência às fissuras, mas não chega a ter uma resistência superior a matriz de cimento puro.

Na falta de normas específicas para o concreto com agregados leves em alguns locais, recomenda-se que sejam aplicados os mesmos critérios utilizados para o concreto convencional substituindo apenas o módulo de deformação (GOMES, 2015).

#### **4.5 Compósito cimentício com argila expandida**

Para Souza et al. (2022), o avanço nas pesquisas no desenvolvimento de concretos especiais como a utilização de concreto leve (CL) para serem utilizados com finalidades específicas, representa grande desafio para o setor da Engenharia Civil devido a redução das propriedades mecânicas causadas pela substituição do agregado convencional por agregado leve. Ao avaliarem o efeito da adição de 10% de sílica ativa (SA) em traços de concretos com substituição de 50% e 100% do volume de brita por argila expandida (AE) os autores verificaram que a substituição total do agregado graúdo convencional por um agregado leve, de menor densidade, não conferiu efeitos positivos ao concreto quando comparado ao traço convencional. No entanto, ao adicionar sílica ativa no teor de 10%, ocorreu redução dos valores de resistência, porém ocorreu aumento significativo do fator de eficiência em relação ao concreto referência. Os concretos contendo argila expandida, com ou sem sílica ativa, podem ser considerados leves devido à massa específica seca ter apresentado resultados inferiores a  $2.000 \text{ kg m}^{-3}$ . A adição de sílica ativa aumentou o desempenho mecânico dos concretos leves sem ser necessário incorporar mais cimento Portland. Dessa forma concluíram que a argila expandida como agregado leve é uma alternativa viável para preparação de concretos, sendo recomendada a sua utilização com sílica ativa para melhoria das propriedades mecânicas.

Figura 5: Concreto leve: a) sem finos; b) com agregados leves; c) celular



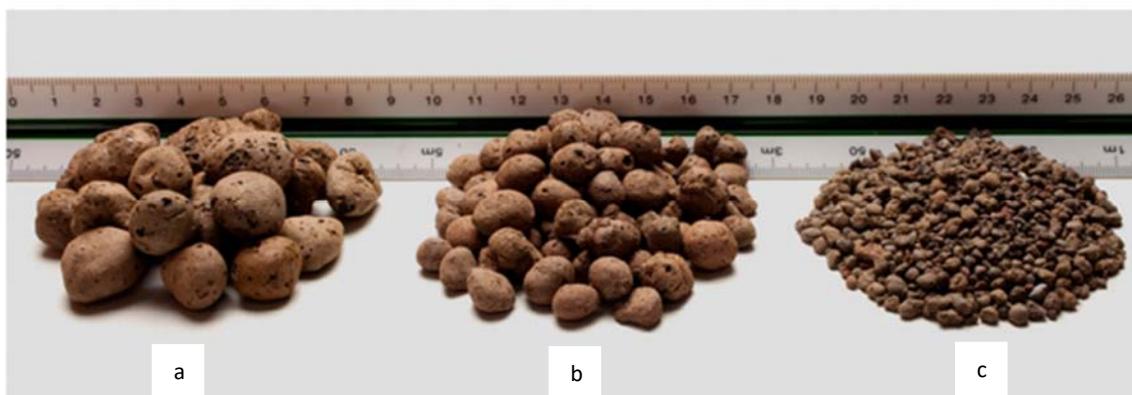
Fonte: Rossignolo (2009)

O uso da argila expandida, segundo Da Silva et al. (2018) melhora o espalhamento e verificaram também o aumento do teor de ar incorporado, diminuição da massa específica nos estados fresco e endurecido, aumento do índice de vazios e na absorção de água, resultado tanto do efeito do aditivo incorporador de ar (IAR), quanto do uso da argila expandida. Além disso, com o uso de IAR, e aumento da substituição da areia por argila, verificaram ganho de desempenho quanto às propriedades acústicas, com redução na velocidade de propagação das ondas-P e aumento na atenuação sonora. Não se descarta a possibilidade de utilizar a argila para a produção de compósitos cimentícios com características especiais, mesmo registrando queda na resistência mecânica, uma vez que há a possibilidade de aplicação em painéis de vedação, onde características de baixa densidade e bom desempenho acústico são muito relevantes.

Diversas pesquisas tem sido desenvolvidas sobre o uso de argila expandida em compósitos cimentícios, produzindo uma mistura mais trabalhável e com maior resistência à segregação. A incorporação da argila expandida graúda (figura 6a e 6b) pode diminuir a densidade em 16,36% a 36,51%. Já a incorporação da argila como um agregado fino (figura 6c) pode reduzir a densidade em 35%, enquanto os níveis de redução flutuam de 37,58% a 44,4% quando usado os agregados miúdos e graúdos da argila. A alta absorção de água da argila expandida em comparação com os agregados de peso normal, tem um efeito negativo na trabalhabilidade, porém superfície arredondada da argila, proporciona um efeito positivo na trabalhabilidade. A estrutura celular e porosa desse agregado leve contribui para garantir uma boa absorção de ruídos, além de aumentar a resistência ao fogo e o isolamento térmico quando utilizado em

matrizes cimentícias, tendo em vista que a sua condutividade térmica é baixa se comparada com a do agregado de peso normal (RASHAD, 2018).

Figura 6: Diferentes tamanhos de grãos de argila expandida.



Fonte: RASHAD (2018)

Ao avaliar a adição da argila expandida laminada em argamassa de revestimento, de modo a conhecer o seu comportamento frente aos parâmetros térmicos, acústicos e de resistência ao fogo Gomes (2020) constatou que a adição de quantidades maiores do agregado leve, possibilitou maiores resultados térmicos, obtendo reduções de até  $3,34^{\circ}\text{C}$ , além de proporcionar menor variação de temperatura dentro dos ambientes, com maiores benefícios, para a construção e para os que usufruírem do imóvel. Concluiu ainda que a argila expandida contribui para o avanço da tecnologia de materiais cimentícios, onde a alta concentração de sílica em sua composição traz grandes benefícios, como: maior durabilidade, coesão, capacidade de aderência, resistência a agressões físicas e químicas, diminuição do processo de exsudação, entre outros. Além disso, sua porosidade propicia um excelente desempenho acústico e térmico para o material ao qual for empregado.

Pereira (2021) desenvolveu um compósito cimentício leve de alvenaria pré-moldado, com finalidade de ser aplicado como um elemento de vedação de baixa massa específica e boas propriedades acústicas e térmicas. Como resultado da pesquisa, o protótipo desenvolvido apresentou melhor condutividade térmica, 7,6%, comparado a alvenaria convencional e que permite a transparência da propagação de ondas eletromagnéticas.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Tecnologia de Novos Materiais (TECNOMAT-IDEP), Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas (LABEME), no campus da Universidade Federal da Paraíba e, no Laboratório de Materiais de Construção, campus do Centro Universitário de João Pessoa - UNIPÊ, em João Pessoa-PB.

### 5.1 Materiais

#### 5.1.1 Cimento

Para o desenvolvimento da pesquisa foi utilizado cimento CPV- ARI (Alta resistência inicial), da marca Elizabeth Cimentos, satisfazendo todos os critérios da NBR 16697:2018. As propriedades e o composição do cimento disponibilizado pelo fabricante se encontra na tabela 1.

Tabela 1: Propriedades e características do cimento CPV- ARI.

Tipo de Cimento	CPV ARI
Perda ao fogo	5,02
Resíduos insolúveis	1,09
SiO <sub>2</sub> (%)	17,59
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3,95
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	2,19
CaO (%)	58,11
MgO (%)	6,15
SO <sub>3</sub> (%)	4,03
Na <sub>2</sub> O (%)	0,17
K <sub>2</sub> O (%)	1,04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0,44
Blaine (cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	5590
Início de pega (min)	150
Fim de pega (min)	205
Resistência à compressão	37,20 (3 dias)
	40,90 (7 dias)
	50,10 (28 dias)

Fonte: ELIZABETH CIMENTOS LTDA

#### 5.1.2 Agregado leve

A argila expandida de granulometria 2,50mm (lamelar), da marca CINEXPAN – Indústria e Comércio de Argila Expandida, foi utilizada na confecção dos compósitos, cuja composição química fornecida pelo fabricante se encontra na tabela 2.

Tabela 2: Composição química da argila expandida

<b>Composições Químicas</b>	<b>(%)</b>
Silício (SiO <sub>2</sub> )	63,19%
Alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	18,02%
Ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	7,63%
Titânio (TiO <sub>2</sub> )	0,92%
Cálcio (CaO)	0,64%
Magnésio (MgO)	3,26%
Sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,61%
Potássio (K <sub>2</sub> O)	4,91%
Óxido de Fósforo/ Manganês/ Bário	0,37%

Fonte: CINEXPAN (2015)

### 5.1.3 Água

Foi utilizado água potável na produção dos compósitos, fornecida pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA).

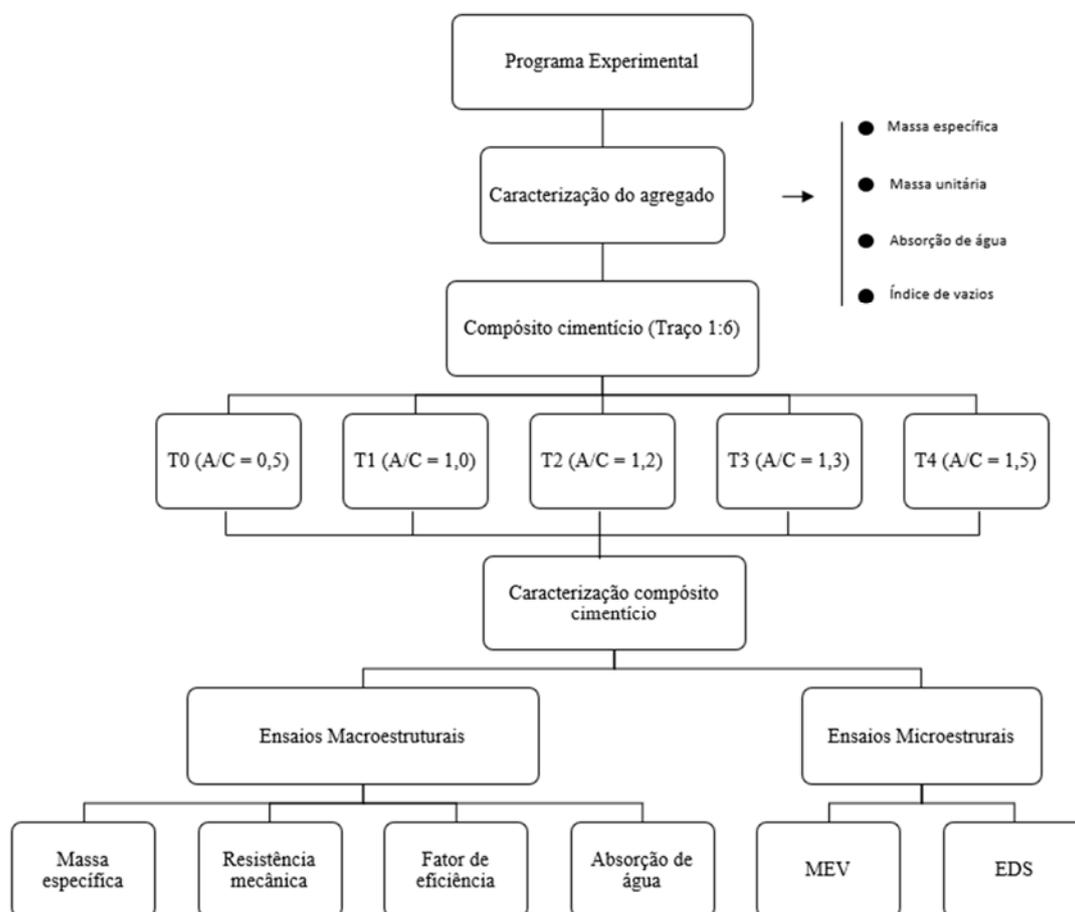
### 5.2 Métodos utilizados

Na produção e avaliação de compósitos cimentícios leves foram seguidas as seguintes etapas:

- 1) Caracterização do agregado leve;
- 2) Produção dos compósitos;
- 3) Propriedades do compósito no estado endurecido;
- 4) Análise microestrutural utilizando aparelho de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

No organograma abaixo (figura 7) está discriminada toda a marcha metodológica utilizada desde a produção e caracterização do composto cimentício avaliado no presente estudo.

Figura 7: Planejamento experimental



Fonte: SOUTO (2022)

### 5.2.1 Caracterização do agregado leve

O agregado leve, material utilizado nesta pesquisa, foi caracterizado através de ensaios físicos e químicos cujos resultados encontram-se na Tabela 3. Para a caracterização do agregado leve determinou-se a granulometria, massa específica, massa unitária, índice de vazios e absorção de água, seguindo as normas específicas (tabela 3). Foi utilizada a ferramenta de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) associado a espectrografia de raios X por dispersão de energias (EDS), onde se investigou a microestrutura do agregado leve por meio da análise de imagens.

Tabela 3: Ensaio realizados para caracterização do agregado leve

Material	Ensaio	Norma ABNT
Argila expandida (2.5 mm Laminada)	Granulometria	NBR 248:2003
	Massa específica	NBR 16916:2021
	Massa unitária	NBR 16972:2021
	Índice de vazios	NBR 16972:2021
	Absorção de água	NBR 9779:2012

Fonte: SOUTO (2022)

Na figura 8 verifica-se a preparação da amostra para ensaio de massa específica e absorção de água, segundo NBR 16916:2021. A amostra retirada para execução do ensaio foi imersa em água durante 24 horas. Após esse período, foi despejada e revolvida em bandeja para secagem uniforme, afim de garantir a umidade superficial. O processo finaliza quando a amostra é colocada em um molde tronco-cônico, em seguida aplicado 25 golpes para que o agregado conserva a forma do molde.

Figura 8: Ensaio para determinação de massa específica do agregado leve, segundo a -  
NBR 16916:2021



Fonte: SOUTO (2022)

Após conformação da amostra, foi retirada 500g e colocada em erlenmeyer, determinando a massa do conjunto em balança de precisão. Em seguida, adicionou-se água até a marca de 500 ml, sendo o erlenmeyer colocado em banho, a uma temperatura de  $23 \pm 2$  °C, por aproximadamente uma hora, conforme é demonstrado na figura 9. Com isso, obteve-se a massa total do conjunto, calculando-se, assim, a massa específica e absorção de água do agregado.

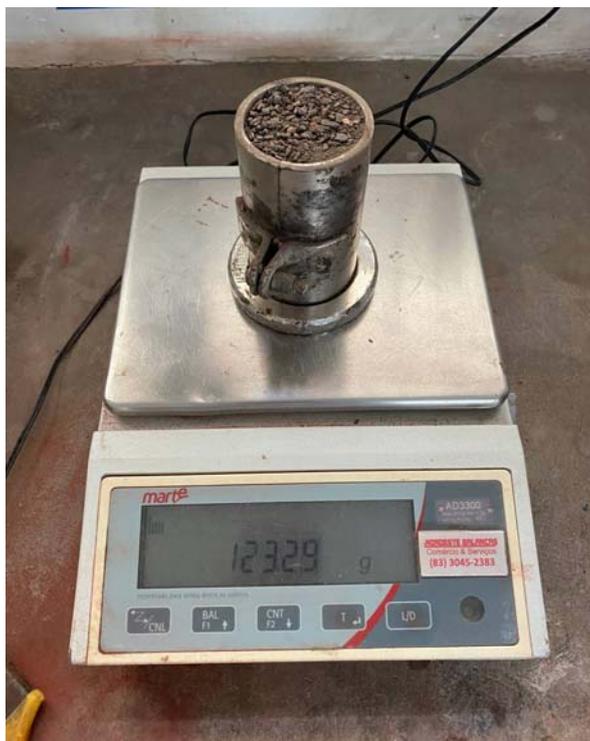
Figura 9: Ensaio de absorção de água pelo agregado leve, segundo a NBR 16916:2021



Fonte: SOUTO (2022)

A determinação de massa unitária e índice de vazios da argila expandida foi realizada através dos procedimentos estabelecidos na NBR16972:2021. A amostra foi seca em estufa por 24 horas, até massa constante, na temperatura de  $105 \pm 5$  °C. Com o volume do recipiente conhecido, utilizou-se o Método C da NBR, para definição da massa unitária e índice de vazios do agregado (figura 10).

Figura 10: Ensaio para determinação de massa unitária e índice de vazios, segundo a NBR 16972:2021



Fonte: SOUTO (2022)

### 5.2.2 Produção de compósito cimentício leve

O programa experimental do trabalho segue, para a produção do compósito cimentício leve, a marcha metodológica utilizado por Pereira (2021). O autor elaborou 4 traços para confecção de compósito cimentício, sendo o traço 1:6 o que apresentou melhores resultados físicos e mecânicos (resistência à compressão e absorção de água) no protótipo desenvolvido. No entanto, o processo apresentou variabilidade e dificuldades de reologia impostas pelo fator água/cimento. Logo, o programa experimental da pesquisa utilizou o traço 1:6, com 5 tipos de tratamentos, variando a relação A/C, no desenvolvimento do estudo, definidos na tabela 4.

Tabela 4: Definição de traços para avaliação do desempenho dos compósitos

Traço	Relação A/C
Traço 1 (T1)	0,5
Traço 2 (T2)	1,0
Traço 3 (T3)	1,2
Traço 4 (T4)	1,3
Traço 5 (T5)	1,5

Fonte: SOUTO (2022)

### 5.2.3 Propriedades do compósito no estado endurecido

Para os ensaios de resistência à compressão axial, conduzidos de acordo com a NBR 5739:2018 (Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto), foram confeccionados 16 corpos de prova (CP's), com 5,0 cm de diâmetro e 10,0 cm de altura, para ensaios nas idades 7, 14, 21 e 28 dias, utilizando para isso uma prensa hidráulica (figura 11).

Figura 11: Prensa Hidráulica utilizada no Ensaio de Resistência à Compressão



Fonte: SOUTO (2022)

A fim de normalizar o processo de moldagem e cura dos corpos de prova, enumerou-se os mesmos em ordem numérica grega, com idades de ensaios definidos conforme apresentado na tabela 5.

Tabela 5: Definição de Corpos de Prova (CP's) conforme à resistência à compressão

Idade de ensaios	Ordem numérica
7 dias	I, V, IX e XIII
14 dias	II, VI, X e XIV
21 dias	III, VII, XI e XV
28 dias	IV, VIII, XII, XVI

Fonte: SOUTO (2022)

Por se tratar de um material complexo e poroso, em função das demais propriedades a serem estudadas, após serem desmoldados, os CP's foram embalados em duas camadas de filme PVC (Figura 12A e 12B) a fim de retardar o processo de carbonatação para não influenciar nos resultados dos ensaios.

Figura 12 : Corpos de provas (CP's) envolvidos com filme PVC e devidamente identificados



Fonte: SOUTO (2022)

Para caracterização do compósito leve em relação a absorção de água, foram utilizadas as diretrizes da NBR 9779:2012. Determinou-se a massa dos corpos de prova com 28 dias ao ar e, em seguida, foram colocados para secagem em estufa à temperatura de  $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ , até massa constante (Figura 13A e 13B). Após retirados da estufa, os corpos de prova cilíndricos foram posicionados em suportes, com o nível da água permanecendo constante a  $5 \pm 1 \text{ mm}$  acima da sua face inferior (Figura 13C e 13D). Desse modo, coletou-se a massa dos corpos de prova com 3h, 6h, 24h, 48h e 72h.

Figura 13: Ensaio de absorção de água nos compósitos leves produzidos (NBR 9779:2012)



Fonte: SOUTO (2022)

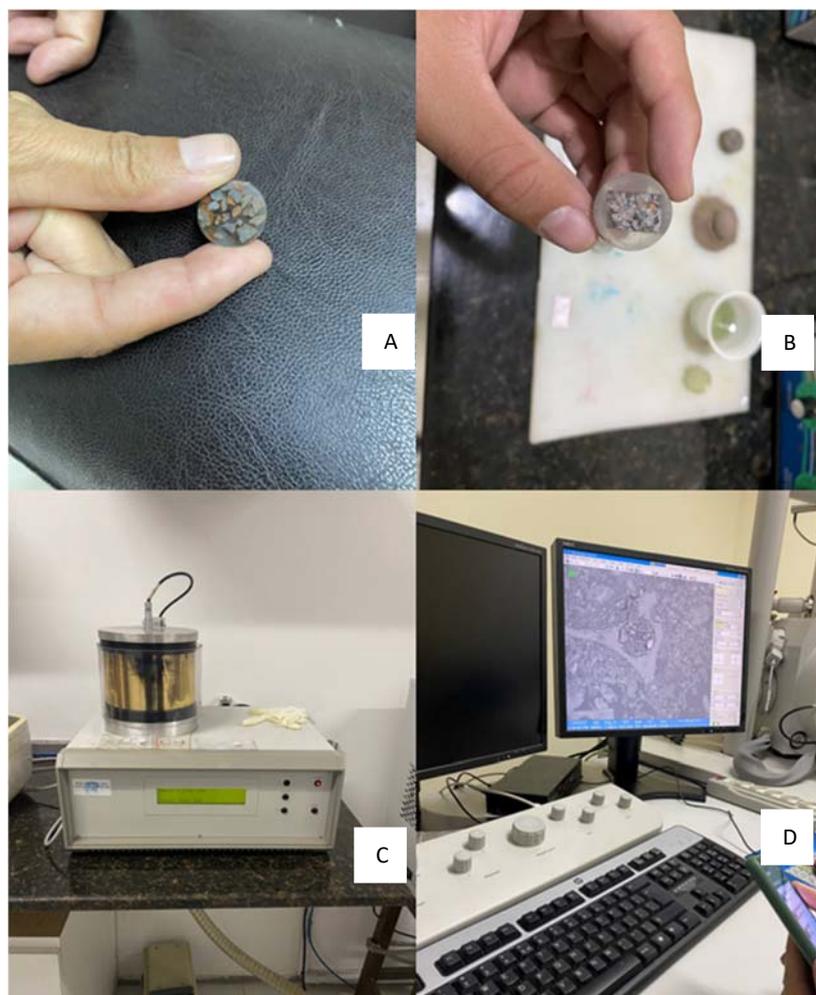
#### 5.2.4 Análise microestrutural

As análises microestruturais de MEV foram utilizadas para obter informações sobre a morfologia, distribuição, porosidade e estabelecer correlações e explicações sobre o desempenho dos compósitos. As análises foram feitas utilizando Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo INSPECT FEI (Company), demonstrado na Figura 10D, no Laboratório de Tecnologia de Novo Materiais – TECNOMAT, da Universidade Federal da Paraíba, Campus João Pessoa.

As amostras do agregado (figura 14A) e do compósito (figura 14B), para análise no MEV, foram cortadas em serra de corte de baixa rotação com disco diamantado, a fim de não ocorrer fissuras. Após o corte, a amostra foi embutida em resina à frio de polimerização rápida, facilitando o manuseio da peça, e, desta forma, garantindo a integridade da amostra durante o processo de lixamento (lixas 400, 600, 800, 1000, 1200 e 1500) e polimento. As amostras polidas foram metalizadas (figura 14C),

recobertas em camada de ouro, assegurando melhor condutibilidade para realização do ensaio.

Figura 14: Preparação de amostra para ensaio de microscopia e análise em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)



Fonte: SOUTO (2022)

### 5.3 Critério de Chauvenet

O critério de Chauvenet, é um método estatístico que foi desenvolvido para a detecção de valores discrepantes, os outliers. Ele baseia-se na hipótese de que uma medição arbitrária pode ser rejeitada se a probabilidade de obter o desvio da média para este valor é menor do que o inverso do dobro do número de medições (TAYLOR, 2012).

O teste é realizado por meio da razão entre a diferença de cada resultado ( $X_i$ ) com a média de todos os resultados ( $\mu$ ) em relação ao desvio padrão ( $\sigma$ ), conforme figura 15.

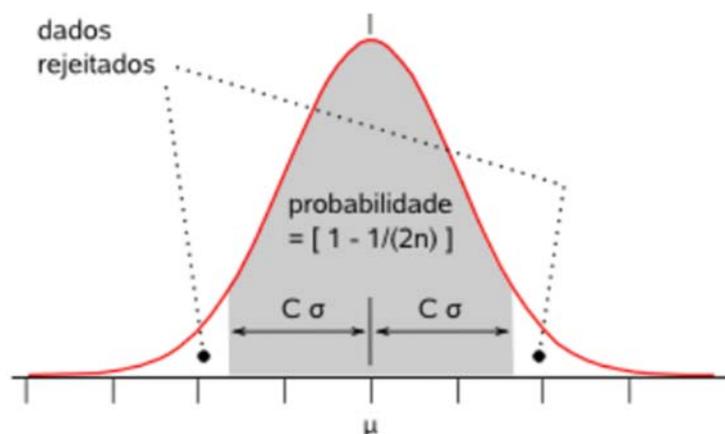
Figura 15: Critério de Chauvenet

$$C = \frac{|X_i - \mu|}{\sigma}$$

Fonte: Adaptado de FERREIRA (2014)

Segundo o critério, um valor pode ser rejeitado, se a probabilidade de se obter um desvio particular da média estimada for menor que  $\frac{1}{2n}$ , sendo  $n$  o número de leituras realizadas, quando  $n \geq 3$ . Isso significa que resultados considerados aceitáveis estão dentro de uma faixa cuja probabilidade é  $1 - \frac{1}{2n}$ , como pode ser visto na curva de distribuição normal, na figura 16.

Figura 16: Curva de distribuição normal do Critério de Chauvenet



Fonte: adaptado de CALLEGARO (2014)

As faixas de probabilidades são dadas em termos de desvio-padrão, conforme a figura 17, para cada valor de  $n$ , pode ser calculada a probabilidade; e por integração matemática da função de densidade de 53 probabilidade da distribuição normal, determina-se o coeficiente “C” de Chauvenet, correspondente ao número de desvios-padrão para a faixa de valores considerados aceitáveis (CALLEGARO, 2014)

Figura 17: Faixas de probabilidade do Critério de Chauvenet

<b>Tamanho da amostra N</b>	<b>Máximo "C" (em desvios)</b>	<b>Tamanho da amostra N</b>	<b>Máximo "C" (em desvios)</b>
<b>3</b>	1,38	<b>15</b>	2,13
<b>4</b>	1,54	<b>20</b>	2,24
<b>5</b>	1,65	<b>25</b>	2,33
<b>6</b>	1,73	<b>50</b>	2,57
<b>7</b>	1,80	<b>100</b>	2,81
<b>8</b>	1,87	<b>300</b>	3,14
<b>9</b>	1,91	<b>500</b>	3,29
<b>10</b>	1,96	<b>1000</b>	3,48

Desta forma, o critério de Chauvenet fornece uma base consistente para a tomada de decisão de excluir, ou não, um dado de um conjunto de valores medidos. Com os valores que ficaram dentro da faixa esperada, obtendo assim o resultado final.

Ferreira (2017) comparou diferentes técnicas para detecção e tratamento de outliers e concluiu que o teste de Chauvenet pode ser uma excelente alternativa por ser mais restritivo em algumas situações (para um outlier).

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Caracterização do agregado leve

Os resultados obtidos para caracterização física do agregado leve (argila expandida laminada 2.5 milímetros) são apresentados na tabela 6, tabela 7 e tabela 8.

O ensaio de granulometria (Tabela 6), realizado por Pereira (2011), demonstra que a argila expandida 2,50mm atende aos limites de distribuição granulométrica de um agregado miúdo, estabelecidos na NBR 7211:2019.

Tabela 6: Composição granulométrica – NM 248:2003

<b>Composição granulométrica - NM 248:2003</b>				
Peneira (mm)	Massa retida (g)	Porcentagem retida (%)	Massa acumulada (%)	
			Retida	Passante
4,8	3,5	0,54%	0,54%	99,46%
2,4	142,3	21,89%	22,43%	77,57%
1,2	155,7	23,95%	46,38%	53,62%
0,5	105,9	16,29%	62,68%	37,32%
0,3	74,2	11,42%	74,09%	25,91%
0,15	50,8	7,82%	81,91%	18,09%
Fundo	117,6	18,09%		
Total	650	100,00%		
<b>Diâmetro máximo (mm)</b>				
	4,8			
<b>Módulo de finura</b>				
	2,88			
<b>Classificação granulométrica</b>				
	Média			

Fonte: PEREIRA (2021)

A massa unitária do agregado leve (argila expandida) encontrada foi de 625 kg/m<sup>3</sup>, demonstrado na tabela 7. O valor encontrado encontra-se dentro da faixa definida por METHA (1994), entre 300 kg m<sup>-3</sup> e 650 kg m<sup>-3</sup>, evidenciando o método de produção da argila por forno rotativo. O índice de vazio obtido foi de 57,2%. Segundo HOLM e BRENMER (1994), o grande volume de vazios dos agregados leves (maior que 50% para argila expandida) resulta na diminuição dos valores de resistência à tração em concretos leves, comparados com concretos com massa específica normal (2500kg/m<sup>3</sup>).

Tabela 7: Resultado do Ensaio de Massa Unitária

<b>Ensaio Massa Unitária - NBR 16972:2021</b>		
Massa 1	123,29	g
Massa 2	125,5	g
Massa 3	119,31	g
Média	122,7	g
Volume do recipiente	196,35	cm <sup>3</sup>
<b>Massa unitária</b>	0,625	g cm <sup>-3</sup>
<b>Índice de vazios</b>	57,2%	

Fonte: SOUTO (2022)

Observa-se na tabela 8 que a massa específica o agregado é de 1,45 g/cm<sup>3</sup>. Por se tratar de um material industrializado, no catálogo da fabricante Cinexpan (2000), a densidade é de 1,40 g/cm<sup>3</sup>. Gachet et al (2020) e Rossignolo (2009), encontraram valores semelhantes ao estudo, 1,40 g/cm<sup>3</sup> e 1,5 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente.

Tabela 8: Resultados do Ensaio de Massa Específica e Absorção de Água

<b>Ensaio Massa Específica - NBR 16916:2021</b>		
Massa amostra seca em estufa	425,2	g
Massa do recipiente	657,6	g
Massa da amostra + recipiente + água	1287,5	g
<b>Massa Específica</b>	1,45	g cm <sup>-3</sup>
<b>Absorção de água</b>	18%	

Fonte: SOUTO (2022)

A absorção de água de 18%, semelhante ao encontrado por Moravia (2007), de 19%, reflete na trabalhabilidade e na resistência final. O alto valor de absorção de água do agregado impediu a confecção do compósito Traço 1 (T1), com relação a/c de 0,5, demonstrado na figura 18. A mistura dos materiais não apresentou trabalhabilidade, tampouco conformação.

Figura 18: Preparação de compósito Traço 1 - (relação a/c: 0,5)



Fonte: SOUTO (2022)

### 6.2 Resistência à compressão e massa específica

Os resultados do ensaio de resistência à compressão e massa específica, estão descritos na tabela 9.

Tabela 9: Resistência à compressão e massa específica do compósito cimentício leve

Traço	Resistência à compressão (Mpa)				Massa específica (Kg/m <sup>3</sup> )
	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	
Traço 2	5,74	4,45	2,95	6,19	1210,08
	3,70	4,20	6,79	4,35	1143,37
	2,80	4,30	4,00	3,85	1067,48
	3,15	4,45	3,55	4,20	1076,14
Traço 3	4,35	4,20	4,35	5,04	1187,17
	2,90	4,10	3,65	6,29	1211,10
	3,20	4,25	4,40	5,14	1172,91
	3,75	4,40	4,45	5,24	1182,07
Traço 4	4,90	3,85	5,74	5,49	1255,92
	3,90	4,69	6,09	5,09	1251,34
	3,85	4,20	6,34	5,49	1286,48
	5,04	3,90	6,29	-	1201,94
Traço 5	2,40	3,25	4,79	3,40	1181,56
	3,61	3,45	4,35	3,60	1151,52
	2,60	3,50	4,65	3,85	1235,55
	3,24	3,40	4,45	3,10	1132,16

Fonte: SOUTO (2022)

Durante a realização dos ensaios um corpo de prova do Traço 4 foi danificado durante o processo, desta forma, foram considerados os valores dos 3 corpos de prova resultantes e sua massa específica foi considerada na idade de 21 dias, sem prejuízo para as análises.

A incorporação do agregado leve, como era esperado, acarretou na redução da massa específica do compósito cimentício. Metha (2005) estabelece a massa específica de 1800 kg/m<sup>3</sup> para concreto leve e 2500 kg/m<sup>3</sup> para concreto convencional. O compósito cimentício em estudo, apresentou massa específica inferior a 1200 kg/m<sup>3</sup>, na idade de 28 dias. Classificando o compósito como uma argamassa, de acordo com a NBR 13281:2005, estaria na Classe M1 (< 1200kg/m<sup>3</sup>).

Para análise dos resultados de resistência à compressão, foi considerado a média de cada uma das séries, nas suas respectivas idades. A tabela 10 e Figura 12, demonstram os resultados.

Tabela 10: Resistência à compressão

<b>Resistência à compressão (MPa)</b>				
	T2	T3	T4	T5
7 dias	3,85	3,55	4,42	2,96
14 dias	4,35	4,23	4,16	3,40
21 dias	4,32	4,21	6,12	4,56
28 dias	4,65	5,43	5,36	3,48

Fonte: SOUTO (2022)

Como o estudo está susceptível a interferências externas que podem causar coleta inadequada dos dados, foi utilizado um critério estatístico, denominado Critério de Chauvenet. Segundo Doebelin (1990), utilizando o critério de exclusão, minimizasse o efeito da interferência no resultado, a limpeza dos dados de acordo com o comportamento tendencial das amostras, para localização de outliers, resultados que numericamente são distantes do resto dos dados, determinam os valores aceitos e rejeitados. Todos os dados satisfizeram os critérios de Chauvenet, sendo os valores estatisticamente significativos.

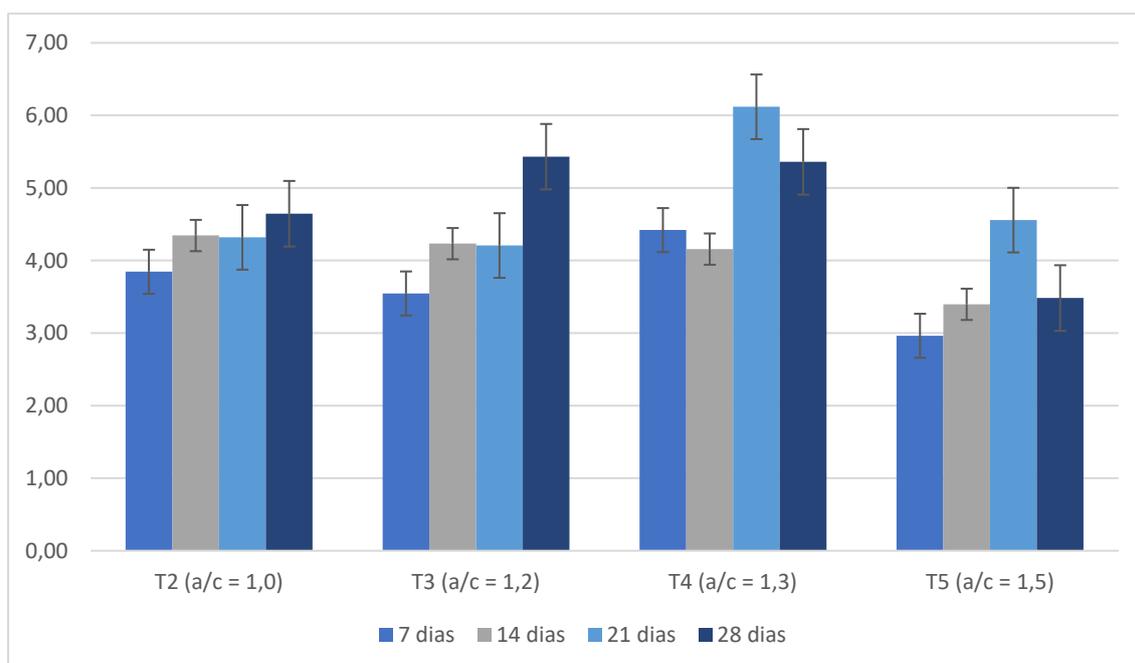
A heterogeneidade do material é demonstrada na complexidade dos dados. Aos 7 dias, a resistência a compressão apresenta coeficiente de variação de 16,4% entre os traços, com mínimo de 2,94 MPa no T5 e máximo de 4,42 MPa no T4.

Aos 14 dias, houve um aumento da resistência à compressão de 13% no Traço 2, 19% no Traço 3 e 14% no Traço 5. Porém, uma redução de 5,93% na resistência à compressão do Traço 4. Com 21 dias, o aumento da resistência à compressão dos compósitos chegou a 53,81% no Traço 4. Finalizando o acompanhamento dos valores de resistência à compressão dos traços, aos 28 dias de cura, houve um aumento de 20,78% no Traço 2, 53,17% no Traço 3, 21,28% no Traço 4 e 17,57% no Traço 5.

Apesar da variação, a utilização de CP-V ARI na composição do traço permite que o compósito se enquadre, logo nas primeiras idades, aos limites de resistência para blocos vazados de concreto, exigidos pela NBR 6136:2016, de 3,0 MPa, demonstrado graficamente na figura 19. Atingindo uma média de 80% da resistência à compressão aos 28 dias, durante as primeiras idades de cura (7 dias).

Este comportamento, de estabilização de resistência nas primeiras idades, utilizando cimento de alta resistência inicial, é uma característica dos compósitos cimentícios leves, identificado por Rossigono (2009), Bektas (2012) e Angelin et al (2017). Segundo os autores, a resistência à compressão da matriz de cimento ultrapassa a resistência à compressão do agregado, logo nas primeiras idades. Com isso, a resistência final do concreto não se beneficia na mesma proporção com o aumento da resistência à compressão da matriz de cimento.

Figura 19: Resistência à compressão



Fonte: SOUTO (2022)

A norma da ABNT NBR 6136 (ABNT, 2016) classifica os blocos quanto ao uso e função e especifica os requisitos mínimos exigidos para as propriedades físicas e mecânicas (tabela 11).

Tabela 11: Classificação de blocos quanto ao uso – NBR 6136:2016.

Classificação	Classe	Resistência característica à compressão axial
Com função estrutural	A	$fbk \geq 8,0$
	B	$4,0 \leq fbk \leq 8,0$
Com ou sem função estrutural	C	$fbk \geq 3,0$

Fonte: Adaptado NBR 6136 (2016)

Com os resultados expostos é viável a utilização do compósito como bloco de vedação, sem função estrutural.

Gomes et al (2015) utilizaram agregado reciclado de bloco de concreto, com e sem EPS, e encontrou resistência à compressão aos 28 dias entre 9,0 e 13,0 MPa. Já Gomes et al (2015), desenvolveram um bloco utilizando o Etileno Acetato de vinila (EVA) como agregado leve, obtendo uma resistência à compressão de 1,20 MPa.

Segundo Gomes (2015) os concretos feitos com argila expandida apresentam valores mais elevados sendo inclusive utilizados para concreto leve com função estrutural.

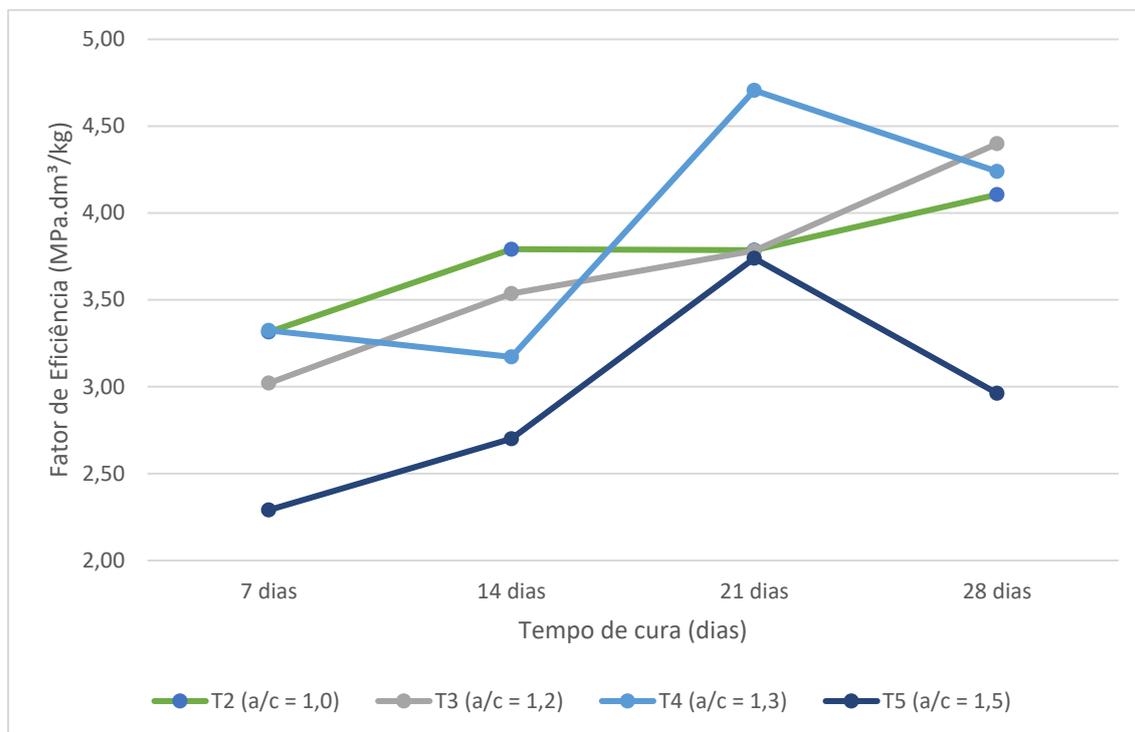
Angelin (2017), utilizando sílica ativa e argila expandida, no melhoramento do desempenho mecânico de concretos leves estruturais, atingiu valores de resistência à compressão de 26 a 53MPa aos 7 dias de idade. Moreira et al (2018) confeccionaram um compósito utilizando argila expandida e incorporador de ar e atingiu resistência mecânica de 17,8MPa.

### 6.3 Fator de eficiência

Rossignolo (2009), considera que a resistência à compressão, massa específica e a relação entre as duas propriedades (Fator de Eficiência) são os parâmetros mais

utilizados para caracterizar de compósitos cimentícios com agregado leve, estando diretamente relacionados com o tipo de granulometria do agregado utilizado.

Figura 20: Fator de eficiência x Tempo de cura



Fonte: SOUTO (2022)

Conforme figura 20, aos 28 dias, o Traço 3 apresentou melhor Fator de Eficiência de 4,40 MPa.dm<sup>3</sup>/kg, comparado aos demais. Desta forma pode-se comparar diferentes tipos de compósitos cimentícios leve.

Não é comum na literatura, o estudo do fator de eficiência do bloco. Visto que, é utilizado a interação do bloco com argamassa, chamado de prisma.

Rezende (2013) chegou à conclusão que quanto maior a resistência do bloco menor o fator de eficiência. Blocos com maior resistência tendem a aumentar a capacidade de tensão da alvenaria à compressão. Entretanto, esse aumento nas alvenarias não é linearmente proporcional ao dos blocos (SILVA, 2016).

## 6.4 Absorção de água x resistência mecânica

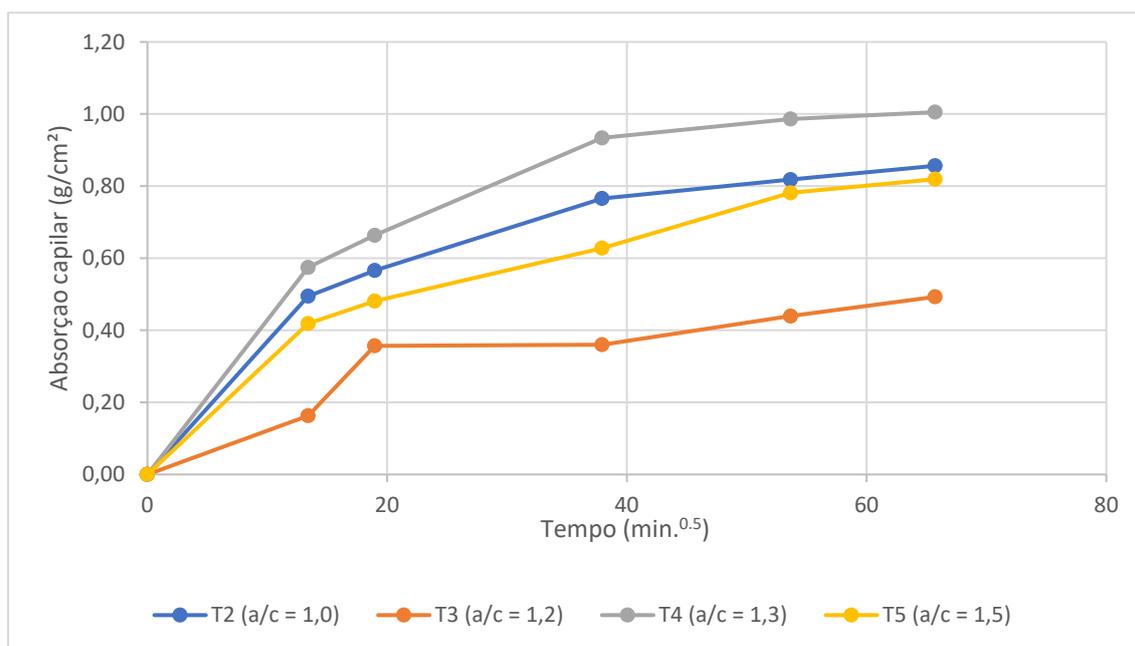
A tabela 12 demonstra os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade do compósito cimentício leve.

Tabela 12: Ensaio de absorção de água por capilaridade (NBR 9779:2012)

Tempo (h)	T2 (a/c = 1,0)	T3 (a/c = 1,2)	T4 (a/c = 1,3)	T5 (a/c = 1,5)
0	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,49	0,16	0,57	0,42
6	0,57	0,36	0,66	0,48
24	0,77	0,36	0,93	0,63
48	0,82	0,44	0,99	0,78
72	0,86	0,49	1,01	0,82

Fonte: SOUTO (2022)

Figura 21: Absorção de água do compósito cimentício leve

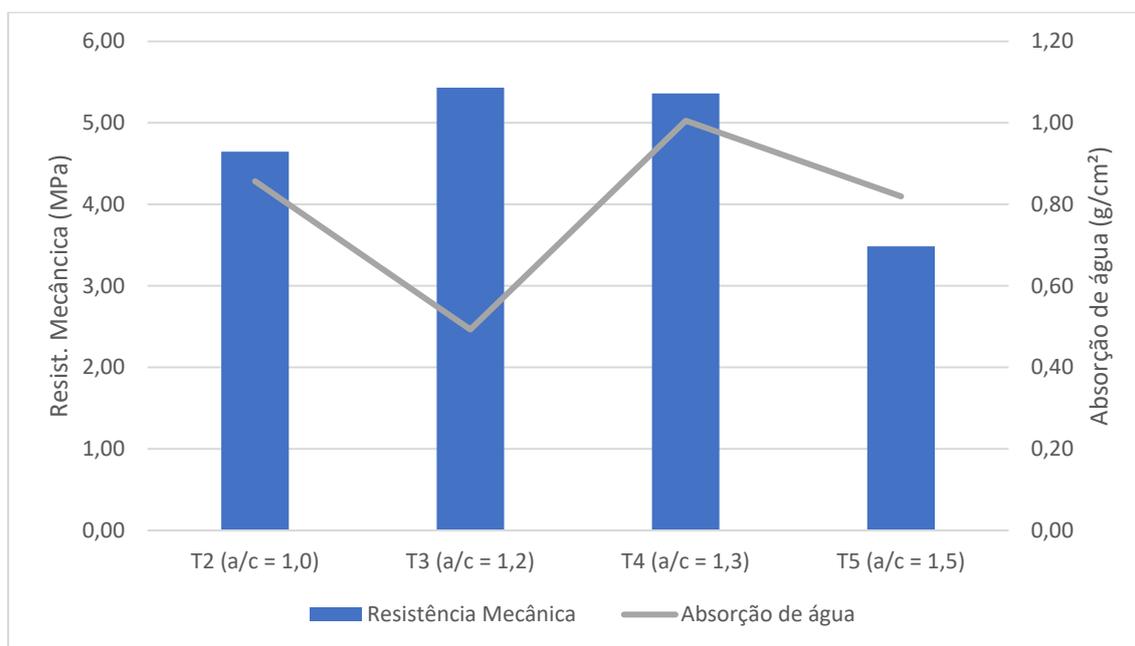


Fonte: SOUTO (2022)

A absorção por capilaridade foi maior para o traço Traço 4. Durante as 3 horas iniciais ocorreu a maior absorção dos compósitos, devido a porosidade do agregado e do compósito. Nas 48 horas, a variação máxima na absorção ocorreu no Traço 5 (24,41%), após o período, devido a saturação do compósito, a variação da absorção foi menor que 5%, exceto no Traço 3, que variou 12,17%.

Destaca-se, a partir da figura 21, que o comportamento inicial da absorção por capilaridade permaneceu ao longo do tempo, demonstrando que a absorção inicial foi determinante para a absorção total do compósito.

Figura 22: Resistência mecânica x Absorção de água



Fonte: SOUTO (2022)

A figura 22, ilustra o gráfico obtido através da correlação entre a resistência mecânica e a absorção de água. O comportamento esperado era de quanto maior a relação a/c, maior a absorção de água pelo compósito e menor a resistência mecânica. Porém, o Traço 4 apresentou uma diferença de 22,68% em relação a absorção de água, comparado ao traço de maior a/c, Traço 5. Evidenciou-se a variabilidade do processo e as dificuldades de reologia impostas pelo fator água/cimento.

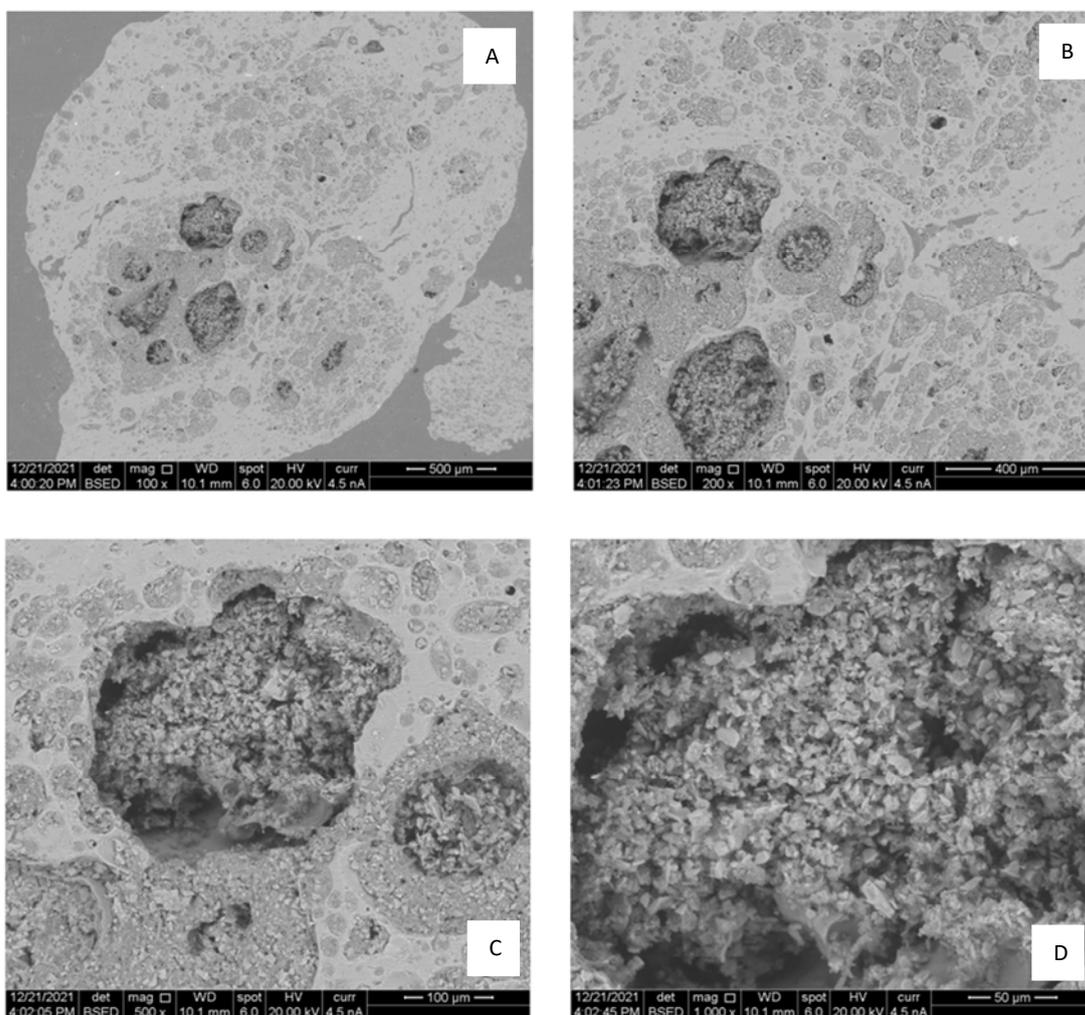
Cappelari et al (2020) identificaram que concretos com maiores resistência à compressão possuem, além de uma menor absorção, uma menor molhabilidade, em estudo realizado com concretos de diferentes traços e relações água/aglomerantes.

Berenguer et al (2018) observaram que, para concretos sem o uso de aditivo incorporador, a absorção capilar acompanha a variação da relação a/c, e, aumenta a medida em que a massa específica diminui.

### 6.5 Microscopia eletrônico de varredura do compósito cimentício leve

A figura 23 apresenta as micrografias do agregado leve (argila expandida). A morfologia da argila expandida apresenta partículas com grãos levemente arredondados. Externamente é possível identificar uma estrutura homogênea, Figura 23 (A) e (B), porém, o interior da amostra possui diversos poros, não interconectados (Figura 23 (C) e (D)). A maior porosidade da superfície interna está relacionada ao surgimento de bolhas de gases originados no processo de fabricação da argila expandida. (MORAVIA, 2016)

Figura 23: Imagem obtida por MEV, no modo BSED, onde pode ser observado os vazios do agregado (argila expandida) nas magnitudes: 100x (A), 200x (B), 500x (C) e 1000x D)

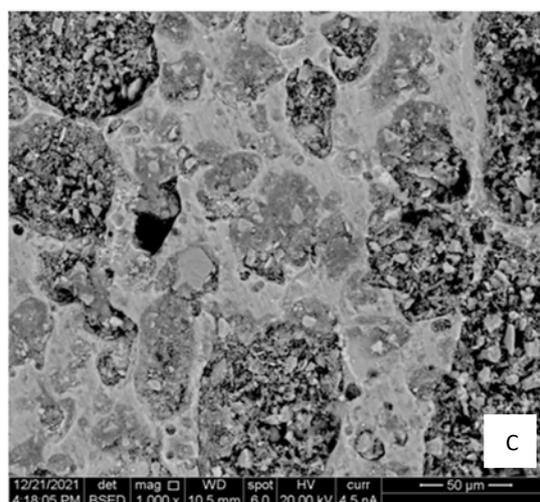
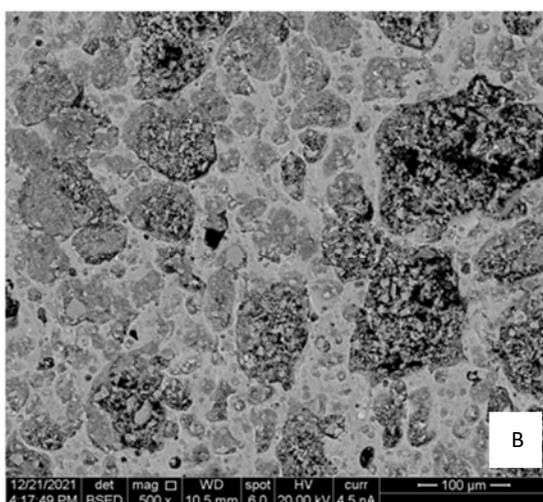
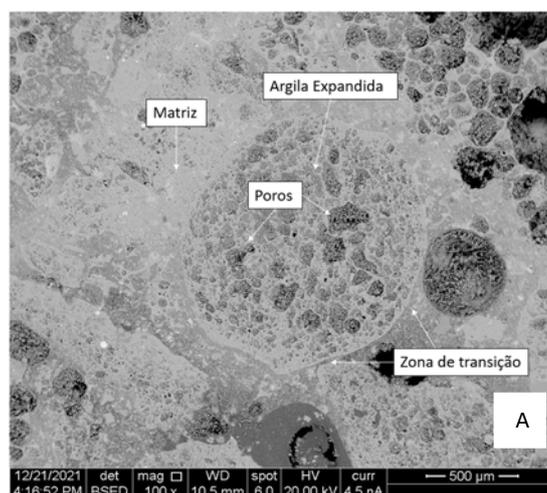


Fonte: SOUTO (2022)

É possível identificar, na Figura 24 (A), três fases distintas do compósito, o grão da argila expandida (que possui formato circular, com grande quantidade de vazios), a da argamassa (na qual é possível visualizar grãos de areia e a pasta, com uma cor clara mais clara) e a zona de transição entre os dois materiais.

Uma zona de transição mais densa e com melhores interconexões mecânicas foi observada entre argila expandida e matriz de cimento em agregado leve concreto do que o existente entre o agregado calcário e o cimento matriz em concreto de peso normal. (MORAVIA, 2017)

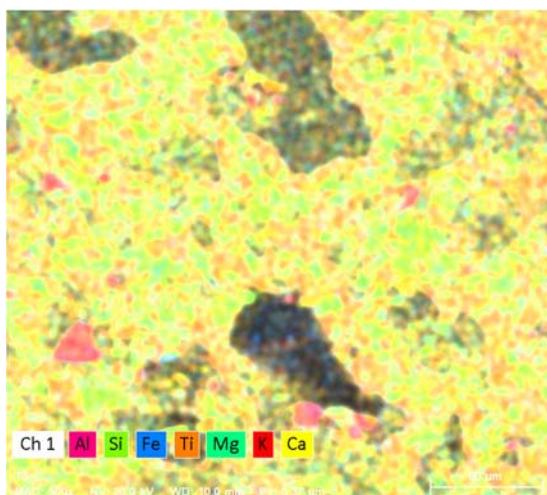
Figura 24: Imagem obtida por MEV, no modo BSED, onde pode ser observado os vazios do compósito cimentício, incorporado com argila expandida, nas magnitudes: 100x (A), 500x (B) e 1000x (C), respectivamente.



Fonte: SOUTO (2022)

Além da zona de transição bem delimitada, comparando as duas micrografias, da figura 23 e figura 24, e utilizando o recurso de mapeamento EDS, na figura 25, constata-se a impermeabilidade dos poros do agregado, relatado também por Cabral et al (2008). A matriz apresenta elevada concentração de cálcio (CaO) e silício (SiO<sub>2</sub>), principais componentes do cimento, com fragmentos dos componentes da argila expandida (alumínio, silício, ferro, etc.).

Figura 25: Imagem do compósito cimentício leve obtida por MEV, com utilização de EDS.



Fonte: SOUTO (2022)

A análise micrográfica valida os resultados dos ensaios realizados. Demonstrando um compósito com elevada porosidade, com vazios não interconectados e por vezes impermeáveis, que resulta na baixa resistência a compressão do compósito.

## 7. CONCLUSÕES

- Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física do compósito o qualificam como compósito cimentício leve, conforme prescrito na NBR 8953.
- O Traço 3, com relação a/c de 1,2, apresentou maior resistência à compressão aos 28 dias. Observou-se, de maneira geral, que a resistência à compressão de todos traços atingiu cerca de 80% da resistência final, aos 7 dias.
- A alta porosidade do compósito foi comprovada pela absorção de água nas primeiras horas de ensaio e, posteriormente, pelo ensaio de MEV. A complexidade da reologia do agregado, não demonstrou correlação linear entre a relação a/c e resistência à compressão.
- Apresentando o melhor fator de eficiência e menor absorção de água, o Traço 3, com relação a/c = 1,2, pode ser considerado o mais indicado para desenvolvimento de elementos construtivos (bloco, placa, telha), que satisfaçam, por exemplo, as exigências da NBR 15575.
- A microestrutura do compósito, com alta porosidade (poros impermeáveis), pressupõe a criação de elemento que apresenta bom desempenho térmico, acústico e de atenuação de ondas eletromagnéticas.

## REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NM 35. Agregados leves para concreto estrutural - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NM 248. Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739. Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6136. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211. Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8953. Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9779. Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575. Edificações habitacionais — Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13281. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16697. Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16916. Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16972. Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ABREU, F.S. Análise da durabilidade de concreto leve de argila expandida com camada protetora submetido a meio agressivo ácido. 71f. Dissertação. (Mestrado em Construção Civil). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, 2014.

BEKTAS, F., WANG, K. “Performance of ground clay brick in ASR-affected concrete: Effects on expansion, mechanical properties and ASR gel chemistry”, *Cement & Concrete Composites*, v.34, n.2, pp.273-278, 2012.

- BERENGUER, R., MARIZ, J., JUSTO, A., MONTEIRO, E., HELENE, P., OLIVEIRA, R., & CARNEIRO, A. Avaliação comparativa do comportamento mecânico de concreto leve aerado. *Revista ALCONPAT*, 8 (2), 178-193. 2018.
- BORJA, E.V. Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis.. 230f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2011.
- CABRAL, E.M., SA, R.J., VIEIRA, R.P. “ Utilização de massas cerâmicas na produção de agregado sintético de argila calcinada para uso em concreto”, *Cerâmica*, v. 54, pp 404-410, 2008.
- CALDERAN, T.C. Análise das propriedades mecânicas do concreto leve com a inserção de argila expandida e pérolas de EPS. 36f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil). Presidente Prudente-SP, 2019.
- CAMPOS, M.A.; PASSOS, L.; FERRÃO, A.M.A.; MORENO JUNIOR, A.L. Resíduos dos polos cerâmicos paulistas: Problema territorial e alternativa para a produção de matrizes cimentícias. *Conjecturas*, v. 22, n. 2, p.358-380, 2022.
- CAPPELARI, E.; GIORDANI, C.; DAPPER T.H, S., et al. Influência da resistência à compressão na molhabilidade superficial de concretos. *Revista Matéria*, v.25, n.1, 2020.
- CARVALHO MATOS, W.E. C.; SILVA, H.J.B.; PAZ, G.M.; SANTOS, V.B. Utilização de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar como material de preenchimento estrutural ou pozolânico para a produção de argamassas cimentícias: uma revisão. *Revista Matéria*, v.26, n.4, p. 1-20, 2021.
- CAVALCANTI FILHO, A. N. Contribuição ao controle tecnológico de concretos estruturais de cimento Portland, em ambientes marítimos. 2010. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). Indústria brasileira de cimento: Base para a construção do desenvolvimento, Associação Brasileira de Cimento Portland, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – Brasília, 2017.
- DOEBELIN, E. *Measurement Systems: Application and Design*, International Student Edition, Mcgraw-Hill 4a th edition, 1990.
- FARIAS, L.N. Estudo sobre o desempenho mecânico e térmico de concretos produzidos com diferentes tipos de agregados leves: uma revisão. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v.7, n.3, p. 22825-22839, 2021.
- FARIAS, N.E.A. Estudo comparativo envolvendo o dimensionamento de edifícios com recurso a betão leve ou betão de densidade normal. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Porto – Portugal, 2009.

FERREIRA, A. L. S. Comparação de diferentes técnicas para detecção e tratamento de outliers na determinação de fatores de medidores. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico, Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), 2017.

FERREIRA, C. N. G. Dimensionamento de elementos estruturais em concreto leve. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, 2015.

GOMES, E. G. S. Desempenho térmico de alvenaria: uma alternativa com o uso de blocos EVA. Dissertação (Mestrado):Universidade Federal da Paraíba-João Pessoa, 2015.

GOMES, P. C. C.; ALENCAR, T. F. F. de; SILVA, N. V. da; MORAES, K. A. de M.; ANGULO, S. C. Obtenção de concreto leve utilizando agregados reciclados. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 31-46, jul./set. 2015.

GOMES FILHO, T.S. Formulação e caracterização de compósitos cimentícios leves aplicados a silos pré-fabricados. 2015. 66f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2015.

GOMES, F.C.N. Dimensionamento de elementos estruturais em concreto leve. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, 2015.

HOLM, T.A; BREMNER, T.W.High Strength Lightweigth Aggregate Concrete. In: SMAH S.P; AGAMAD S.H High Performance Concrete: Properties and Aplications. Great Britain, McGraw-Hill, p.341-374, 1994.

LOPES, D. F.; SILVA, S. N. Avaliação das propriedades de argamassas cimentícias com adição de resíduos da geração termoelétrica. Matéria (Rio de Janeiro), v. 26, 2022.

MAYCÁ, J.; RECENA, F. A. P.; CREMONINI, R. A. Contribuição ao estudo da argila expandida nacional como alternativa de agregado graúdo para concretos leves estruturais. Curso de especialização (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto - Estrutura, Propriedades e Materiais, 1ª. ed., Editora PINI, São Paulo, 1994.

MORAVIA, W. G.; OLIVEIRA, C. A. S.; GUMIERI, A.G.; VASCONCELOS, W. L. Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve. Cerâmica, v. 52, p.193-199, 2006.

MORAVIA, W.G. Influência de parâmetros microestruturais na durabilidade do concreto leve produzido com argila expandida. Tese de D.Sc., UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2007.

MONCADA, J.E.C.M.; FLOR, L.D.S.; SILVA, V.A.; PACHECO, J.S. Estudo da adição de argila expandida e EPS como agregados na elaboração de concreto leve. Revista Eletrônica Teccen, v.12, n.1, 2019.

NUNES, J.J.B.C.; TEIXEIRA, A.M.A.J.; SARAIVA, R.M.D.C. Caracterização morfológica do agregado leve de argila expandida brasileira com utilização do AIMS. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 213-227, 2021.

OLIVEIRA, G.T.; SCHIMANOWSKI, E.R.Z.; PIOVESAN, T.R.; LOPES D.C., Isolamento térmico em placas de concreto produzido com agregado leve. IX ENSUS – Encontro de Sustentabilidade em Projeto – UFSC – Florianópolis/SC, 2021.

PEREIRA, A. A. Desenvolvimento e caracterização de compósito cimentício leve para produção de elementos de vedação no contexto de smart buildings. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, 2021.

PEREIRA, M.R. Estudo da adição de argila expandida na formulação de concretos leves. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2008.

REZENDE, MARIA LUIZA DE SOUZA. Resíduo de caulim primário como material pozolânico em concreto seco: propriedades físico-mecânicas e durabilidade. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola Construções Rurais e Ambiência), 179fls, Campina Grande-PB, 2013.

ROSSIGNOLO, J.A. Concreto leve estrutural: influência da argila expandida na microestrutura da zona de transição pasta/agregado. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 119-127, 2009.

ROSSIGNOLO, J.A. Concreto leve estrutural: Produção, propriedades, microestrutura e aplicações. São Paulo: Editora PINI, 2009.

SANTIS, B. C. et al. Caracterização de massas cerâmicas do estado de S. Paulo para produção de agregados leves para concreto. Cerâmica, v. 59, p. 198-205, 2013.

SANTIS, B. C.; ROSSIGNOLO, J. A. Influência dos agregados leves de argila calcinada nas propriedades mecânicas de concretos estruturais. Revista Matéria, v.20, n.2, p.399-406, 2015.

SHIMADA, HELIO. Impacto da prospecção geológica na otimização do processo de produção de cimento Portland na fábrica de cimento Votoran, Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Votorantim, SP. 1999.

SILVA, E.J.; VELASCO, F.G.; LUZARDO, F.M.; MARQUES, M.L.; MILIAN, F.M.; RODRIGUES, L.B. Compósito cimentício com elevado teor de fibra de coco tratada: propriedades físicas e durabilidade. Revista Matéria, v.23, n.3, 2018.

SILVA, JOSE BEZERRA DA. Avaliação do desempenho de blocos de concreto estrutural dosados com politereftalato etileno (PET) micronizado. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, 135 f, 2016.

SOUZA, M.C.; SOUSA, A.; SOTERO, D.Y; FRAGA, B. Efeito da sílica ativa nas propriedades do concreto leve com argila expandida. *Mix Sustentável*, v.8, n.1, p.29-40, 2022.

SCOBAR, R.L. Concreto leve estrutural: substituição do agregado graúdo convencional por argila expandida. 47f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão-PR, 2016.

SOUZA, M.C.; DAVI, A.S.; FRAGA, Y.S.B.; Efeito da sílica ativa nas propriedades do concreto leve com argila expandida. *Mix Sustentável*, Florianópolis, v.8, n.1, p.29-40, 2022.

VERVLOET, A.L.; BARBOZA, L.S.; SARTORTI, A.L. Concreto autoadensável: influência da argila expandida na resistência à compressão. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 11, n.3, p. 135-149, 2019.

YOON J.Y., KIM J.H., HWANG Y.Y., E SHIN D.K. Lightweight concrete produced using a two-stage casting process. *Materials*, 8(4):1384–1397, 2015.